

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

На правах рукописи



**КАФТАЕВА МАРГАРИТА ВЛАДИСЛАВНА**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПЕРЕДЕЛОВ  
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
профессор  
Рахимбаев Ш.М.

Белгород 2013

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ литературных данных.....	15
1.1 Научные исследования в области автоклавных материалов.....	21
1.2 Практика производства автоклавных газосиликатов.....	23
1.3 Проблемы исследования и развития производства автоклавных ячеистых бетонов.....	26
1.4 Перспективы производства и применения автоклавных газосиликатов.....	28
Выводы по главе 1.....	31
2 Обоснование выбора сырьевых материалов для газосиликата.....	33
2.1 Вяжущие.....	33
2.1.1 Портландцементы.....	34
2.1.2 Известь.....	38
2.1.3 Гипс.....	44
2.2 Кремнеземистый компонент.....	44
2.3 Порообразователи для ячеистого бетона автоклавного твердения.....	66
2.4 Модифицирующие добавки для автоклавного ячеистого бетона.....	68
2.5 Совершенствование методов исследований сырья и готовой продукции.....	71
2.5.1 Анализ методов производственных испытаний сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.....	71
2.5.2 Предлагаемые методики испытаний сырья и готовой продукции.....	74
Выводы по главе 2.....	77
3 Идентификация и анализ фазового состава газосиликатной связки	79
3.1 Фазовый состав гидросиликатного связующего газосиликата.....	79
3.2 Рентгено- и термографический анализ автоклавных ячеистых бетонов.....	85
3.3 Тепловыделение при образовании гидросиликатной связки.....	106
3.3.1 Термодинамический анализ фазового состава гидросиликатной связки автоклавного газобетона.....	106
3.3.2 Анализ тепловыделения газосиликатов, изготовленных с применением различных вяжущих и песков.....	111
3.4 Макроструктура поровых перегородок в зависимости от способа производства автоклавных ячеистых бетонов.....	116
3.5 Зависимость физико-механических свойств газосиликата от его микроструктуры.....	126
Выводы по главе 3.....	129

4	Обоснование влияния состава, дисперсности сырьевой смеси и технологических факторов на синтез гидросиликатной связки и структуру газосиликатных изделий.....	133
4.1	Физико-химические основы формирования структуры газосиликата.....	133
4.2	Влияние структуры на прочность и плотность автоклавного ячеистого бетона.....	143
4.3	Влияние влажности газосиликата на формирование структуры и эксплуатационные свойства изделий.....	156
4.3.1	Влияние влажности сырца на формирование структуры и свойства газосиликатов.....	156
4.3.2	Влияние влажности газобетонов на их эксплуатационные свойства.....	159
4.4	Теплопроводность и паропроницаемость силикатных ячеистых бетонов автоклавного твердения.....	165
4.5	Влияние аддитива на свойства силикатных газобетонов.....	168
4.6	Влияние обратного шлама на свойства силикатных газобетонов.....	170
	Выводы по главе 4.....	171
5	Обеспечение качества производства ячеистых бетонов автоклавного твердения.....	174
5.1	Анализ существующих технологий производства автоклавного газобетона.....	174
5.2	Основные дефекты, возникающие при производстве газосиликата.....	196
5.2.1	Дефекты, возникающие в результате применения некачественных сырьевых материалов.....	197
5.2.2	Возникновение дефектов в газобетоне до автоклавной обработки.....	214
5.2.3	Дефекты, возникающие во время резки массива.....	222
5.2.4	Дефекты, возникающие при автоклавировании газосиликатных изделий.....	225
5.2.5	Механические повреждения газосиликатных изделий.....	227
5.3	Организационно-технические мероприятия для повышения эффективности производства газосиликатов.....	236
	Выводы по главе 5.....	254
	Основные выводы и итоги работы.....	257
	Библиографический список.....	261
	Приложение А.....	292
	Приложение Б.....	295
	Приложение В.....	297

## Введение

Проводимая в настоящее время в России научно-техническая политика направлена на внедрение наиболее эффективных конструктивных систем для объектов строительства, особенно после принятия в 2009 г. закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Основной целью принятия закона являлось обеспечение всемерной экономии энергетических ресурсов. При этом применение энергоэффективных и теплосберегающих материалов и изделий для ограждающих конструкций является приоритетным при возведении и реконструкции зданий. К таким материалам можно отнести изделия из ячеистого бетона автоклавного твердения.

В последние десятилетия силикатная промышленность переживает новый подъем производства за счет модернизации старых и ввода в эксплуатацию новых заводов по производству ячеистых бетонов автоклавного твердения. По данным Национальной ассоциации производителей автоклавного газобетона (НААГ [1]), ячеистый бетон автоклавного твердения – материал с самым динамично прирастающим объемом производства. За 12 лет его выпуск увеличился в 6,5 раз, а доля среди стеновых материалов, выпускаемых в России, выросла с 6 до 30%. Только в 2012 г. производство газобетона выросло более чем на 20%, превысив объем 7 млн м<sup>3</sup>. Введены новые мощности, увеличившие потенциал выпуска до 13 млн м<sup>3</sup> в год [2].

В связи с тем, что весь этот рост производства осуществлен при применении новых заводов с технологическими линиями, ввозимых в Россию из-за рубежа (Германия, Китай), все требования к технологиям, сырьевым ресурсам, методам испытаний разработаны и адаптированы к условиям именно этих стран-поставщиков, а теория и практика



собственных технологий производства газобетонов в России пока невелики. Чуть больше и подробнее эти вопросы разработаны в республике Беларусь, Украине и Казахстане, где объем внедрения ячеистых бетонов для наружных стен зданий составляет соответственно 90 %, 70 % и 50 %. Изложенное показывает, что в России сейчас назрела необходимость научного сопровождения производства автоклавных ячеистых бетонов.

Диссертационная работа выполнена в рамках Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012 – 2016 г.

На основании вышеизложенного, была **сформулирована цель настоящей работы**, состоящая в теоретическом обосновании технологий производства современных конструкционно-теплоизоляционных материалов из ячеистых бетонов автоклавного твердения.

Для достижения поставленной цели при проведении исследований решались следующие **задачи**:

- обоснование требований к составам и свойствам исходных сырьевых материалов для производства газобетонных изделий;
- уточнение состава гидратных новообразований в газосиликатных смесях при их автоклавной обработке;
- исследование влияния основности и кластерной структуры исходных газосиликатных заливочных смесей на фазовый состав, реологические свойства и формирование эксплуатационных характеристик силикатного связующего;
- обоснование направленного поиска и синтеза химических добавок – регуляторов скорости гашения извести и кинетики формирования гидросиликатной связки ячеистых бетонов автоклавного твердения;
- выявление роли первичного и вторичного этtringита в формировании структурно-механических свойств сырьевых смесей и эксплуатационных характеристик готовых изделий;

– обоснование рационального содержания гипса в заливочных смесях при литьевых технологиях изготовления газобетона;

– расчет и экспериментальное определение внутреннего тепловыделения силикатных ячеистых бетонов в экзотермическом процессе синтеза газосиликатной связки и обоснование на этой основе способов экономии энергетических ресурсов при автоклавной обработке бетонов;

– разработка способа определения степени созревания массивов в зоне ферментации бетонов по влажности и температуре газобетона;

– разработка предложений по улучшению основных переделов технологии производства газобетонных автоклавных изделий на современных технологических линиях.

### **Научная новизна**

Предложен системный подход к проблеме совершенствования технологии производства, снижения ее энергоемкости, повышения качества и долговечности газосиликатных материалов автоклавного твердения: даны теоретически обоснованные предложения по расширению сырьевой базы, идентификации и регулированию фазового состава гидросиликатного связующего, влиянию гипса на процессы созревания сырьевой смеси и формирования физико-механических характеристик силикатного камня, регулированию скорости гашения известкового компонента с помощью химических добавок, определению причин возникновения и способов устранения дефектов в готовых изделиях и т.д.

Обоснованы требования к сырьевым материалам для производства газосиликатных бетонов автоклавного твердения. Установлено, что существующие нормативные требования к модулю крупности кварцевого песка относятся лишь к плотным силикатным бетонам, а для газобетонов, при производстве которых песок тонко измельчается, допускается  $M_{кр}$  от 0,3 до 0,7.

На основе правил кислотно-основных взаимодействий Соболева - Рамберга произведено ранжирование активности кислого компонента силикатных бетонов: кварц > альбит > микроклин > ортоклаз. Исходя из этого, рекомендовано применение взамен кварцевого песка (при его отсутствии), полевошпатовых песков или отсеков дробления гранита без снижения качества конечного продукта.

Установлены закономерности влияния химических добавок на скорость гашения извести, это позволило предложить добавки-электролиты замедлители быстрогасящихся известей.

Дано теоретическое обоснование рациональной дозировки гипса в заливочных смесях при литьевых технологиях изготовления автоклавного газобетона. Показано, что чрезмерное количество гипса в смеси затрудняет получение газосиликатов пониженных плотностей ( $D 300$  и  $D 400$ ).

Установлено, что повышенное количество первичного этtringита в сырце недопустимо, так как в условиях пересыщенного раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  он может вызывать внутренние напряжения и расширение сырца, что иногда наблюдается на практике при использовании быстрогасящейся извести. Показано, что вторичный этtringит не опасен для автоклавных ячеистых бетонов, так как он образуется в смеси в условиях низкой концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  через «жидкую фазу». В то же время при температуре автоклавной обработки  $t = 185 - 190$  °C гипс преобразуется в ангидрид, способный к существенному расширению при гидратации. Этот процесс может явиться причиной образования дефектов структуры готовых изделий на стадии охлаждения.

Исходя из теории структурообразования в силикатных системах различной основности установлено, что низкоосновные гидросиликаты кальция группы тоберморита наилучшим образом подходят для формирования прочности газобетонов, так как у них более пологая кривая зависимости прочности от пористости, а высокоосновные гидросиликаты группы гиллебрандита лучше как носители прочности прессованных

систем. На этой основе дано теоретическое обоснование возможности получения из двухосновных гидросиликатов кальция группы гиллебрандита камня с высокими физико-механическими показателями.

Произведен термодинамический расчет температур образования тоберморита и ксонотлита из сырьевой смеси состава 1 : 1 и установлено, что первый устойчив при температуре не ниже 150 – 160 °С, а второй – 180 °С и выше. При изменении температуры окружающей среды ксонотлит способен переходить в тоберморит и наоборот. На этой основе дано объяснение существующих противоречий по условиям устойчивости тоберморита и ксонотлита.

Установлено, что существенный вклад в процесс нагрева силикатной смеси при запаривании вносит реакция взаимодействия гидроксида кальция с силикатными компонентами (80 кДж/кг для тоберморита и 45 кДж/кг – для ксонотлита). Это может вызвать повышение температуры внутри силикатного газобетона при автоклавировании на 23 и 12 °С соответственно, что позволяет рекомендовать энергосберегающие режимы автоклавной обработки газосиликатного бетона, особенно низких плотностей.

Снижение влажности до и после автоклавной обработки газобетонов предотвращает или ограничивает фазовые превращения тоберморит↔ксонотлит. Это обеспечивает дополнительное преимущество ударной технологии производства силикатных газобетонов перед литьевой.

На основе уравнения Ламе произведен анализ собственных деформаций и напряжений, возникающих в вяжущих системах с кольцеобразными элементами структуры, к которым относятся и газобетоны. Это приводит к выводу, что усадочные явления, уменьшающие объем системы «вяжущее – вода» в газобетонах, изготавливаемых по литьевой технологии, приводят к появлению тангенциальных сил стяжения, разуплотняющих межпоровые перегородки.

При ударной технологии этого явления не наблюдается, так как отношение диаметра поры и толщины межпоровой перегородки находится в области геометрических размеров кольцеобразных элементов структуры, при которых наблюдается баланс тангенциальных и радиальных напряжений.

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что при литьевой технологии образуются почти строго круглые поры сравнительно крупного размера с очень тонкими плотными межпоровыми перегородками. При ударной технологии образуются мелкие поры менее регулярной формы с более толстыми мелкопористыми перегородками. Мелкие поры в газобетонах по-видимому являются первичными, а крупные – вторичными. Последние образуются из-за тиксотропного разжижения газосиликатной смеси во время ударных воздействий путем слияния мелких пор. Структура газосиликата, изготовленного по ударной технологии, более благоприятна с точки зрения трещиностойкости и деформативности, так как в них более сбалансированы тангенциальные и радиальные напряжения и деформации. Эти данные открывают перспективу регулирования поровой структуры газосиликатных материалов путем варьирования состава сырьевой смеси и параметров механических воздействий на нее.

В газосиликатных бетонах выявлено три типа структурных элементов: глобулярные образования, конденсационно-кристаллизационные и участки сетчатых структур кристаллизационного твердения, состоящие из идеально гладких пластинчатых наноразмерных частиц. Последние, очевидно, дают изделиям максимально высокие физико-механические показатели. Предложены способы создания таких структур твердения.

В настоящее время для определения степени вызревания бетона перед резкой массива применяются индикационные приборы – пенетрометры. Обоснован способ определения степени созревания массивов в зоне ферментации бетонов по влажности и температуре смеси. Влажность

можно определять более точно, в том числе методами нейтронографии, гигрометрии и др., которые быстро совершенствуются.

### **Практическое значение и результаты работы**

Рекомендовано использование в заливочных смесях кварцевых песков с модулем крупности  $0,3 < M_{кр} < 0,7$ , что позволяет значительно экономить энергоресурсы при помоле применяемых песков.

Сформулированы новые требования к выбору типа цемента для автоклавных бетонов. Показано, что основным фактором, влияющим на стабильность показателей газобетонных смесей в первоначальный период структурообразования и качество конечного продукта, является показатель активности смеси по СаО. Предложена формула для расчета активности газосиликатной смеси с учетом содержания СаО в извести, портландцементе и обратном шламе, добавляемых в последнюю, что позволяет стабилизировать качество готовой продукции даже в условиях вариации состава используемых портландцементов и обратного шлама. Рекомендовано применение наряду с ЦЕМ I цемента типа ЦЕМ II.

Показана возможность регулирования в широких пределах скорости гашения извести путем использования добавок, предложенных в данной работе. Это значительно расширяет сырьевую базу основного вяжущего компонента для производства газосиликата – извести и облегчает регулирование технологических процессов производства изделий. При этом существенно снижается себестоимость продукции, при сохранении ее высокого качества.

При литевых технологиях изготовления газосиликата рекомендовано ограничить дозировку гипсового камня 7-ю %, а в случае использования гипса строительного (полуводного сульфата кальция) – 2,5 %. Это предотвращает возникновение деструктивных внутренних напряжений в изделиях, повышает их прочность и долговечность.

Переход от тоберморитовых бетонов к ксонотлитовым требует дополнительных энергетических затрат. В связи с этим представляет

практический интерес наличие существенного тепловыделения в процессе синтеза гидросиликатной связки при использовании повышенного содержания извести, что характерно для бетонов низких плотностей. Изложенное открывает перспективы снижения энергозатрат в технологии производства силикатных и газосиликатных бетонов с использованием экзотермического эффекта образования гидросиликатной связки.

Необходимо ограничить отпускную влажность готовых газосиликатных изделий 25-ю %. Особенно это актуально при литьевой технологии изготовления газобетонных изделий. Реализация этого предложения повышает и стабилизирует качество и эксплуатационные характеристики изделий, особенно теплозащитные свойства готовой продукции. При этом учитываются и экологические показатели производства газосиликатных изделий.

Неблагоприятная поровая структура газобетонов, изготовленных по литьевой технологии, обусловлена повышенным содержанием воды. Рекомендовано использование специальных добавок, способов регулирования состава и соотношения компонентов смеси для оптимизации ее количества. Литьевая технология предъявляет повышенные требования к качеству сырья, тогда как ударная к этому менее чувствительна. Выбор способа производства газобетона рекомендуется производить, исходя из характеристик местных сырьевых компонентов и в первую очередь – качества извести.

Предложено основными показателями качества созревания массива принимать влажность и температуру газосиликата перед его резкой. Разработана методика и прибор (термогигрометр), способный в условиях повышенной агрессивности паровоздушной среды внутри бетона проводить экспресс-контроль степени созревания газосиликатного бетона. Внедрение этих разработок позволит повысить точность контроля газосиликатных бетонов, стабилизирует качество готовой продукции.

Получены и внедрены в производство ячеистые бетоны пониженных марок по средней плотности  $D 400$ ,  $D 350$ , имеющие прочность при сжатии более 3 МПа. Это позволяет повысить этажность проектируемых зданий и сооружений с использованием энергоэффективных конструкционно-теплоизоляционных силикатных бетонов пониженных плотностей.

Разработаны и предложены к внедрению в производство поправки к нормативным документам на требования к цементам, известям, кремнеземистым компонентам сырьевой смеси, а также методики проверки качества сырья, что позволит стабилизировать эксплуатационные показатели готовых изделий.

Разработчикам и поставщикам технологических линий по производству газобетонов предложены проектные решения, позволяющие наиболее эффективно использовать внутреннее тепло бетонных массивов на различных технологических переделах. При этом экономятся энергоресурсы и производственные площади, при этом повышается качество выпускаемой продукции.

Разработана многофакторная классификация дефектов газобетонных изделий в процессе производства, установлены возможные причины появления и предложены способы их устранения. Составлены организационно-технические и технологические рекомендации по повышению производительности труда на предприятиях, выпускающих автоклавные ячеистые бетоны.

**На защиту выносятся:**

- теоретически обоснованные требования к сырьевым компонентам для изготовления силикатных газобетонов по различным технологиям;
- новые теоретические представления о роли первичного и вторичного эттрингита в технологии производства газобетонных изделий и основанные на них предложения о рациональных дозировках гипса в составах, изготавливаемых по различным технологиям;
- закономерности влияния химических добавок на гашение извести;



- влияние основности гидросиликатов кальция на зависимость прочности сформированного из них камня от пористости;
- уточненные данные о фазовом составе гидросиликатной связки и связанной с этим температурной устойчивости тоберморита и ксонотлита в условиях автоклавной обработки и после нее;
- особенности поровой структуры газобетонных материалов, изготовленных с применением литьевой и ударной технологий, и предположения о механизме ее формирования;
- использование тепловыделения при гидротермальном синтезе газосиликатной связки газобетонов в автоклаве для снижения энергозатрат в производстве изделий;
- термогигрометрический способ оценки степени вызревания газобетонных массивов перед резкой взамен пенетрометрического.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на XIII Международном семинаре Азиатско-Тихоокеанской академии материалов «Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века (г. Новосибирск, 2006); II Международной научно-практической конференции, МНИЦ ПГСХА (г. Пенза, 2011); Международной научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» (г. Санкт-Петербург, 2011); Международной научно-практической конференции (г. Москва, 2012); Международной научно-практической конференции «Энергосбережение и экология в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве городов (г. Белгород, 2012); Научной интернет-конференции Российской Академии естествознания «Актуальные вопросы производства и применения ячеистых бетонов» (2013); Международной научной конференции «Эффективные композиты для архитектурной геоники» (18 – 19 сентября, Белгород, 2013); V Международной научно-практической конференции «Экология: образование, наука, промышленность и здоровье» (14 – 16 ноября, Белгород, 2013).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 36 научных трудов, в том числе 2 монографии, 1 патент на изобретение, 12 публикаций в трудах международных конференций; 9 статей в отраслевых и научных журналах; 12 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК России.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 291 странице, состоит из введения, 5 глав, общих выводов, включает 25 таблиц и 98 рисунков, содержит библиографический список литературы из 296 наименований.

**Личное участие автора.** Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором, либо при непосредственном участии или под его руководством. Автору принадлежит постановка и осуществление исследований, обобщение результатов, выявление закономерностей и формулирование основных выводов.

**Автор выражает благодарность** научному консультанту д-ру техн. наук Шарку Матрасуловичу Рахимбаеву за советы и конкретные конструктивные предложения при выполнении исследований и теоретической интерпретации результатов, соавторам научных публикаций, всем сотрудникам кафедр: Строительного материаловедения, изделий и конструкций; Технологии цемента и композиционных материалов; Городского кадастра и инженерных изысканий, Городского строительства и хозяйства БГТУ им. В.Г. Шухова за поддержку и помощь в выполнении работы.

Отдельная благодарность сотрудникам предприятий по производству ячеистых бетонов автоклавного твердения: ЗАО «АЭРОБЕЛ» г. Белгород, завод стеновых материалов "Поревит", г. Ялуторовск Тюменской обл.; ЗАО "Саянскгазобетон" г. Саянск Иркутской обл, ЗАО "ГлавБашСтрой" г. Уфа; ООО «Егорьевский завод строительных материалов» г. Егорьевск, Московской обл. и лично их руководителям за поддержку и оказание действенной помощи в проведении промышленных апробаций и внедрении разработок автора.

## 1 Анализ литературных данных

Автоклавный ячеистый бетон известен давно. Гидротермальный синтез, как и многие другие разработки, пришедшие к нам впоследствии из-за рубежа, был изобретен выдающимся русским ученым К.Д. Хрущевым в середине XIX в. К.Д. Хрущев впервые осуществил гидротермальный синтез при высоких температурах водяного пара (до 350 °С) и очень высоких давлениях. Первые опыты проводились в стеклянных ампулах частично наполненных водой, которые нагревались после полной герметизации. Позднее было установлено, что кремнезем стекла в условиях опыта вступает в реакцию, поэтому аппаратуру стали изготавливать из металла.

Параллельно с Хрущевым французские исследователи Добре и Сенармон, американец Рауленд и Михаэлис в Германии работали над получением искусственных камней в автоклавах [3].

Эти исследования определили возможность получения прочного искусственного камня не только обжигом, как это имеет место в керамической промышленности, но и при сравнительно низких температурах в присутствии воды или водяного пара. В 1854 году Лебрен (Франция) оформил патент на изготовление искусственного камня из известково-песчаной смеси действием нагретой воды. Однако, из-за отсутствия промышленного оборудования этот патент не получил практического применения. В конце XIX в. появилось много публикаций и патентов на такие технологии [4, 5].

Родоначальником автоклавной технологии считается В. Михаэлис (1880 г.), получивший патент на запаривание в автоклаве известково-песчаной смеси при температуре 130 – 300 °С в течение 8 – 9 часов. Эта работа носила теоретический характер и нашла применение через 17 лет [6].

Предложение использовать пар под давлением для получения строительных материалов в США связано с именем Рауленда, которому был выдан патент [7] на изготовление искусственных камней из тонкомолотого песка, цемента и воды с последующей обработкой в автоклавах под давлением. В журнале *Tonindustrie – Zeitung* за 1899 г. дано описание патентов появившихся в конце XIX в. и способов производства искусственного камня на их основе. Заслуживают внимания изобретения Пфайфера [8], Ольшевского [7] и Клебера [9].

Отличительная особенность предложения Пфайфера [8] заключается в том, что в процессе запаривания одновременно происходит гашение водой извести. Таким образом, заготавливалась известь для приготовления массы следующей партии кирпича, а тепло, образующееся при этом, использовалось для нагревания изделий. Позднее предложение Пфайфера было усовершенствовано В. Ольшевским. Он предложил предварительно подогреть или подсушивать кирпич путем продувки воздухом, а известь для приготовления формовочной массы гасить паром в гасильных барабанах. Свежеотформованный кирпич после просушки запаривался под давлением 0,6 – 0,8 МПа в течение 8 – 10 ч. Прочность кирпича, изготовленного по этому способу, составляла в среднем 23,8 МПа. Предложение В. Ольшевского нашло практическое применение (барабанный способ гашения).

В 1899 г. Клебер получил патент, по которому предусматривалось при изготовлении известково-песчаного кирпича добавлять в смесь раствор соляной кислоты. Отформованный кирпич проходил окончательную обработку в автоклаве под давлением пара 0,7 – 1 МПа. Механическая прочность готового кирпича колебалась в пределах 16,3 – 22,1 МПа при удовлетворительной морозостойкости.

Российский ученый Глазенапп (1900 – 1902 г.), изучающий влияние режимов автоклавной обработки известково-песчаных смесей под давлением 0,5 – 1 МПа установил, что прочность

известково-песчаного камня определяется количеством образовавшихся гидросиликатов кальция, зависит от суммарной поверхности соприкосновения песчинок с известью, от продолжительности воздействия и величины давления водяного пара [4].

Профессор В. И. Курдюмов в работе, опубликованной в 1900 г., отмечает работу А. А. Байкова, предложившего обрабатывать спрессованную смесь гашеной извести и песка вначале паром высокого давления, а затем углекислым газом.

В 1907 – 1908 г. Ледуком было изучено влияние давления пара (0,4, 0,6, 0,8 и 1 МПа), времени твердения (4, 6, 8, 10 ч) и условий (давление 25, 50, 75, 100 МПа) прессования смеси. Было установлено, что увеличение любого параметра приводит к повышению прочности известково-песчаного камня.

Длительное время владельцы кирпичных заводов добивались запрещения применения силикатного кирпича, так как считали, что этот кирпич неморозостоек. Однако опыт многолетнего применения его в строительстве доказал обратное. Кроме того, длительность производственного цикла для красного кирпича составляет 5 – 6 сут, а на подавляющем большинстве кирпичных заводов еще больше, тогда как для силикатного кирпича – 15 – 20 ч. Такой относительно короткий цикл производства наряду с другими технико-экономическими преимуществами определил темп развития этой промышленности.

Первые заводы в России начали строить в 1890 г. В 1914 г. в России уже работало несколько заводов, которые выпускали 158 млн. шт. кирпича. В первые годы Советской власти производство силикатного кирпича стало расти. К концу 20-х годов было выпущено около 400 млн. шт. кирпича. За период 1927 – 1937 г. было построено 49 заводов, что обеспечило в 1940 г. выпуск 1 млрд.

шт. кирпича. По отношению к общему выпуску кирпича это составляло около 12%. В 1975 г. выпуск составил уже 17,5 млрд шт [4].

В настоящее время удельный вес производства силикатного кирпича в общем выпуске стеновых изделий составляет около 25%.

В зарубежных странах также наблюдался рост производства автоклавных материалов, например, выпуск силикатного кирпича в ФРГ за последние годы возрос с 2,8 млрд шт. до 6,1 млрд шт., в Голландии с 0,9 млрд шт. до 1,3 млрд шт.

Развитие производства силикатного кирпича в нашей стране базировалось в основном на работах отечественных ученых, которые выявили сущность и закономерности физико-химических процессов и создали теоретическую базу для дальнейшего совершенствования технологии автоклавных материалов [10, 11].

Советские исследователи и производственники, начиная с конца 20-х годов, вели работы, направленные на использование автоклавной технологии для производства строительных изделий и особенно крупных сборных деталей.

В 1930 г. В.П. Некрасов предложил так называемый «силикальцит» [12] и ввел понятие «безобжиговые искусственные строительные материалы». В конце 30-х годов было начато широкое промышленное производство автоклавных сборных деталей.

Первые исследования механической прочности цементного бетона в условиях пропарки и запарки в СССР выполнили в 1931 г. Е. М. Пороцкий и А.В. Саталкин [13].

При автоклавной технологии заполнители являются составной частью реагирующих компонентов, поэтому в таких бетонах исключен крупный заполнитель и используется непригодный для бетонных работ мелкий песок.

В 30-е годы страна испытывала острый недостаток в цементе и металле, поэтому все внимание инженерных работников приковывалось к экономии – замене их другими, менее дефицитными материалами. Автоклавная обработка долгое время рассматривалась с позиции интенсификации процессов твердения вяжущих веществ и особенно различного рода «заменителей» цемента.

Следствием такого подхода явилось то, что огромное количество работ, исследующих автоклавную технологию, ограничивается давлением водяного пара в пределах 0,8 – 1 МПа. Первые работы, посвященные исследованию роли пара высокого давления, встретили отрицательное отношение как у нас в стране, так и за рубежом. Только в последние годы в результате многочисленных исследований и производственной проверки целесообразность повышения давления в автоклаве перестала встречать возражения.

В решении семинара, прошедшего в г. Таллин (1966 г.) «Исследование влияния режимов гидротермальной обработки на свойства силикатных материалов» записано: «Можно считать, что достаточная ясность и единое мнение достигнуто в отношении следующих вопросов:

1. с повышением температуры гидротермальной обработки ускоряются происходящие процессы твердения, сокращается продолжительность обработки. При проектировании новых заводов следует принимать давление в автоклаве 1,2 – 1,6 МПа...

2. Режимы гидротермальной обработки необходимо назначать в зависимости от назначения изготавливаемых деталей и предъявляемых им требований, а также состава и свойств исходных материалов...».

В октябре 1969 г. секция промышленности стеновых и вяжущих материалов научно-технического Совета МПСМ СССР, рассмотрев важнейшие научно-технические проблемы и направления научно-исследовательских работ на 1971 – 1975 г. в промышленности

стеновых материалов из автоклавных бетонов и силикатного кирпича, в числе прочих решений записала: «считать необходимым интенсифицировать процессы производства автоклавных изделий и в первую очередь процесс автоклавной обработки, для чего... перевести автоклавы на работу при повышенном давлении 1,2 – 1,6 МПа, отдельные заводы в виде опыта – на давление 2,5 МПа с доведением цикла запарки до 10 – 12 ч...».

Начиная с 50-х годов, появились работы, посвященные автоклавным материалам, полученным на базе гидросиликатов, гидроцирконатов, гидрогерманатов и других соединений не только кальция магния и других элементов [14 – 20].

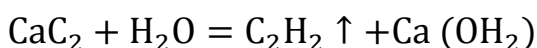
Эра ячеистых бетонов началась с 1889 г., когда Гофман (Прага) получил патент на методику производства ячеистого бетона на основе углекислого газа.

В 1914 г. Аулсвортом и Дайером (США), было предложено применять в качестве газообразователя порошки алюминия, цинка и некоторых других металлов, которые при взаимодействии с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  выделяли водород и действовали как вспучивающие добавки.

В дальнейшем было предложено газообразование в бетоне на основе – реакции перекиси водорода с гипохлоритом кальция:



– реакции разложения карбида кальция в присутствии воды с выделением ацетилена:



В 1919 г. немецкий ученый Грош предложил применение металлических пудр в качестве газообразователей, в том числе алюминиевой пудры.





Практическое значение для развития производства газобетона имели исследования Эрикссона (Швеция), начатые в 1918 – 1920 гг. Он предложил вспучивать подвижную смесь извести с тонкоизмельченными кремнеземистыми компонентами и добавкой цемента (10%) при взаимодействии алюминиевого порошка с растворенным  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Производство этого материала было начато фирмой «Итонг» в 1929 г. в Швеции. При этом в основу технологии был положен автоклавный способ обработки.

В дальнейшем развитие технологии автоклавного газобетона пошло двумя путями. Один путь привел к началу производства газосиликата «Итонг». Это пористый бетон автоклавного твердения, получаемый из смеси извести с кремнеземистыми добавками и без цемента. Второй путь (1934 г.) привел к другой разновидности газобетона – "Сипорекс", предложенным финским инженером Леннартом Фушеном и шведским инженером Иваром Экмундом. Исходными компонентами тогда были цемент, и песок без добавления извести. В этой технологии, наряду с цементом, к тонкомолотому песку добавляют шлам тонкомолотого гранулированного шлака и химической добавки и небольшое количество (до  $40 \text{ кг/м}^3$ ) извести.

### **1.1 Научные исследования в области автоклавных материалов**

Первые исследования в области технологии и свойств ячеистых бетонов в нашей стране относятся к тридцатым годам прошлого столетия. Советские ученые П.А. Ребиндер [21], А.А. Брюшков [22], Б.Н. Кауфман [23] и др., разработали технологию теплоизоляционного пенобетона естественного твердения и изучили его свойства. Работы исследователей и изобретателей М.Н. Гензлера [24], Б.Н. Кауфмана [25, 26], К.И. Шульца и др. в начале 30-х годов способствовали практическому внедрению в строительство неавтоклавного монолитного пенобетона, получаемого в

условиях стройплощадки. И.Т. Кудряшов [27 – 30] и др. в середине 30-х годов установили, что по сравнению с неавтоклавным пенобетоном, автоклавный имеет ряд преимуществ: сокращение расхода цемента, снижение явления усадочных деформаций, повышение прочности бетона и сокращение времени его твердения.

Широкие исследования золы-уноса для производства ячеистого бетона были проведены Ф.П. Кивисельгом [31], А.Т. Барановым и Г.А. Бужевичем [32, 33], К.Э. Горяиновым [34], И.А. Ивановым и Н.И. Федыниным [35, 36] и многими другими учеными. Из технологических исследований послевоенных лет следует отметить работы по изысканию новых поризаторов и технологических приемов производства ячеистого бетона. Это исследования газообразователя пергидроля П.Д. Кевеш, Э.Я. Эршлер [37], разработки Л.М. Розенфельда [38] по пенообразователю "ГК" для ячеистых бетонов. Многочисленные исследования различных технологических способов и режимов автоклавной обработки изделий и производства ячеистых бетонов были выполнены А.Г. Нейманом, М.Я. Кривицким, Н.С. Волосовым [39], А.Н. Крашенинниковым [40], И.Л. Жодзинским и В.В. Макаричевым [41] и другими. Е.С. Силаенков [42] провел исследования по изучению вопросов долговечности конструкций из ячеистого бетона. Теплотехнические исследования ячеистых бетонов проводились К.Ф. Фокиным [43], Б.Н. Кауфманом [26], А.Ф. Чудновским [44] и др. Все эти и другие исследовательские работы способствовали дальнейшему росту производства и применения ячеистого бетона в строительстве.

Большой вклад в исследования газобетонов внесли НИПСиликатобетон (Таллинн), Научно-исследовательский институт бетона и железобетона (НИИЖБ). Во многих научных учреждениях в других городах страны (Вильнюс, Киев, Минск, Челябинск и др.) велись систематические изыскания новых способов совершенствования производства, улучшения свойств, расширения областей применения

ячеистых бетонов. Аналогичные работы выполняли и ведут в настоящее время кафедры инженерно-строительных институтов в Воронеже, Санкт-Петербурге, Москве, Новосибирске, Пензе, Ростове-на-Дону, Белгороде.

Все эти исследования касались отдельных частей и процессов технологии автоклавных материалов и до настоящего времени нет системного теоретического обоснования, поэтому, П.И. Боженков в своей книге «Технология автоклавных материалов» [4] писал, что «создание стройной объективной теории и на ее базе управляемой технологии автоклавных материалов еще ждет своего исследователя».

## **1.2 Практика производства автоклавных газосиликатов**

Производство ячеистых бетонов в зарубежной практике значительно расширилось в послевоенный период. Так, в Швеции в 1945 г. объемы производства стеновых блоков и армированных элементов из ячеистого бетона превысили довоенный уровень, а в 1947 г. на 9 заводах объем выпуска изделий составил 885 тыс м<sup>3</sup>, и около 25% всех ограждающих конструкций, производимых в Швеции. После 1947 г. отмечается постоянный рост производства изделий из ячеистого бетона. В 1964 г. объем производства армированных газобетонных конструкций составил 1,5 млн м<sup>3</sup>, что позволило покрыть 50% потребностей в стеновых конструкциях страны. ФРГ была следующей страной после Швеции и СССР, где производство ячеистых бетонов в послевоенный период стало широко развиваться. В течение нескольких лет там вступили в строй ряд производств по выпуску ячеистого бетона. К 1966 г. выпуск ячеистого бетона в этой стране возрос до 1,2 млн м<sup>3</sup>. Почти половину из этого объема составили армированные стеновые панели и плиты покрытий, остальное – мелкоштучные блоки. В настоящее время в Германии

работают крупнейшие заводы в мире по производству изделий из газобетона [4].

В конце 40-х годов возникает производство пеносиликатных изделий (Москва, Харьков), а в 1953 г. осваивается изготовление крупных строительных деталей из автоклавного пенобетона и пеносиликата на Урале (Березники). В 50-х годах в ряде мест начинают изготавливать газобетон, ранее выпускавшийся только в Риге. С тех пор промышленное производство изделий из ячеистых бетонов развивалось в СССР преимущественно на основе способа газопоризации с применением автоклавной обработки.

В странах СНГ кроме завезенной в 60-е годы польской технологии производили продукцию на технологических линиях, разработанных ведущими отраслевыми институтами Минстроя СССР, в т.ч., НИПСиликатобетона (Таллинн), ВНИИСтром (Москва), Южгипростром (Киев) и др. Силикатный бетон и в настоящее время выпускается на установках Универсал, Бобруйск, Силбетблок, Конрекс и др. [45].

В 1987 г., с принятием Очередной жилищной программы СССР, основным средством ее реализации стала научно–производственно–техническая программа «Система эффективного строительства жилых и общественных зданий из ячеистых бетонов», утвержденная постановлением Госстроя № 157 от 09.08.87 г., сформированная из 6 подпрограмм:

1. организация массового производства комплектных изделий для жилищного и общественного строительства из ячеистых бетонов на базе новейших технологий;
2. организация изготовления комплектного оборудования для заводов нового поколения по производству ячеистых бетонов мощностью 150 – 200 тыс. м<sup>3</sup> в год;
3. развитие мощностей по производству извести для полного удовлетворения потребности выпуска ячеистых бетонов;

4. система эффективных проектных решений жилых домов и объектов социальной сферы, образующих градостроительные комплексы из ячеистых бетонов;

5. разработка комплексных проектно-технологических решений зданий и их элементов из ячеистого бетона;

6. экспериментальное и головное проектирование и строительство градостроительных комплексов из ячеистых бетонов.

Принятая программа предполагала строительство около 250 новых заводов автоклавного ячеистого бетона с доведением его общего выпуска к 1995 году до 40 – 45 млн м<sup>3</sup> в год.

Важной задачей в этот период объявлено снижение средней плотности выпускаемой в стране продукции: «При снижении объемной массы ячеистого бетона можно минимизировать толщину стен и снизить расход материала на 1 м<sup>2</sup> общей площади, что эквивалентно росту производства материала. Так, снижением плотности с 600 кг/м<sup>3</sup> до 300 кг/м<sup>3</sup> толщину стены можно уменьшить вдвое, а расход материалов – в 4 раза», «Таким образом, 7-кратное увеличение производства ячеистых бетонов в нашей стране следует сопровождать двукратным снижением их объемной массы ...» [46].

Все эти планы не были воплощены в жизнь. Так, планируемый рост производства автоклавных изделий с 6 до 40 млн м<sup>3</sup> обернулся падением до уровня 3,5 млн м<sup>3</sup>. Закупленное в конце 80-х с правом копирования оборудование фирмы Ytong было смонтировано в Самаре уже в постсоветское время, и выпуск блоков из автоклавного бетона на нем был начат только в 1995 г. Практически параллельно с монтажом закупленного у Ytong в СССР было построено несколько заводов по выпуску изделий из автоклавного газобетона на оборудовании фирмы Hebel. В то же время был введен в строй завод на оборудовании Ytong. Заводы на импортном оборудовании, запущенные в 1994–97 годах, обеспечили появление на российском строительном рынке более 0,5 млн м<sup>3</sup> газобетонных блоков с

высокой точностью геометрических размеров, позволяющих вести кладку на тонкослойных клеевых растворах. Такая продукция существенно повлияла на конструктивные решения зданий с монолитным каркасом. Изменения инвестиционного климата после 1998 г. и последовавший спрос на жилье, а также общий рост объемов строительства, привели к увеличению объемов инвестиций в промышленность строительных материалов, что повлекло расширение производства автоклавного газобетона [2].

### **1.3 Проблемы исследования и развития производства автоклавных ячеистых бетонов**

В мировой строительной отрасли в настоящее время сохраняется устойчивая тенденция увеличения производства ячеистых бетонов автоклавного твердения. Во многих странах уже построено и эксплуатируется более 250 заводов по производству автоклавного газобетона. Годовой выпуск ячеистых бетонов в мире составляет уже более 50 млн м<sup>3</sup>, основной их объем выпускается по технологиям: Хебель, Итонг, Маза-Хенке, Верхан (Германия), Сипорекс (Швеция), Дюрокс – Калсилоркс (Нидерланды), Селкон (Дания, Великобритания), Униполь (Польша).

Если к концу 80-х кладка на клею практически отсутствовала, то к концу 90-х на строительных объектах Москвы, Петербурга, Новосибирска и ряда других городов кладка газобетонных блоков на клей стала принимать характер нормы.

В это время возвращается в повестку дня вопрос о нормативных характеристиках конструкций из ячеистых бетонов. Появляются публикации о фактическом значении равновесной влажности ячеистых бетонов в конструкциях наружных ограждений на уровне 4 – 6 % [47, 48], этот же вопрос по инициативе НИИЖБ обсуждается в Госстрое, где

принимается решение о возможности выдачи разъяснительных писем о расчетных значениях влажности и коэффициентов теплопроводности, предоставляемых по запросам конкретных заводов.

В 2001 году на основании отчета «Определение теплотехнических характеристик ячеистого бетона», выполненном НИИСФ РААСН, а также на основании отдельных испытаний НИИЖБ в разряд конструкционно-теплоизоляционных включаются бетоны марок по средней плотности D 350 и D 400, но только для конкретных производителей. Продолжающийся ввод в строй новых заводов приводит к качественному изменению ситуации. «Теплит», «ЭКО», «Аэрок», «Сибит» и ряд ранее запущенных заводов инициируют программу по пересмотру ГОСТ 25485-89 и 21520-89 в части автоклавных ячеистых бетонов. В 2007 году вышли в свет ГОСТ 31359-2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия» и ГОСТ 31360-2007 «Изделия стеновые неармированные из бетонов ячеистых автоклавного твердения. Технические условия», которые были приняты и введены в действие на территории России в качестве национальных стандартов [49]. В них были устранены ограничения, введенные по принципу «от достигнутого», упорядочены разграничения бетонов по видам, табличные требования заменены параметрическими рядами, произведена унификация требований к материалам и определен перечень показателей качества бетонов и изделий из них [50].

Усилиями специалистов нескольких предприятий создано некоммерческое партнерство «Национальная Ассоциация производителей автоклавного газобетона», которое в настоящий момент объединяет четырнадцать производственных структур с суммарной производительностью более 4,5 млн м<sup>3</sup> в год, что составляет более 40% от общего объема установленных мощностей по производству АЯБ в России [51]. Помимо нормотворчества Ассоциация ведет просветительскую деятельность и способствует обмену опытом между предприятиями в вопросах производства, стратегии взаимодействия с поставщиками и

практики применения готовой продукции. В работе конференций НААГ принимала участие и автор настоящей диссертационной работы [52].

В последнее десятилетие интерес к вопросам теоретического обоснования ячеистых бетонов сильно возрос. Этим занимаются уже признанные Московская [47, 53 – 56], Воронежская [57 – 60], Санкт-Петербургская [61, 62], Пензенская [63], Новосибирская [64], Белгородская [65 – 68] школы. Как и прежде, пионерами по разработке теоретических основ производства ячеистых бетонов являются Эстонские ученые и специалисты [69]. Серьезная попытка объединения теоретических основ производства газобетонов по новым технологиям была предпринята Н.П. Сажневым и Н. Шелегом [42] (республика Беларусь), большой вклад в разработку методик исследований ячеистой структуры бетонов внес В.А. Мартыненко [70, 71], Я.Б. Якимечко [72] и другие украинские ученые. В республике Узбекистан Р.А. Рахимов [73] занимается адаптацией технологий производства газобетносиликата к местным условиям. В Германии в последнем десятилетии известны многие ученые, занимающиеся исследованиями по газобетонным изделиям, в том числе Kotzan Olaf [74], В. Walk-Lauffer [75], Georg Schober [76].

По вопросу теории и производства газобетносиликатов в последние годы защищены диссертации на соискание степеней кандидатов и докторов наук [77 – 79], проводится большое количество научных конференций с выпуском сборников научных и практических статей [80 – 92].

#### **1.4 Перспективы производства и применения автоклавных газосиликатов**

В настоящий момент в России действуют почти 60 заводов по производству автоклавного газобетона. Строится и готовится к запуску 14 заводов. Суммарная установленная мощность всех предприятий составляет



более 10 млн м<sup>3</sup> в год. Суммарная, с учетом заявленной к пуску, мощность в 2013 году должна составить до 14 млн м<sup>3</sup>.

В настоящий момент уже около 90% газобетона в России производится на современном оборудовании, позволяющем обеспечивать высокую точность геометрических размеров и добиваться высокой прочности при низких значениях средней плотности.

Перспективы производства автоклавного газобетона в России тесно связаны с общими тенденциями экономического развития нашей страны и с направлением развития структуры ЖКХ и тарифной политики в области энергетики. Доля применения газобетона в строительстве в последнее десятилетие неуклонно росла, но удельное его применение различается по регионам. Так, в Санкт–Петербурге расходуется около 0,2 м<sup>3</sup> газобетона на 1 м<sup>2</sup> вводимого жилья, а в отдельных областях центрального Нечерноземья – менее 0,05 м<sup>3</sup>. Таким образом, потенциал для роста потребления газобетона в России достаточно велик.

В последнее десятилетие произошел всплеск строительства индивидуального жилья коттеджного типа и малоэтажных домов. Динамика объемов спроса на газобетон в малоэтажном строительстве приведена на рис. 1.1 из [93]. Для улучшения их энергоэффективности в настоящее время уже начинается деятельность по выпуску крупноразмерных армированных ограждающих конструкций зданий: стеновых панелей, плит перекрытий и покрытий, а так же большого количества разнообразных мелкоштучных изделий, в том числе ступеней лестниц из ячеистых бетонов автоклавного твердения. В республике Беларусь самые прогрессивные предприятия уже начали выпускать первые конструкции "газобетонного комплекта" [94].

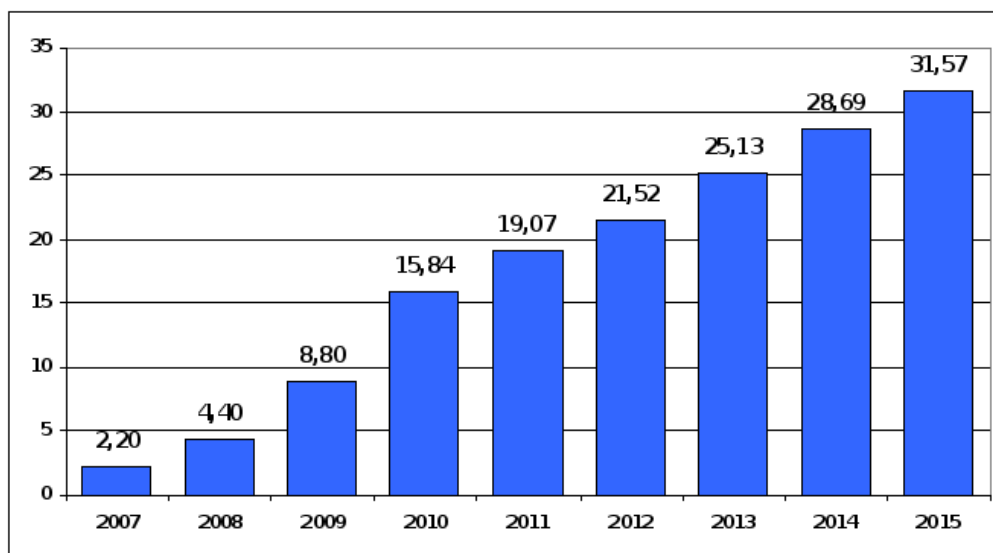


Рис. 1.1 – Динамика объемов спроса на газобетон в малоэтажном строительстве в 2007-2015 гг., в млн. куб.м. (по оценке АКПР)

Естественным шагом по дальнейшему расширению области применения газобетона станет разработка конструктивных систем зданий средней этажности, для чего необходимо изучение опыта проектировщиков и строителей Германии, где уже не одно десятилетие успешно строят дома со стенами и перекрытиями из газобетона высотой до 7 этажей включительно. Такие дома могут быть решены как в традиционной стеновой системе с наружными и внутренними несущими стенами, так и в системе с неполным каркасом. Неполный каркас как нельзя лучше подходит для возведения ширококорпусных зданий и используется при строительстве жилья улучшенной планировки, когда недостаточно размеров, определяемых пролетом плит перекрытия из газобетона.

Другим перспективным направлением применения газобетонных изделий является применение ячеистых панелей в каркасном домостроении. Развитие в последние годы строительства каркасных жилых домов нового поколения выдвинуло на первый план достаточно острую проблему выбора материала и конструкций для наружных стен.

Динамика объемов спроса на газобетон в монолитном строительстве России в 2007 – 2015 г. приведена на рис. 1.2.

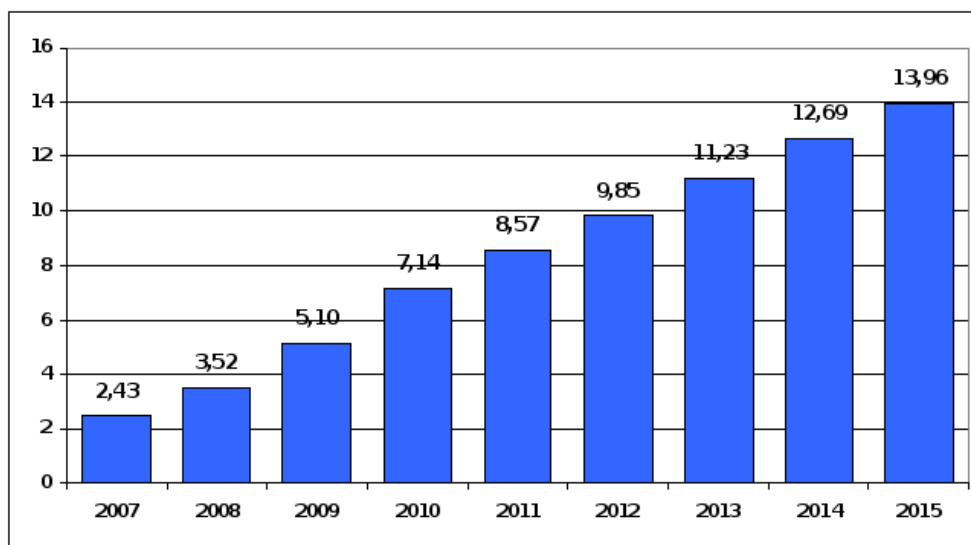


Рис. 1.2 – Динамика объемов спроса на газобетон в монолитном строительстве в 2007-2015 гг., в млн. м<sup>3</sup> (по оценке АКПР [93])

Но не только в качестве конструкционного материала применяют сегодня газобетон строители. Низкая теплопроводность при достаточно высокой механической прочности обусловили возможность использования этого материала для утепления наружных стен.

Сегодня, несмотря на достигнутые успехи, необходимо продолжать исследования, конечной целью которых является создание полного комплекта документов для проектирования зданий и их отдельных частей из газобетона. Этим в настоящее время очень интенсивно занимается НААГ. Кроме того, проводятся исследования по проектированию и использованию ячеистых бетонов в качестве огнестойких преград в зданиях, при возведении зданий в сейсмических районах и др. [94] и все это при максимальном снижении средней плотности и максимально высокой средней прочности и долговечности.

### **Выводы по главе 1.**

1. Производство автоклавных газобетонных изделий растет значительно быстрее, чем выпуск других изделий, для возведения

ограждающих конструкций зданий. Это связано с их большой потребностью в свете повышения энергоэффективности и энергосбережения, объявленных приоритетным направлением развития науки, техники и технологии.

В промышленно развитых странах, а так же в республике Беларусь и Казахстане в балансе строительных материалов для ограждающих конструкций их выпуск составляет 80 – 90 %, что является ориентиром для Российской Федерации.

В связи с этим, создание научно-технической базы этого производства, теоретическое обоснование методов регулирования технологии является чрезвычайно актуальным.

2. Газосиликат в России выпускается достаточно давно. Много ученых занималось исследованиями в этой области, но их разработки касались в основном относительно высоких плотностей  $D 700 - D 1200$ . Такие бетоны сегодня не удовлетворяют современным тенденциям в строительстве и требованиям по теплоизоляции ограждающих конструкций зданий, для возведения которых в основном они и предусмотрены.

3. Ввиду отсутствия отечественных, в настоящее время осуществляется закупка импортных технологий производства ячеистых бетонов автоклавного твердения, но их научно-техническая база является собственностью фирм-производителей этих технологий и нам не доступна, поэтому в рамках настоящей диссертационной работы была поставлена цель теоретического обоснования технологий производства современных конструкционно-теплоизоляционных материалов из ячеистых бетонов автоклавного твердения и сформулированы задачи исследования.

## **2 Обоснование выбора сырьевых материалов для газосиликата**

Выбор качественных сырьевых компонентов обеспечивает уникальные эксплуатационные свойства газобетонных блоков. Как известно, в Российской Федерации рынок сырьевых материалов очень богат, но несовершенен. Из большого количества предприятий, занимающихся добычей и поставками сырья заводам-производителям строительных материалов, изделий и конструкций, стабильность качества сырьевых компонентов могут гарантировать лишь единицы. Поэтому правильный выбор сырья, а также разработки, связанные с регулированием и стабилизацией его свойств с целью расширения сырьевой базы для производства эффективных конструкционно-теплоизоляционных изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения для ограждающих конструкций зданий представляется в настоящее время весьма актуальной задачей.

Результаты анализа нормативной литературы и наших исследований показывают, что большинство стандартов и технологических инструкций не учитывают специфику производства газосиликата на современных высокопроизводительных полуавтоматических технологических комплексах.

С учетом изложенного в настоящем исследовании проведены работы по каждому из видов сырьевых компонентов, получены результаты и разработаны рекомендации.

### **2.1 Вяжущие**

Главные компоненты ячеистых бетонов – вяжущие материалы.

При изготовлении ячеистых бетонов автоклавного твердения могут использоваться следующие вяжущие вещества: портландцемент, известь негашеная кальциевая, шлак доменный гранулированный, зола от сжигания горючего сланца и некоторых видов бурых углей.

В диссертационном исследовании рассматриваются два первых из выше названных видов вяжущих, как наиболее часто применяющихся при изготовлении газосиликатов.

### 2.1.1 Портландцементы

Портландцемент, используемый для производства газобетонных изделий, должен соответствовать требованиям ГОСТ 10178 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические требования» и ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Лабораторные и производственные исследования в рамках данной работы в основном проводились на базе трех предприятий по выпуску газосиликатных изделий, при этом были использованы портландцементы трех производителей цемента: ООО «Топкинский цемент», ОАО «Холсим (Рус) СМ» и ООО «Себряковский цементный завод».

Химический и минералогический состав клинкеров портландцементов приведен в табл 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Средний химический состав портландцементов, применяемых в исследованиях

Наименование цемента	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+ +K <sub>2</sub> O	CaO <sub>св</sub>	СГ	ппп
Топкинский цемент	20,39	5,1	4,23	62,7	1,8	2,95	0,88	0,33	0,01	1,88
Холсим (Рус) СМ	22,0	5,0	3,5	61,0	2,5	2,2	0,5	–	0,01	0,2
Себряковский цемент	22,0	6,0	4,5	64,5	1,6	2,5	0,65	–	0,02	1,0

Таблица 2.2 – Расчетный минералогический состав цементного клинкера

Наименование цемента	Содержание минералов, %			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Топкинский цемент	62,9	13,86	7,07	13,16
Холсим (Рус) СМ	61	12	7,5	11,5
Себряковский цемент	60,8	14,4	8,2	13,6

Исследованиями роли цементов в армированных пеносиликатных бетонах занимались М.Н. Гензлер, М.И. Иванов, Н.Н. Лессинг [24, 36], И.Т. Кудряшов [27 – 30]. В результате проведенных ими работ был получен автоклавный пенобетон на портландцементе и молотом песке.

Г.Ф. Суворова [95] установила, что для каждого минералогического состава цемента существует оптимальное значение давления автоклавирования, при котором получаются наилучшие физико-механические показатели. Результаты испытаний, выполненных швейцарскими учеными, подтвердили результаты исследований Г.Ф. Суворовой [95]. Ими установлено, что прочность автоклавного камня зависит не от марки цемента по прочности при сжатии, а от его минералогического состава, тонкости помола, состава его сырьевой смеси и режима автоклавной обработки. До настоящего времени ни одно из этих требований к цементам для производства газобетоносиликатов не предъявляются.

В настоящее время исследований по влиянию цементов на свойства ячеистых автоклавных бетонов проводится мало, так как существует мнение о том, что оно несущественно [4, 96]. По этому поводу в научных журналах публикации появляются очень редко [97]. Считается, что с цементом в автоклавных газобетонах нет проблем. Но это не так.

Например, анализ результатов большого количества производственных испытаний, проведенных автором, показал, что в зависимости от вида и качества применяемого портландцемента могут в корне изменяться все главные физико-механические показатели газосиликатов. Нами установлено, что бетон, полученный на основе чистоклинкерного портландцемента, имеет более низкие основные физико-механические характеристики, чем на цементе с добавкой шлаков (рис. 2.1).

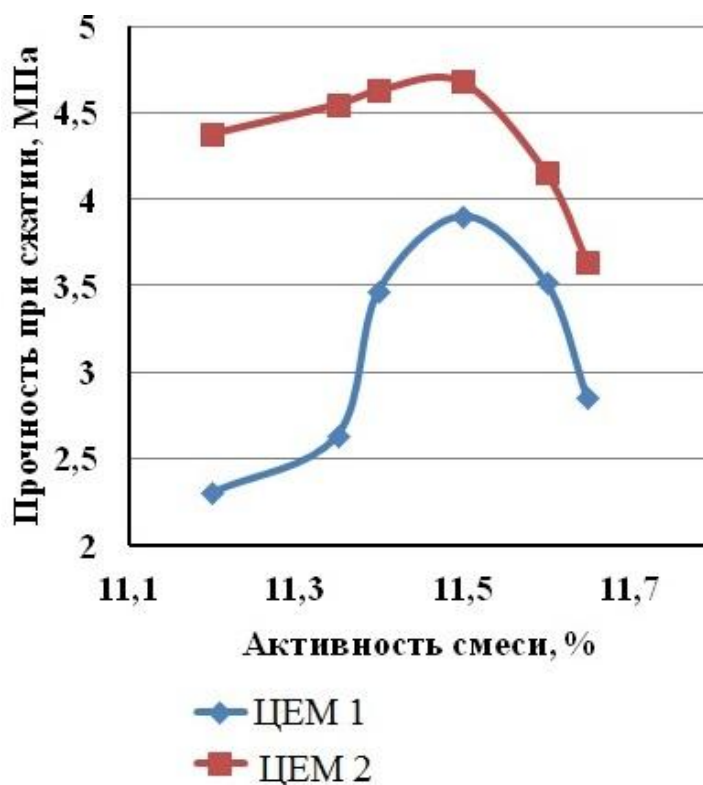


Рис. 2.1 – Зависимость прочности газобетонов от активности заливочной смеси на различных цементах

Приведенные на рис. 2.1 экспериментальные данные показывают, что при добавлении к сырьевой смеси чистоклинкерных портландцементов наблюдается ярко выраженный максимум прочности при активности смеси 11,5%, тогда как использование портландцемента с минеральными добавками наблюдается пологая зависимость между указанными показателями, при этом в интервале активностей 11,1 – 11,5 % механическая прочность изделий находится практически на одном и том же уровне. Из этих данных следует важный практический вывод, что при использовании в составе заливочных смесей ЦЕМ II механические свойства материала в меньшей степени зависят от активности сырьевой смеси. Рекомендовано при использовании в качестве цементной составляющей ЦЕМ II уменьшать основность смеси на 0,5 %.

Автором установлено также, что:

– основным фактором, влияющим на качество заливочной смеси и конечного продукта является содержание в ней CaO, поэтому кроме



известных требований к составу и свойствам цементной составляющей газобетонной смеси предлагается ввести показатель – активность цемента по СаО. Данный термин рекомендуется к использованию ввиду его общности с соответствующей характеристикой извести. Названный показатель чрезвычайно важен, так как он обязательно должен учитываться при проектировании сырьевых смесей. Это установлено и подтверждено многочисленными производственными экспериментами (формула 4.6).

– Для обеспечения стабильности качества выпускаемых изделий на предприятиях целесообразно нормировать минеральный состав клинкера используемого портландцемента. Это позволит избежать нештатных ситуаций при применении портландцементов различных поставщиков, особенно зарубежных, что в последнее время практикуется все шире.

Перечень основных требований к портландцементам, предлагаемых автором, приведен в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Предложения по требованиям к портландцементу как к компоненту газосиликата

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм	Норматив	
			минимум	максимум
1	2	3	4	5
1	Тип цемента		ЦЕМ I, ЦЕМ II	
2	Класс по прочности		Не ниже 42,5	
3	Удельная поверхность по Блейну	м <sup>2</sup> /кг	330	395
4	Начало схватывания	мин	80	120
5	Конец схватывания	мин	140	180
6	Нормальная густота цементного теста	%	25	28
7	Активность по СаО (содержание СаО)	%	58	68

1	2	3	4	5
8	CaO <sub>своб</sub>	%		Не более 3
9	Содержание MgO	%		Не более 5
10	SO <sub>3</sub>	%		Не более 3,5
11	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	%		Не более 1
12	Клинкерные минералы			
12.1	C <sub>3</sub> S	%	Не менее 50	
12.2	C <sub>2</sub> S	%		Не более 25
12.3	C <sub>3</sub> A	%	7	10
12.4	C <sub>4</sub> AF	%	10	15

Результаты приведенных исследований, а также практика производства ячеистых бетонов автоклавного твердения показывают, что при применении портландцемента с минеральными добавками шлака ПЦ 42,5–Д20 или ЦЕМ II можно получать бетоны высокого класса по прочности при сжатии. В связи с этим, предлагается расширить номенклатуру применяемых в производстве газобетонов портландцементов, разрешив применение цементов с добавлением шлака. Это позволяет повысить основные физико-механические показатели и значительно снизить себестоимость выпускаемой продукции.

### 2.1.2 Известь

Известь негашеная кальциевая является основным вяжущим, отличающим автоклавные ячеистые материалы от всех остальных. Применяемые в газосиликатах известь должна соответствовать требованиям ГОСТ 9179 [98] и СН 277 [99]. Из комовой извести на предприятиях по производству газосиликата обычно изготавливают известково-кремнеземистое вяжущее (ИКВ).

Известь в производстве газосиликатов в Российской Федерации является наиболее проблемным вяжущим, так как заводы по производству извести, как правило, построены в послевоенные годы, поэтому технология и, соответственно, оборудование, на котором осуществляется выпуск извести, давно устарели и нуждаются в модернизации или замене.

Таким образом, качество извести, поставляемой на предприятия по производству газобетонных изделий нестабильно.

Исследования по известковым вяжущим проводятся постоянно. Это стало особенно актуальным после появления новых технологий производства автоклавных ячеистых бетонов. На всех конференциях, проводимых по теме ячеистых бетонов, обязательно рассматриваются вопросы улучшения качества известковых вяжущих. В отечественной научной литературе также имеется много публикаций по данному вопросу, в том числе [72, 100 – 104].

В диссертационном исследовании использованы извести трех предприятий:

– ОАО «Угловский известковый комбинат», п. Угловка Новгородской обл.

– ООО «Фельс Известь», пгт. Товарково Калужской обл.;

– ООО «Придонхимстрой Известь», г. Россошь, Воронежской обл.

Их основные характеристики приведены в паспортах качества (приложение А).

Наиболее важной в настоящее время для предприятий производителей автоклавного газобетона является проблема гашения извести, т.к. известей со временем гашения 8 – 15 мин (данное требование установлено предприятиями–поставщиками технологического оборудования) в России очень мало. В Центральных районах Российской Федерации распространены меловые извести, которые гасятся в течение 1,5 – 3 мин, с которыми, без применения добавки гипса работать очень сложно. Восточные части России, напротив, страдают от медленно гасящихся и низкотемпературных известей, которые значительно снижают производительность предприятий – производителей газосиликата. Этому вопросу в настоящей работе уделено особое внимание.

Мы исходили из следующих теоретических предпосылок (рабочей гипотезы). Лимитирующей стадией гидратации портландцемента, гипса,

известии и т.п. является отвод продуктов гидратации из зоны химической реакции вяжущего с водой в жидкую фазу. Добавки, которые повышают емкость жидкой фазы по ионам  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  увеличивают скорость гашения известии. Добавки же водорастворимых электролитов, которые оказывают обратное действие, т.е. образуют с ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  малорастворимые соединения, уменьшают скорость гашения известии. Исходя из этого, предлагается группа добавок-электролитов, замедляющих гашение высокоактивных известий.

Для проверки эффективности одной из таких добавок на базе лаборатории предприятия по выпуску блоков из ячеистых бетонов автоклавного твердения ООО «Егорьевский завод строительных материалов», Московской обл. были выполнены эксперименты. Т.к. полученные результаты представляют коммерческую ценность, в работе приводятся условные названия добавок. Добавка – замедлитель условно названа З-1. Ее исследования проводились на трех видах молотой известии: Угловского известкового комбината, Фельс-известии и известии Придонхимстрой.

Добавка З-1 была приготовлена в виде 1 %-ного водного раствора. Эксперимент проводился по следующей методике, предлагаемой автором для внедрения на всех предприятиях.

В бытовой термос, емкостью 500 мл наливалась дистиллированная вода, туда же вводили определенное количество приготовленного раствора добавки З-1. Суммарное количество раствора с добавкой составляло 125 мл. После тщательного перемешивания раствора в него добавляли 25 г известии. Компоненты быстро перемешивались деревянной палочкой, крышка термоса герметично закрывалась и ртутным или электронным термометром, каждые 30 сек, производились замеры температуры гашения известии.

Во всех случаях подбиралась дозировка добавки, замедляющая гашение извести на 1,5 – 2 мин. Практически во всех известных случаях, этого оказывается достаточно, для стабилизации работы с любой известью.

Результаты проведенных экспериментов в виде графиков представлены на рис. 2.1 – 2.3.

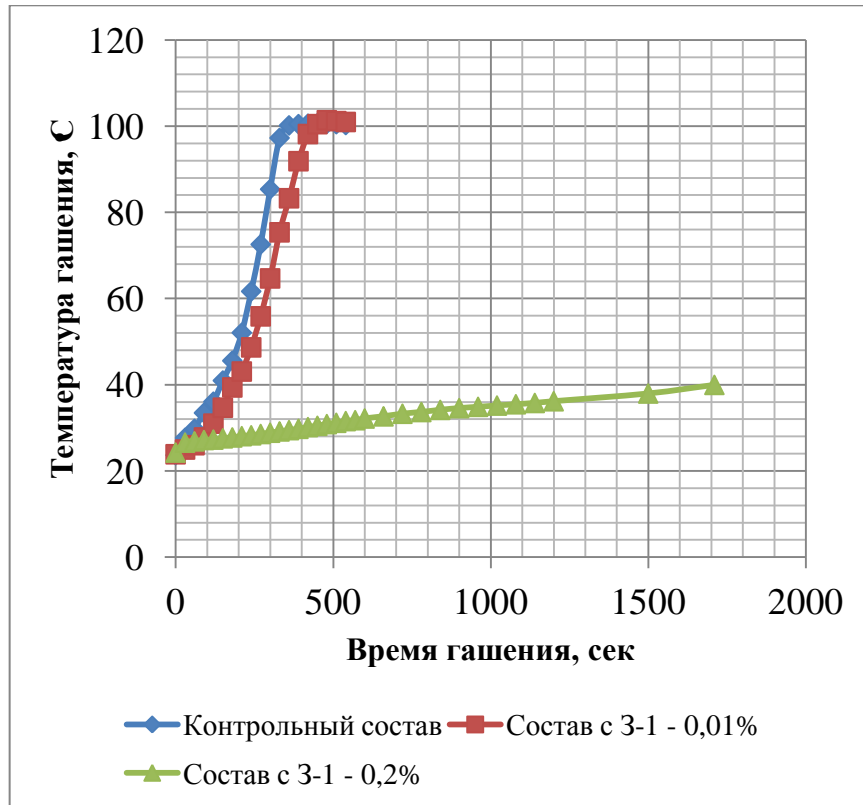


Рис. 2.1 – Графики действия замедляющей добавки на извести Угловского месторождения

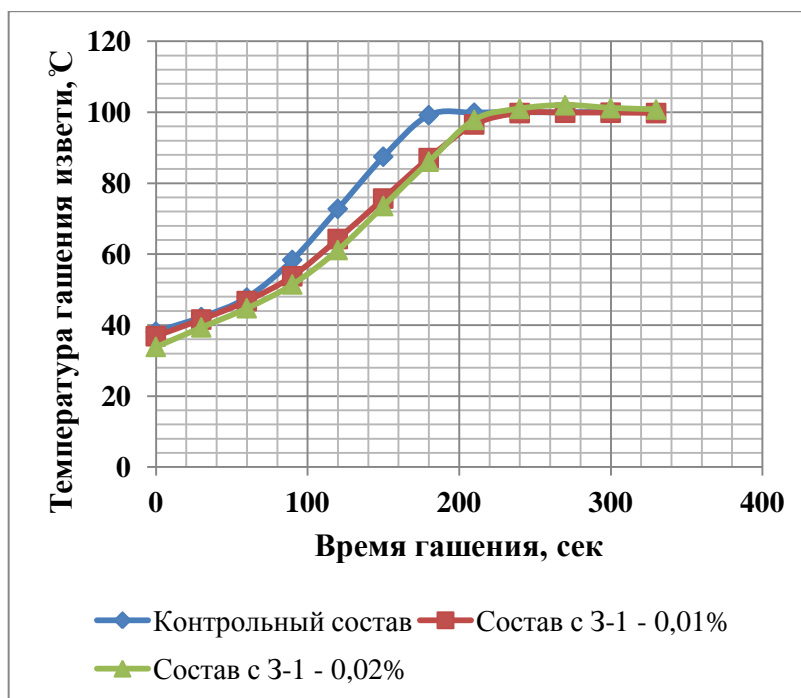


Рис. 2.2 – Кривые результатов испытания замедляющей добавки на извести производства Фельс

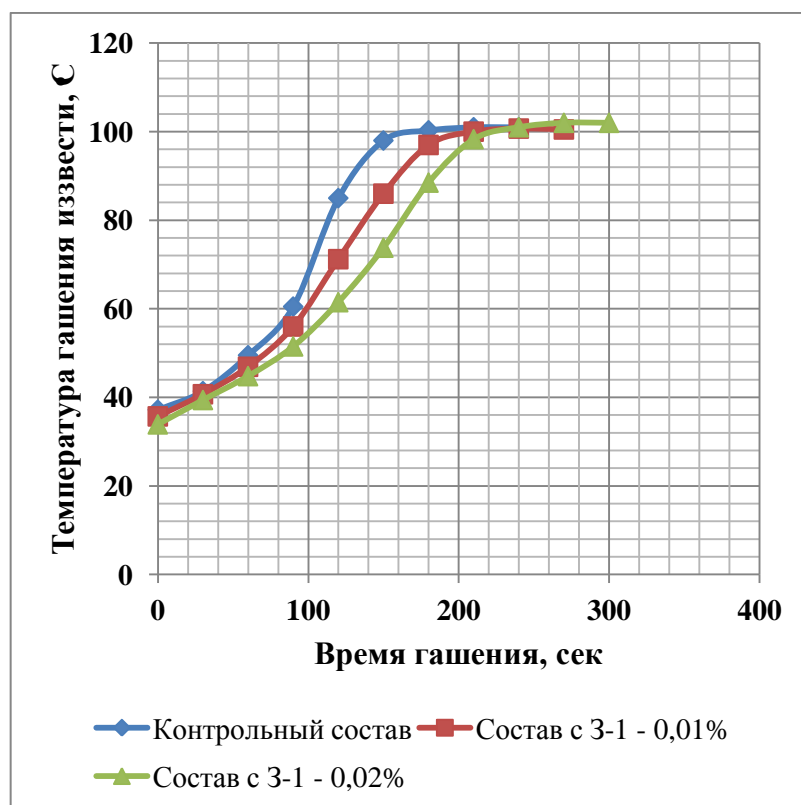


Рис. 2.3 – Графики результатов испытания замедляющей добавки на извести производства Россошанского завода

В результате проведенных экспериментов, установлены рабочие дозировки добавки, приемлемые для применения с различными известями. Установлено так же, что добавка не оказывает отрицательного влияния на технологию производства и эксплуатационные свойства изделий, при этом ее дозировка равна 0,01 – 0,05%. Побочным положительным эффектом действия испытанной добавки явилось «выбеливание» поверхности изделий.

Как известно, поверхность свежих массивов, в зависимости от времени их нахождения на предавтоклавных путях меняет цвет, приобретая оттенок: от желтоватого до бурого. Цвет становится темнее, чем дольше массивы находятся на открытом воздухе. Происходит это, на наш взгляд, от степени окисления железа, находящегося в составе бетона. Высокие влажность и температура, в сочетании с  $\text{CO}_2$  воздуха, способствуют этому процессу. Предложенная в диссертационном исследовании добавка, химически связывает железо, что, в свою очередь, препятствует изменению цвета поверхности массивов.

В табл. 2.4 автором сформулированы основные требования к известям, применяемым для изготовления газосиликатных смесей.

Таблица 2.4 – Требования к извести для газобетона

Физико-химические показатели	Ед. изм.	Требования	
		ГОСТ 9179	предлагаемые автором
Время гашения	мин	не более 25 мин	5-8
Температура гашения, не менее	°С	-	80
Содержание активных $\text{CaO}+\text{MgO}$ , не менее	%	80	80
Содержание активного $\text{MgO}$ , не более	%	5	2
Непогасившиеся зерна, не более	%	11	7
Пережог, не более	%	-	2
Содержание $\text{SO}_3$ , менее	%	-	1
Содержание $\text{SiO}_2$ , менее	%	-	5
Содержание $\text{K}_2\text{O}+\text{N}_2\text{O}$ , менее	%	-	1,5
Содержание $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ , менее	%	-	2,5

Таким образом, применение в производстве автоклавных ячеистых бетонов предложенных добавок полностью снимает проблему быстрогасящихся известей, повышая при этом качество выпускаемой продукции, снижая себестоимость и значительно расширяя сырьевую базу силикатной промышленности.

### **2.1.3 Гипс**

Для регулирования структурообразования, нарастания пластической прочности, ускорения твердения газосиликатов часто используют гипсовый камень по ГОСТ 4013 [105] или гипс по ГОСТ 125 [106]. В газобетонных составах гипс используется не как вяжущее, а как добавка, однако при добавлении гипса можно снизить расход основных вяжущих.

На основании проведенных и описанных в главах 4 и 5 диссертационного исследования, установлено двоякое действие гипса на технические и эксплуатационные свойства газобетонов. Рекомендовано, ограничить его количество в смеси до 5 – 7 % при литьевом производстве и 2,5 % – на ударной технологии.

## **2.2 Кремнеземистый компонент**

Одним из важнейших технологических переделов автоклавных технологий является измельчение и активация сырьевых материалов, обеспечивающих большую поверхность зерен и большое количество контактов, что необходимо для ускорения и полноты прохождения химических реакций, так как приводит к увеличению количества гидратных фаз – новообразований – основных носителей прочности строительных материалов.

Самым сложным практически во всех регионах России является поиск кремнеземистого компонента, пригодного для производства ячеистых бетонов автоклавного твердения. Песок является самым



дешевым материалом, но его расход в смеси всегда наибольший, а, следовательно, он вносит значительный вклад в себестоимость продукции. При его выборе необходимо учитывать состав и свойства новообразований, получающихся после автоклавной обработки.

Из трех существующих разновидностей песков по минералогическому составу для автоклавного производства предпочтительнее кварцевые. Они обладают высокой химической активностью взаимодействия с известью.

Исследования в области подбора мелкого заполнителя для плотных силикатных бетонов проводили Куатбаев К.К. [107], изучавший барханные пески Казахстана, Виноградов Б.Н. [7], получивший данные о зависимости прочности силикатных бетонов от минералогического состава мелкого заполнителя. Полученные ими данные приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Влияние минералогического состава песка на прочность автоклавированных изделий

<b>Кремнеземистый компонент</b>	<b>Ед. изм.</b>	<b>Прочность при сжатии</b>
Кварцевый песок (молотый)	МПа	27,6
Полевошпатовый песок (молотый)		32,8
Альбит		27,2
Микроклин		19,9
Каолинитовая глина		16,5

Названные ученые установили, что наименьшую прочность автоклавным материалам обеспечивают ортоклазы, для плагиоклазов она увеличивается, по мере приближения их к анортиту. Полевые шпаты, из-за спайности склонны к выветриванию, а анортит, не содержащий щелочей, обладает улучшенными строительными свойствами. По данным Куатбаева К.К. [107], в полевых шпатах прочность изменяется по убывающей: альбит → микроклин → нефелин.

Причина этой закономерности в литературе не рассмотрена, поэтому, ниже предлагается объяснение данного явления, включая приведенные в табл. 2.4 результаты физико-механических испытаний.

Согласно теории В.С. Соболева [108] кремнекислота ( $H_4SiO_4$ ,  $H_2SiO_3$  и др.) обладает более сильными кислотными свойствами, чем алюминиевая кислота ( $H_3AlO_3$  и  $HAlO_2$ ). В связи с этим, чем больше в минерале содержится кремнекислоты, т.е. чем больше отношение  $SiO_2/Al_2O_3$ , тем активнее, при прочих равных условиях, он реагирует с  $Ca(OH)_2$ . В связи с этим, наиболее активно образование гидросиликатов кальция идет с  $SiO_2$ . По мере частичного замещения ионов кремния ионами алюминия активность их взаимодействия с гидроксидом кальция снижается, поэтому полевошпатовые пески менее активны, чем кварцевые, так как в них на 6 молей  $SiO_2$  приходится 1 моль  $Al_2O_3$ . В нефелинах отношение  $SiO_2/Al_2O_3=1/1$ , поэтому, они по активности уступают первым двум.

Изложенные соображения полностью согласовываются с экспериментальными данными В.А. Авакова и Б.Н. Виноградова [7, 109], результаты которых в табл. 2.4 приведены в зависимости от их растворимости при температуре автоклавирования в жидкой фазе с  $pH = 12,8$ .

В то же время, экспериментальные данные табл. 2.6 не полностью согласуются с изложенной концепцией, считаем, что в табл. 2.6 содержатся уточненные данные, в получении результатов по которым принимал один и тот же автор – Б.Н. Виноградов.

Таблица 2.6 – Сравнительная растворимость природных кремнезема и некоторых алюмосиликатов при температуре 175 °С

Наименование минерала	Концентрация г/л		
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Na_2O$ или $K_2O$
Кварц	2250		
Кристаллит	6900		

Тридимит	8750		
Кварцевое стекло	7500		
Альбит	1100	205	361
Микроклин	1050	190	332
Мусковит	3100	370	313
Биотит	3300	340	287
Каолинит	1251	675	–
Монтмориллонит	1506	300	–

Для полного понимания влияния минералогического состава песков на активность и взаимодействие с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ниже приводятся экспериментальные данные о зависимости прочности цементного камня от объемного содержания в нем гидратных соединений из [110] рис. 2.4.

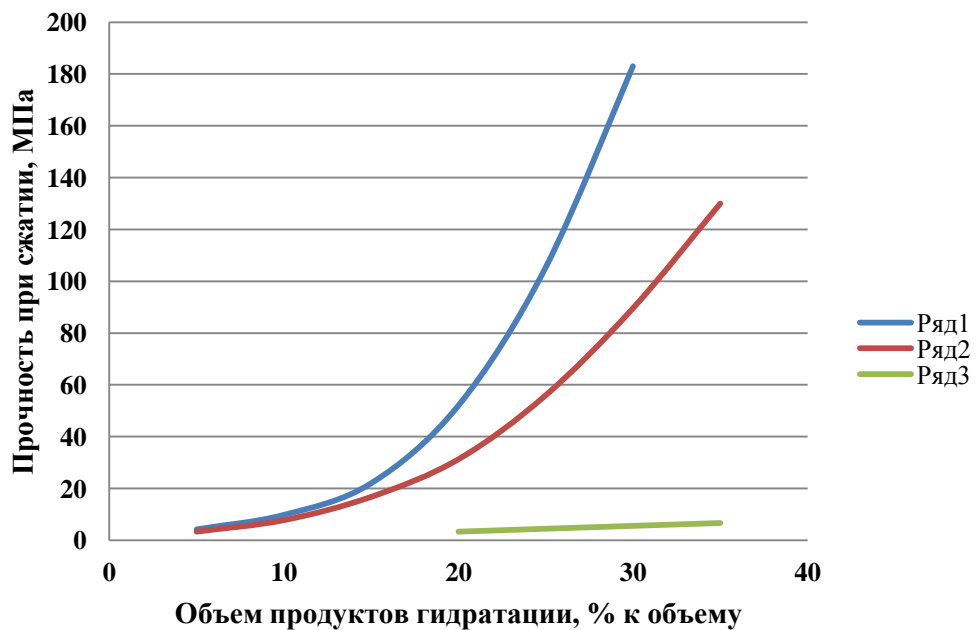


Рис. 2.4 – Связь между прочностью при сжатии и типом связующих продуктов гидратации, образующихся в твердеющей пасте [110]:  
ряд 1 – тоберморитоподобные фазы; ряд 2 –  $\text{C}_2\text{SH}$  (A); ряд 3 –  $\text{CH}$  + фаза гидрогранатов

Изучением влияния карбонатных песков на свойства плотных автоклавных бетонов занимались М.В. Бородянская и П.М. Зильберфарб [111]. Результаты их исследований (табл. 2.7) показывают, что образцы на

карбонатном песке имеют значительно меньшую прочность, в сравнении с образцами на кварцево-полевошпатовом песке.

Таблица 2.7 – Результаты исследований по силикатным бетонам из [111]

Тонкомолотая смесь (ИКВ)		Предел прочности бетона при сжатии МПа, на песках	
активность СаО, %	расход, кг/м <sup>3</sup>	карбонатном	кварцево-полевошпатовом
37,1	430	24,8	49,8
32,1	510	45,7	54,9
27,8	580	52,6	56,5

Такая особенность поведения карбонатных пород в составе сырьевых смесей объясняется тем, что карбонаты Са и Mg при температурах ниже 400 °С совершенно инертны по отношению к кварцевому песку.

Резюмируя изложенное, предлагается ряд сравнительной предпочтительности примесей в кварцевых песках, применяемых для производства силикатных изделий, в том числе – газобетоносилкатов: кварц > полевые шпаты > нефелин > каолинит.

Изложенные теоретические соображения подтверждаются экспериментальными данными по тепловыделению бетонов при автоклавировании, приведенными в гл. 3.

### **Вопросы выбора песка для газосиликата.**

Существует ряд нормативных документов, регламентирующих требования к характеристикам песков, пригодных для производства изделий из ячеистого автоклавного бетона. Так, согласно СН 277 «Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона» [99] при производстве ячеистобетонных изделий следует применять кварцевый песок, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736 «Песок для строительных работ. Технические условия» [112], с содержанием кварца не

менее 85 %, слюды не более 0,5 %, илистых и глинистых примесей (ИГП) не более 3 %, и не более 1 % глинистых примесей типа монтмориллонита. Допускается также применение полевошпатового песка с содержанием кварца не менее 60 %.

Европейские стандарты предъявляют несколько иные требования к сырьевым компонентам, по которым, в качестве кремнеземистого компонента должен применяться кварцевый песок без гравия, глины в комках, солей и органических составляющих. Частиц с размером фракции менее 1,5 мм в нем должно быть не менее 80 %, максимальной фракции – 2,0 мм не должно быть более 20 %. Илистых и глинистых примесей (ИГП) в песке допускается не более 3 %, органических примесей не должно быть более 0,3 %. Требования к химическому составу песка приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Требования к песку, предъявляемые фирмой-поставщиком технологического оборудования

Основные компоненты	Наивысшее содержание, %	Желательное содержание, %
$\text{SiO}_2$	Неограниченно	В среднем 85 %, в том числе кварца $\geq 80$ %
п.п.п.	< 5%	2-3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	18	5-7
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3	0-1
$\text{CaO}$	1,5	Следы
$\text{MgO}$	2	Следы
$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	1,5	Следы
$\text{SO}_4$	3	Следы
$\text{Cl}$	Следы	Следы

Основные исследования автора по данному вопросу, произведены на базе предприятия по производству автоклавных ячеистых бетонов, изготавливаемых по литьевой технологии в ОАО «ГлавБашСтрой», г. Уфа.

В Башкортостане имеется много месторождений песка, в том числе песков для стекольной промышленности. В проведенных исследованиях были проверены различные по генезису и химическому составу пески с целью определения степени их пригодности для изготовления ячеистых бетонов автоклавного твердения.

В качестве вяжущих веществ применялись:

- известь строительная с содержанием  $\text{CaO}+\text{MgO}$  86–90 %,  $\text{MgO}$  0,9–1,0 %,  $\text{CO}_2$  2,3 – 3,0 %, скоростью гашения 8 – 12 мин, температурой гашения 80 – 87 °С, удельной поверхностью 4000 – 5000  $\text{см}^2/\text{г}$ .

- портландцемент типа ЦЕМ I 52,5 со сроками схватывания: начало – 2 ч., конец – 4 ч. и удельной поверхностью 3800 – 4800  $\text{см}^2/\text{г}$ .

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 %.

Газообразователь – алюминиевая паста Российского производства. Вяжущие и газообразователь имели относительно постоянные характеристики качества, поэтому в данном исследовании они фиксированы.

На базе производственной лаборатории были проведены эксперименты, в ходе которых проверены пески Красноусольского, Кабаковского, Архимандритского, Акбердинского, Иглинского и Чесноковского месторождений. Предварительно были проведены испытания на содержание в песках  $\text{SiO}_2$ , а так же илистых и глинистых примесей.

Проверка показала, что пески Акбердинского, Иглинского и Чесноковского месторождений не соответствуют требованиям нормативных документов, так как одни отличаются низким содержанием  $\text{SiO}_2$ , другие – высоким содержанием илистых и глинистых примесей, а чаще сочетают в себе оба эти недостатка. В связи с этим, названные пески к производственным испытаниям не допущены.

Пески Красноусольского, Кабаковского и Архимандритского месторождений по результатам предварительной проверки показали хорошие результаты (табл. 2.9) и были испытаны в производственных условиях. Ниже приведены фотографии песков, принятых к производству работ (рис. 2.5).

Таблица 2.9 – Основные параметры песков, допущенных к производственным испытаниям

Наименование месторождения	Содержание, %				Влажность, %	M <sub>кр.</sub>
	SiO <sub>2</sub> (общий)	ИГП	Глина в комках	Органические примеси		
Красноусольское	90-96	1,1-3,0	0-0,7	темнее эталона	6-11	1,1 - 1,3
Кабаковское	71-85	0,5-2,0	0-0,7	светлее эталона	5-9	1,9 - 2,5
Архимандритское	79-86	1,3-2,5	0-0,6	светлее эталона	6-12	1,2 - 1,4



Рис. 2.5 – Вид песков, допущенных к производственным испытаниям

Из рис. и табл. 2.10 видно, что песок Красноусольского месторождения содержит более 90 % SiO<sub>2</sub> (общий) и состоит преимущественно из кварца (SiO<sub>2</sub> не связанный). К его недостаткам можно отнести повышенное содержание органических примесей (окраска раствора темнее эталона). В лабораторных «Методиках контроля исходных материалов производства газобетонных блоков» фирмы MASA-HENKE описан механизм действия органических составляющих: органические

кислоты нейтрализуют щелочность среды, следствием чего является потеря прочности готовых изделий [113]. В ходе производственных испытаний была выполнена проверка приведенного утверждения.

Пески Кабаковского и Архимандритского месторождений содержат заметно меньшее количество  $\text{SiO}_2$  (общее) и содержание в них кварца является довольно скудным – пески являются полевошпатовыми. Кроме того, замечено, что содержание  $\text{SiO}_2$  в этих песках имеет широкий диапазон и зависит как от глубины залегания песков, так и от их географического положения на карте разработанных месторождений. Органические примеси в них практически отсутствуют. Что же касается гранулометрического состава (табл. 2.10), то пески Кабаковского и Архимандритского месторождений значительно отличаются друг от друга.

Таблица 2.10 – Гранулометрический состав исходных песков

Наименование месторождения	Полные остатки на ситах, %					
	0,16 мм	0,315 мм	0,63 мм	1,25 мм	2,5 мм	5 мм
Красноусольское	94,46	30,72	1,82	0,27	0,12	0
Кабаковское	97,88	81,67	26,26	10,09	3,32	0,025
Архимандритское	96,65	25,15	0,33	0,17	0,06	0

При детальном рассмотрении приведенных данных видно, что составы песков Красноусольского и Архимандритского месторождений схожи и содержат более 69 % фракций < 0,315 мм. В Кабаковском песке фракции распределены так же равномерно, однако в нем большое количество крупных частиц (фракции с размерами частиц выше 0,315 мм составляют более 80 %).



Для ячеистых бетонов автоклавного твердения песок является основным реагентом, принимающим участие в химической реакции гидротермального синтеза, поэтому он предварительно измельчается (активируется) в мельнице мокрого помола и используется в виде песчаного шлама. Процесс измельчения увеличивает поверхность взаимодействия материалов, их реакционную способность, что влияет на интенсивность процессов структурообразования, фазовый и морфологический состав синтезируемых в процессе автоклавной обработки цементирующих новообразований гидросиликатов, качество структуры силикатного камня, межпоровых перегородок.

На величину удельной поверхности при размоле песка влияют следующие факторы:

- размалываемость материала;
- конструкция мельницы;
- частота вращения барабана, зависящая от диаметра мельницы;
- количество и размеры мелющих тел;
- тип бронифутеровки.

Исследуемые пески размалывались в шаровой мельнице до удельной поверхности 2400 – 2600 см<sup>2</sup>/г. Песчаный шлам хранился в двух шламбассейнах, где происходило его усреднение. Все системы шламопроводов были закольцованы, оснащены специальными приборами для автоматического контроля температуры и плотности шлама.

Зерновой состав песков после размолы представлен в табл. 2.11.

Таблица 2.11 – Гранулометрический состав молотых песков

Наименование месторождения	Полные остатки на ситах, %			
	0,045 мм	0,063 мм	0,09 мм	0,125 мм
Красноусольское	36,5	26,4	13,6	7,8
Кабаковское	50,2	40,6	14,6	7,6 остаются недомолотые частицы
Архимандритское	44,3	24,4	14,1	7,7

Из таблицы 2.11 видно, что после помола в песке Кабаковского месторождения наблюдается равномерный зерновой состав с относительно высоким содержанием крупных фракций (более 40 % фракций  $> 0,063$  мм). При этом, несмотря на применение при выгрузке из шламовой мельницы сетки с малыми размерами ячейки, в шламе Кабаковского песка встречаются недомолотые частицы гравия (крупка).

В двух других шламах зерновой состав также относительно равномерен, но крупных фракций значительно меньше (не более 27 % фракций  $> 0,063$  мм).

Основным недостатком любых газобетонных блоков является их повышенная хрупкость. Несмотря на то, что российские стандарты не содержат требований и методов проверки хрупкости готовых изделий из газобетона, в исследовании уделено внимание этому параметру. Оценка хрупкости блоков осуществлялась по количеству сколов граней, получаемых при делении горизонтальных рядов блоков на делителе.

Для сравнения прочности и других характеристик газобетона на основе вышеуказанных песков были изготовлены промышленные партии блоков из бетона марки по средней плотности  $D 500$ . При этом заливочные смеси проектировались одинаковой активности по содержанию  $CaO$ . Все остальные технологические параметры, включая режим автоклавной обработки, оставались постоянными.

Для определения класса бетонов по прочности при сжатии из блоков, изготовленных с применением исследуемых песков, из готовых блоков были вырезаны и испытаны образцы-кубы с ребром 100 мм. Сравнительные гистограммы исследования приведены на рис. 2.10. Результаты испытаний показывают, что на основе всех исследованных песков возможно получение класса бетона по прочности при сжатии В 2,5, однако свойства продукции имеют некоторые отличия.

Образцы из бетона с применением Красноусольского песка, имели среднюю прочность при сжатии – 3,95 МПа. Материал отличался довольно

низкой хрупкостью (из партии 100 м<sup>3</sup> изделий 1 – 2 изделия имели околы боковых граней), все остальные характеристики бетона соответствовали требованиям ГОСТ 31360 [114]. Замечено так же, что в процессе автоклавной обработки на этапе изотермической выдержки изделий с применением Красноусольского песка, фиксируется значительный рост давления, что говорит о значительной экзотермии во время реакции гидротермального синтеза внутри автоклава.

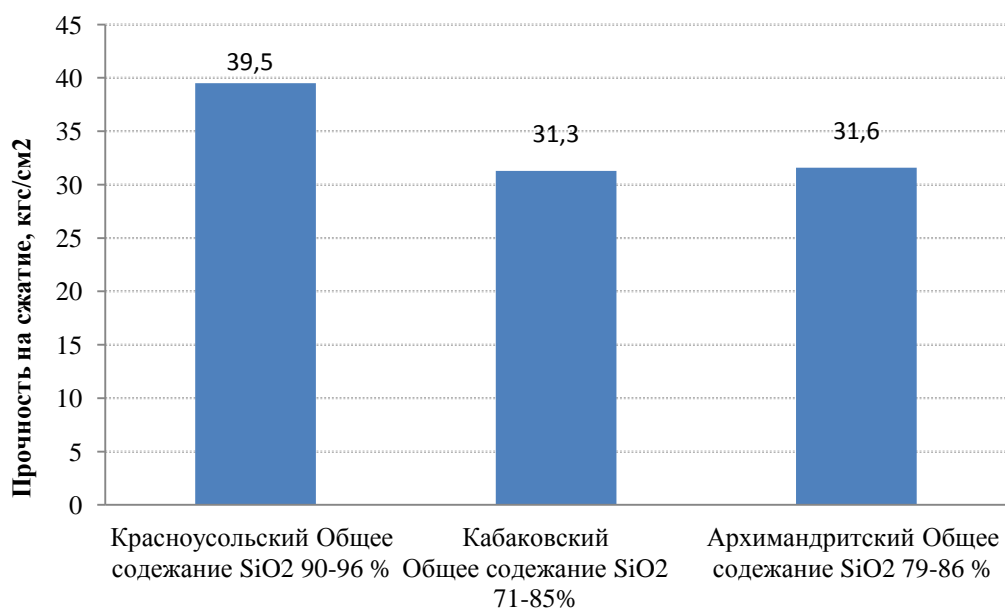


Рис. 2.10 – Зависимость прочности при сжатии газобетона от природы используемого песка

Прочность изделий на Кабаковском и Архимандритском песках составила 3,13 МПа и 3,16 МПа соответственно, при этом значительно увеличилась хрупкость бетона. Так, количество поврежденных на делителе граней блоков, изготовленных на Архимандритском песке, увеличилось до 15 – 20 изделий на 100 м<sup>3</sup> продукции, а на изделиях с применением Кабаковского песка этот показатель вырос в 10 раз. Кроме того, повреждения блоков, из-за их хрупкости наблюдались и в процессе транспортирования, как в технологической цепочке, так и при доставке изделий к потребителю.

Установлено также, что недомолотые частицы гравийной смеси, попав в бетон, нарушают равномерную пористость бетона и целостность межпоровых перегородок газобетоносиликата. Подобный эффект отмечается в книге И.А. Хинта [115].

В ходе промышленных экспериментов были предприняты попытки увеличить удельную поверхность шлама из песка Кабаковского месторождения, за счет регулирования количества подаваемого в мельницу песка. В результате – наблюдалось снижение прочности изделий и слипание горизонтальных и вертикальных рядов блоков в массиве после автоклавной обработки. Кроме того, помол песка подобного зернового состава значительно повышает износ помольного оборудования, что требует дополнительных затрат на профилактическое обслуживание и ремонт мелющего оборудования.

Таким образом, наиболее приемлемым из исследованных песков для производства газобетонных блоков автоклавного твердения является песок Красноусольского месторождения, применение которого в газобетонных смесях позволяет гарантированно производить продукцию высокого качества. Установлено, что наблюдаемая внутри автоклава экзотермическая реакция, происходящая во время изотермической выдержки изделий, позволяет вести процесс при более низких значениях давления, не нарушая протекание CSH-реакций, т.к. ухудшения свойств изделий не выявлено.

Применение песка Архимандритского месторождения, при прочих равных условиях, позволяет получать продукцию заданных свойств с несколько худшими показателями по прочности при сжатии. Повысить прочностные показатели готовых изделий можно, увеличив долю вяжущих материалов в составе смеси или изменением соотношения известь/цемент, что повышает себестоимость продукции.

Изготовление газобетона с применением песков Кабаковского месторождения с неравномерным гранулометрическим составом (включениями крупных частиц – крупки) нецелесообразно.

Поиск качественного кремнеземистого компонента, применение которого было бы экономически и технологически приемлемым, остается в Башкортостане и на сегодняшний день актуальной проблемой.

В результате проведенных и изложенных в 3 главе дальнейших исследований автора, установлено, что применение кварцевого песка в составе газобетонной смеси практически во всех случаях дает экотермический эффект, при этом наблюдается повышение прочности бетонов. При отсутствии такого эффекта, как правило, бетоны не могут достигнуть значений прочностей, установленных для данного класса бетона.

В ряде случаев песчаный компонент силикатных бетонов, в том числе газобетоносилкатов, может содержать до 20% карбонатов кальция и магния.

При решении вопросов о целесообразности использования таких карбонат содержащих пород для производства газобетонов необходимо определить электрокинетический потенциал их карбонатной составляющей, так как в зависимости от места залегания и генезиса в карбонатах могут быть как положительно, так и отрицательно заряженные активные центры.

Если карбонатная порода имеет отрицательный электрокинетический потенциал и на его поверхности преобладают активные центры, имеющие отрицательный знак, то они не желательны как компонент силикатного кирпича и бетонов плотной структуры. Это обусловлено тем, что гидросиликатная связка силикатного кирпича имеет отрицательный заряд, а наличие отрицательно заряженных частиц карбонатов, которые не образуют никаких видов связи с одноименно заряженными стенками

капилляров строительного материала, будет негативно влиять на его физико-механические характеристики.

Если же на поверхности карбонатных частиц преобладает положительный заряд активных центров, то они в структуре силикатного кирпича и бетона будут выполнять структурирующую роль из-за электростатического притяжения элементов связки и карбонатных частиц. Сходные процессы будут происходить и в межпоровых перегородках ячеистого газобетоносилката.

В связи с изложенным, для решения вопроса о возможности применения кремнеземсодержащих пород минералов с высоким содержанием карбонатных частиц, например, барханных песков, необходимо выделить из них карбонатную фракцию и определить ее электрокинетический потенциал.

#### **Ранжирование песков с помощью термодинамического расчета.**

В Российской Федерации есть опыт применения взамен кварцевых, полевошпатовых песков, хотя и отмечается, что они менее активно реагируют с известью, чем кварц.

Полевые шпаты, как известно, состоят из 3-х минералов: альбита  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , микроклина  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , ортоклаза  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  в различных количественных соотношениях, поэтому представляет интерес ранжирование этих минералов по гидратационной активности. Этот вопрос был исследован ранее путем определения растворимости кварца, альбита и микроклина в щелочной среде с  $\text{pH} = 12,8$ . При этом был сделан вывод, что кварц значительно активнее полевых шпатов, далее следует альбит и микроклин с небольшой разницей [109]. Ортоклаз в указанной работе не был исследован. Представляет также интерес исследование активности  $\beta\text{-CaSiO}_3$  и стекла волластонитового состава как важнейших компонентов доменных, электротермофосфорных шлаков и некоторых зол.

Авторы исследовали этот вопрос с применением химической термодинамики.

Ее применение для ранжирования активности различных соединений требует отдельного рассмотрения. Нередко предпочтительность образования тех или иных соединений оценивают по величине свободной энергии  $\Delta G_p$  реакции. Этот способ может быть использован лишь применительно к однотипным реакциям и их продуктам. Если же сравниваемые соединения содержат различное число атомов, то при прочих равных условиях, чем больше сумма  $a + b$  в соединениях  $A_aB_b$ , тем больше  $\Delta G_p$ .

В связи с этим, для реакций в водной среде авторы для оценки сравнительной гидратационной активности соединений (в данном случае  $SiO_2$  и силикатов) предлагают использовать величину активности ионов кремнекислоты в растворе.

Рассмотрим начальную стадию гидратации кремнеземных компонентов в автоклаве, в щелочной среде гидроксида кальция, исходя из общепринятого представления, что на самой начальной стадии реакции происходит присоединение гидроксильных групп к диоксиду кремния и силикатам, содержащим полимерные кремнекислородные анионы. При этом образуются мономерные или слабо полимеризованные (ди- и тримерные) анионы, которые легко реагируют с гидроксидом кальция в растворе, образуя гидросиликаты кальция.

Так как образование ди- и тримеров ортокремневой кислоты не сопровождается значительными термодинамическими эффектами, кроме того, для них нет надежных справочных данных по  $\Delta G_{473}^0$ , ограничимся рассмотрением стадии образования мономера  $H_2SiO_4^{2-}$ .

Исходные данные берем из [116, 117]. Ниже излагаются результаты расчетов.

1. Смесь кварца с гидроксидом кальция.



Принимаем, в ккал/моль:

$$\Delta G_{473}^0 \text{SiO}_2 = 197,0; \Delta G_{473}^0 \text{OH}^- = 25,6; \Delta G_{473}^0 \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} = 250,0.$$

Тогда  $\Delta G_p = -1,8$  ккал/моль;  $\lg K_p = 0,83$ ;

$$K_p = \frac{[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]}{[\text{OH}^-]^2} = \frac{[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]}{[2\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^2} = \frac{1}{4[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]};$$

$$\lg K_p = -0,6 - \lg [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}].$$

Отсюда получим:  $\lg [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -1,43$ ,

$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л} = 2229 \text{ мг/л SiO}_2.$$

По данным [109], при 175 °С концентрация SiO<sub>2</sub> в системе кварц – Ca(OH)<sub>2</sub> составляет 2250 мг/л.

С учетом того, что в нашем расчете температура среды выше на 25 °С, а полученный результат – это активность (не концентрация) кремнекислоты, результат расчета можно считать удовлетворительным, так как при столь малых концентрациях ионов коэффициенты их активностей не намного ниже 1.

Рассчитаем pH среды.

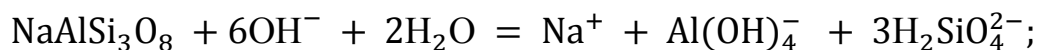
$$[\text{OH}^-] = 2[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л};$$

$$\text{pOH} = -1,13; \text{pH} = 14 - 1,13 = 12,87.$$

2. Рассчитаем активность ионов кальция для основных минералов полевых шпатов.

Для альбита NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> принимаем [116]:  $\Delta G_{473}^0 = 862,0$  ккал/моль;

$$\text{Al(OH)}_4^- = 301,0 \text{ ккал/моль.}$$



$\Delta G_p = 2,3$  ккал/моль;  $\lg K_p = -1,06$ .

$$K_p = \frac{[\text{Na}^+][\text{Al(OH)}_4^-][\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]}{[\text{OH}^-]^6} = \frac{[\frac{1}{3}\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}][\frac{1}{3}\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}][\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]}{[2\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^6} =$$



$$= \frac{1}{9 \cdot 64 [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^6}.$$

$$\begin{aligned} \lg K_p &= -2,76 - \lg[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]; \quad [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} = \\ &= 1200 \text{ мг/л SiO}_2. \end{aligned}$$

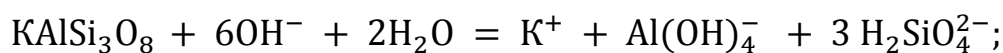
$$\begin{aligned} [\text{Al}(\text{OH})_4^-] &= \frac{1}{3} \cdot [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{3} = 6,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} = \\ &= 660 \text{ мг/л Al}_2\text{O}_3. \end{aligned}$$

$$[\text{Na}^+] = \frac{1}{3} [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = \frac{1}{3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 6,7 \text{ ммоль/л} = 154 \text{ г/л};$$

$$[\text{OH}^-] = 2[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л};$$

$$\text{pH} = 14 - 1,13 = 12,6.$$

3. Для микроклина  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  принимаем  $\Delta G_{473}^0 = 867 \text{ ккал/моль}$ .



$$\begin{aligned} \Delta G_p &= 867 + 6 \cdot 25,6 + 2 \cdot 50,2 - 67,6 - 301 - 3 \cdot 250 \\ &= 2,4 \text{ ккал/моль}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{[\text{K}^+][\text{Al}(\text{OH})_4^-][\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]}{[\text{OH}^-]^6} = \frac{[1/3 \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}][1/3 \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}][\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]}{[2\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^6} = \\ &= \frac{1}{9 \cdot 64 [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^6}. \end{aligned}$$

$$\lg K_p = -1,11;$$

$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л} = 1343 \text{ мг/л SiO}_2.$$

$$\begin{aligned} [\text{Al}(\text{OH})_4^-] &= \frac{1}{3} \cdot [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 2,24 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{3} = 7,47 \cdot 10^{-3} \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} = \\ &= 747 \text{ мг/л Al}_2\text{O}_3. \end{aligned}$$

$$[\text{K}^+] = \frac{1}{3} [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = \frac{1}{3} \cdot 2,24 \cdot 10^{-2} = 74 \text{ ммоль/л}$$

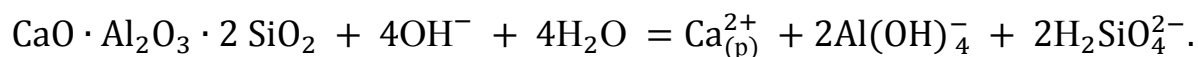
$$= 296 \text{ мг/л калия};$$

$$[\text{OH}^-] = 2[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 2,24 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 4,48 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л};$$

$$\text{pH} = 14 - 1,13 = 12,65.$$

4. Для анортита – кальциевого полевого шпата –  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$  принимаем  $\Delta G_{473}^0 = 939 \text{ ккал/моль}$ .

Схема реакции для начальной стадии гидратации этого минерала имеет вид:



Изменение свободной энергии при этой реакции:

$$\begin{aligned} \Delta G_p &= 939 + 4 \cdot 25,4 + 4 \cdot 50,2 - 132,7 - 2 \cdot 300 - 2 \cdot 250 = \\ &= 7,5 \text{ ккал/моль}; \end{aligned}$$

$$K_p = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{Al}(\text{OH})_4^-]^2[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^2}{[\text{OH}^-]^4} = \frac{0,5 \cdot [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^5}{[16\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^4};$$

$$\lg K_p = -1,5 + \lg [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -3,46;$$

$$\lg [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -1,96; [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л} = 660 \text{ мг/л SiO}_2;$$

$$[\text{Al}(\text{OH})_4^-] = [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 11 \cdot 100 = 1100 \text{ мг/л Al}_2\text{O}_3.$$

$$[\text{OH}^-] = 2[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л};$$

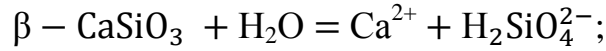
$$\text{pH} = 14 - 1,66 = 12,36 \approx 12,4.$$

Приведенные выше расчеты дают величины активности ионов кремневых кислот и алюминия, тогда как литературные данные, например [109], выражают растворимость этих ионов, определенную методами аналитической химии, поэтому расчетные данные по  $\beta$ -кварцу, альбиту и микроклину несколько отличаются от справочных. по кремнекислоте и ионам щелочей результаты термодинамических расчетов довольно близки к данным [109]. а по оксиду алюминия последние в 2,5 раза выше рассчитанных нами. Причина этого неясна. Не исключено, что это результат несовершенства методов определения Al, разработанных более 40 лет тому назад.

В заключение рассмотрим щелочную активацию волластонита – важнейшего компонента доменных гранулированных и электротермофосфорных шлаков. Особенно велико содержание волластонита в виде стекла и кристаллической фазы в шлаках металлургических заводов, расположенных в европейской части России.

$$\text{Для } \beta - \text{CaSiO}_3: \Delta G_{473}^0 = 447,2 \text{ ккал/моль};$$

Схема реакции:



$$\Delta G_p = 347,2 + 50,2 - 132,7 - 250 = 14,7 \text{ ккал/моль};$$

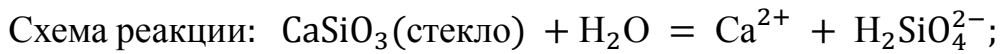
$$\lg K_p = -6,79; K_p = [\text{Ca}^{2+}][\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^2;$$

$$2 \lg[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -6,79; \lg[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -3,4;$$

$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 4,03 \cdot 10^{-4} = 0,4 \text{ ммоль/л} = 24 \text{ мг/л SiO}_2.$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 0,4 \text{ ммоль/л} = 0,4 \cdot 56 = 22,4 \text{ мг/л CaO}.$$

$$\text{Для CaSiO}_3 \text{ (стекло): } \Delta G_{473}^0 = 437,1 \text{ ккал/моль};$$



$$\Delta G_p = 437,1 + 50,2 - 132,7 - 250 = 4,8 \text{ ккал/моль};$$

$$\lg K_p = -2,2; K_p = [\text{Ca}^{2+}][\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]^2;$$

$$2 \lg[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -2,2; \lg[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = -1,1;$$

$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 7,94 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л} = 4764 \text{ мг/л SiO}_2.$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 7,94 \cdot 10^{-2} \frac{\text{моль}}{\text{л}} = 7,94 \cdot 10^{-2} \cdot 56 = 4446 \text{ мг/л CaO}.$$

Так как в данном случае при гидратации волластонита гидроксильные группы практически не участвуют в химической реакции, рН среды близок к 12,5 – 12,8, характерному для насыщенного раствора Ca(OH)<sub>2</sub>.

Результаты расчетов показывают, что кристаллический волластонит очень слабо реагирует с водой даже при 200 °С. Наши эксперименты показали, что при 250 °С водная суспензия тонкомолотого волластонита с S<sub>уд.</sub> = 300 м<sup>2</sup>/кг при В/Т = 0,4 не схватывается и не твердеет.

В то же время стеклообразный волластонит при 175 – 200 °С обладает высокой гидратационной активностью. Гранулированные шлаки волластонитового состава используются в качестве самостоятельных вяжущих при температуре выше 150 – 160 °С, а со щелочным активатором – при 25 – 90 °С.

Особенность шлаков волластонитового состава как сырья для производства силикатных материалов автоклавного твердения состоит в

том, что при их запарке в щелочной среде в принципе возможен прямой синтез тоберморита и ксонотлита, а не двухступенчатый, с промежуточным образованием двухосновного гидросиликата кальция  $C_2SH(A)$ , как это происходит в системе кварц –  $Ca(OH)_2$  в автоклаве.

Не исключено, что при этом может образоваться более совершенная структура твердения гидросиликатной связки силикатных изделий автоклавного твердения.

Изложенное дает основание проранжировать силикатные компоненты в порядке уменьшения их способности активироваться в щелочной среде при температуре 190 – 200 °С: волластонит стеклообразный > кварц > микроклин > альбит > анортит >  $\beta$  – волластонит.

#### **Подбор кварцевых песков по модулю крупности.**

Были проведены исследования по определению минимально возможного модуля крупности песка, применяемого для изготовления газосиликата. Для этого были использованы пески двух месторождений Тюменской обл: Андреевское и Тихвинское. Основные характеристики песков приведены в табл. 2.12 и 2.13. Изготовление изделий производилось по ударной технологии «с подрезным слоем».

Таблица 2.12 – Химический состав песков месторождений Тюменской обл.

Наименование песка	п.п.п	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (окис.)	FeO (закис.)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	
														Содержание в % на высушенное при 110 <sup>0</sup> С вещество
Песок Тихвинского месторождения	0.25	93.64	0.54	0.18	0.66	0.07	2.89	0.51	<0.10	0.02	0.45	0.91	<0.10	
	Содержание органических примесей				0.22 % (по эталону)									
	Содержание слюды				0.01%									
Песок Андреевского месторождения	0.57	95.04	0.55	0.14	0.34	0.07	2.02	0.22	<0.10	0.02	0.45	0.98	<0.10	
	Содержание органических примесей				0.15% (по эталону)									
	Содержание слюды				0.01%									

Таблица 2.13 – Результаты ситового анализа песков

Наименование месторождения	Полные остатки на ситах, %						
	дно	0,16 мм	0,315 мм	0,63 мм	1,25 мм	2,5 мм	5 мм
Андреевское	29,5	42,0	27,0	1,5	0	0	0
Тихвинское месторождение	69	31	0	0	0	0	0

Как видно из таблиц, по химическому составу, а так же по модулю крупности пески отличаются незначительно. По ситовому анализу Андреевский песок крупнее Тихвинского,  $M_{кр}=0,7$  и  $M_{кр} =0,3$ , соответственно. Различно и количество фракций песков. После размолла исследуемых песков в производственной шаровой мельнице наблюдается разница и в тонкости помола: Андреевский песок имеет удельную поверхность в среднем 2200 – 2300 м<sup>2</sup>/кг, а Тихвинский – 1950 – 2000 м<sup>2</sup>/кг.

При изготовлении газосиликатных изделий с применением Андреевского и Тихвинского песков установлено, что при прочих равных условиях, средняя прочность газобетонов на Андреевском песке составляет 3,4 МПа, на Тихвинском – 3,2 МПа. В изделиях, изготовленных на Тихвинском песке, наблюдалось много заливаний и по горизонтальным и по вертикальным швам. Коэффициент выхода качественной продукции на Тихвинском песке был на 5% ниже парити продукции, изготовленной с применением Андреевского песка.

Причиной этого могут быть следующие: практически монофракционный Тихвинский песок, содержит большое количество высокодисперсных фракций повышенной реакционной способности. Такой песок обладает повышенной водопотребностью и водоудерживающей способностью, что способствует слипанию газосиликатных изделий.

Для проверки данного предположения в лабораторных условиях путем соединения Андреевского и Тихвинского песков было подобрано оптимальное соотношение 40: 60 массовых частей соответственно и произведен намол шлама в производственных условиях. Шлам из смеси песков имел среднюю удельную поверхность 2170 м<sup>2</sup>/кг. На заливках удалось снизить водотвердое отношение (В/Т) смеси с 0,525 до 0,49. Из него были изготовлены несколько партий газосиликатных блоков марки по средней плотности  $D$  500. Автоклавная обработка газосиликатов осуществлялась в обычном режиме: 2+6+2 ч.

Средняя прочность при сжатии образцов-кубов размерами 150×150×150 мм вырезанных из газобетона при испытании на прессе оказалась 3,4 МПа, при этом количество залипаний подрезного слоя минимизировалось. Итак, установлено, что основная причина залипаний изделий, изготовленных с применением монофракционного Тихвинского песка состоит в повышенной его водопотребности, что вызывает диффузию структурообразующих ионов в швах между блоками и возникновение между ними гидросиликатных спаек при автоклавной обработке. Возможно, что в данном случае играет роль то, что на мелкозернистых песках облегчаются процессы рекристаллизации гидросиликатной связки, что может способствовать снижению прочности и возникновению спаек между изделиями.

При дальнейшей работе над составами, путем оптимизации В/Т, активности смеси и нормализации температурных режимов при указанном выше соотношении Андреевского и Тихвинского песков, удалось полностью исключить слипание изделий.

Таким образом, существующие требования по модулю крупности кварцевого песка как сырьевого материала для производства газобетонов ( $M_k \geq 1,1$ ) является необоснованными и относится лишь к силикатным изделиям плотной структуры. Для автоклавных силикатных газобетонов предлагается ввести требования к модулю крупности в следующем интервале:  $0,3 \leq M_k \leq 0,7$ . Ограничение нижнего предела модуля крупности кварцевого компонента связано с тем, что слишком мелкие пески отличаются так же худшей размалываемостью и высокой водоудерживающей способностью, вызывающей чрезмерный рост энергозатрат на их оттаивание и сушку в осеннее-зимний период.

### 2.3 Порообразователи для ячеистого бетона автоклавного твердения

Для получения поровой структуры ячеистого бетона применяют газо- и пенообразователи, обеспечивающие заданную среднюю плотность и требуемые физико-механические показатели ячеистого бетона.

Основной проблемой производства и применения газообразователей для ячеистых бетонов автоклавного твердения, производимых в Российской Федерации, является их нестабильное качество. К сожалению, научных разработок по этому вопросу крайне мало. Практически все они проводятся предприятиями-изготовителями газообразователей самостоятельно [118]. Но стремление этих предприятий к усовершенствованию своих технологий – весьма похвально.

Долгое время основным газообразующим компонентом, применяемым на заводах по производству ячеистого бетона в странах СНГ, являлась пигментная алюминиевая пудра (марки ПАП-1 и ПАП-2), производимая по ГОСТ 5494 [119] с основной областью ее применения в качестве пигмента для изготовления окрасочных составов. Все нормативные требования, установленные вышеуказанным стандартом, были установлены именно по основной области применения, и не подходят для определения качества пудр, применяемых при производстве газобетонов.

В 1995 году указанный стандарт несколько адаптировали под производство газобетона, однако, контроль качества пудр, по требованиям ГОСТ 5494 все еще ведется по кроющей способности на воде, гранулометрическому составу, всплываемости, химическому составу, при этом, характеристики, существенно влияющие на процесс формирования газобетонного массива так и остаются не определенными.

Кроющая способность на воде может значительно отличаться для одной и той же марки пудры.

Пудры с кроющей способностью на воде маркируются ПАП-2, однако, когда остаток на одном из сит не удовлетворяет требованиям



ГОСТ 5494 (остаток на сите +0056 > 0,3% или на сите +0045 > 0,5%), пудры маркируются как ПАП-1. При этом возникает ситуация, когда кроющая способность на воде ПАП-1 (7000 – 11000 см<sup>2</sup>/г) оказывается выше, чем у ПАП-2 (10000 – 13000 см<sup>2</sup>/г). Применение такой пудры в производстве газобетона может привести к резкому изменению параметров ферментации бетонного массива: скорости и времени газовыделения, и в конечном итоге, к выпуску некачественной продукции.

Нестабильность свойств пигментной пудры, выпускаемой отечественной промышленностью, а так же ее повышенная пожаро- и взрывоопасность привела к необходимости разработки новых видов газообразователей, отвечающих современным требованиям газобетонных производств.

В зарубежной практике давно и весьма эффективно применяются пасты из алюминиевой пудры. При этом, для различных плотностей газобетона используются пасты с различной крупностью частиц алюминия. Кинетика газовыделения, содержание активного алюминия, средний размер частиц ( $D_{50}$ ), а также величины  $D_{10}$  и  $D_{90}$ , характеризующие их однородность – параметры, существенно влияющие на технологический процесс производства газобетона.

Кроме того, пасты менее взрывоопасны. Основными зарубежными поставщиками алюминиевых паст для Российской Федерации являются фирмы Schlenk [120], Eckart и Benda-Lutz.

В России, в последние годы несколько предприятий так же начали производство газопаст: Benda-Lutz Волжский, ОК «РУСАЛ», НСК-ТЕК. Пока их производят в основном на базе вышеупомянутых пудр, поэтому все недостатки, присущие пудрам имеются и в пастах. Отрадно отметить, что Российские предприятия, понимая свою неконкурентность перед западными производителями, в настоящее время достаточно интенсивно занимаются внедрениями новых современных технологий производства газопаст, оснащаясь новейшим лабораторным оборудованием для экспресс-контроля качества гранулометрического состава частиц

алюминия. И первые шаги уже увенчались успехом. Так, специалисты ОК «РУСАЛ» разработали и широко внедряют пасты серии АПГ, для различных плотностей газобетона, характеризующиеся более высокой стабильностью свойств и пониженной степенью пыления, а значит повышенной безопасностью, что немаловажно в условиях современных производств.

#### **2.4 Модифицирующие добавки для автоклавного ячеистого бетона**

В производстве автоклавных ячеистых бетонов, в отличие от тяжелых бетонов, модифицирующие добавки практически не используются. Это связано с тем, что опыт производства легких конструкционно-теплоизоляционных бетонов еще слишком мал, а известные добавки-модификаторы, эффективные в тяжелых цементных бетонах, в пористых системах не работают. Но имеются публикации польских специалистов, работающих в направлении модификации ячеистых бетонов [121].

Стандарты ГОСТ 31359 [122] и 31360 [114], регламентируют для регулирования и улучшения свойств ячеистых бетонов применять:

- добавки по ГОСТ 24211 [123];
- доменные гранулированные шлаки по ГОСТ 3476 [124];
- гипсовый камень по ГОСТ 4013 [105].

По СН 277 в качестве добавок с той же целью что и гипс возможно применение калия углекислого; жидкого стекла; триэтанолamina и тринатрийфосфата по действующим ТМПА.

В качестве армирующих веществ возможно использование искусственных и природных компонентов: полимерные волокна, волластонит, асбест и др. соответствующие действующей нормативной документации.

Поверхностно-активные вещества, применяемые для изготовления ячеистых бетонов, регламентированы в ГОСТ 8433 [125]. Виды добавок и

требования к ним, обеспечивающие качество ячеистых бетонов в соответствии с настоящим стандартом, должны быть приведены в технологической документации на приготовление ячеистых бетонов конкретных видов.

В рамках настоящего исследования, результаты которого приведены в подразделе 2.1, рекомендованы добавки-электролиты, позволяющие регулировать основные свойства известкового вяжущего. Имеется ряд добавок, позволяющих удлинять сроки гашения извести и при минимальном их расходе. Другие, исследованные добавки, напротив, позволяют значительно уменьшить сроки гашения извести, повысив ее температуру, что позволяет применять для изготовления газобетонов средне- и медленно гасящиеся извести, не отличающиеся при этом активностью. Однако, в рамках диссертации добавки, ускорители гашения извести – не рассматриваются.

Известно, что добавка ПВА в тяжелых бетонах повышает гидроизоляционные свойства. Проведен эксперимент, целью которого было определение влияния добавки органических полимеров на свойства ячеистого бетона с целью определения степени воздействия на бетон и повышения его гидрофобных свойств.

Для этого, в один из образцов бетона марки по средней плотности D 600 была добавлена суспензия ПВА. Количество добавки составило 0,1 % от массы цемента. От изготовленных массивов были отобраны образцы, с которых были сделаны микрофотографии при 50-ти и 2000-кратном увеличении. Макро- и микроструктура образцов приведена на рис. 2.11 и 2.12.

При внешнем осмотре отобранных образцов заметной разницы не наблюдалось. Можно отметить только, что образцы с ПВА имели более светлый оттенок бетона.

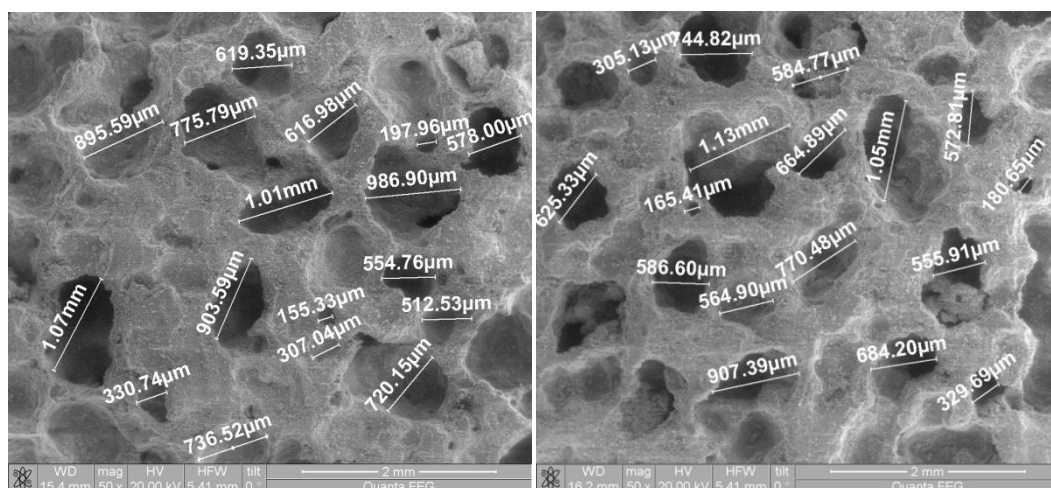


Рис. 2.1 – Макроструктура ячеистого автоклавного бетона, марки по средней плотности D 600: а – без добавок; б – с добавкой дисперсии ПВА

Макроструктура образцов при 50-кратном увеличении, кроме указанного выше светлого оттенка образца с добавкой ПВА, заметных отличий не имела.

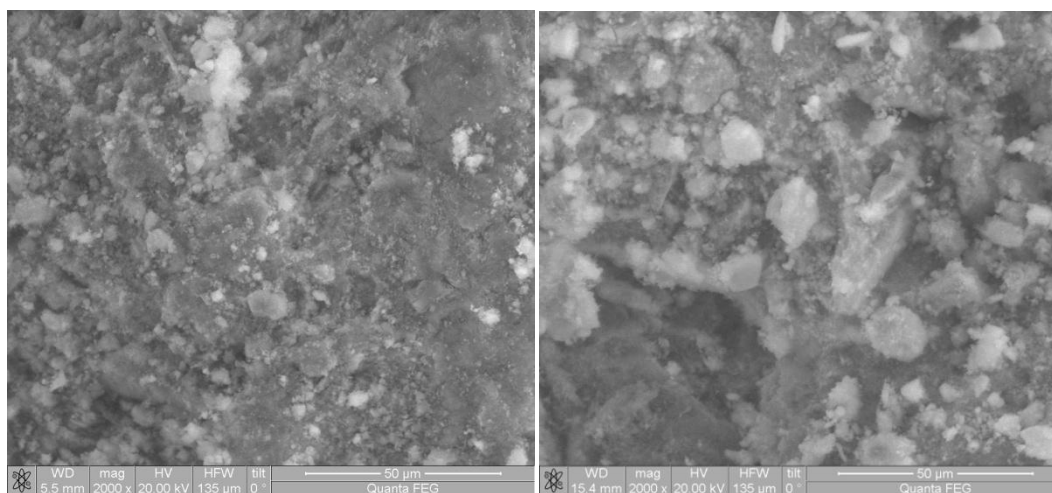


Рис. 2.12 – Микроструктура ячеистого автоклавного бетона марки по средней плотности D 600 с увеличением 2000×: а – без добавок; б – с добавкой дисперсии ПВА

При сравнении микроструктуры бетона образцов, приведенных на рис. 2.12 видно, что бездобавочный бетон имеет значительно более плотную, равномерную однородную структуру. При одинаковом

увеличении, на фотографии образца с добавкой ПВА видно, что структура его бетона более рыхлая, грубодисперсная, с большим количеством крупных светлых глобулярных включений.

Гораздо лучше, чем ПВА для применения в газосиликатах могли бы быть водорастворимые эфиры целлюлозы, особенно оксиэтилцеллюлоза, расход которых на порядок меньше, чем ПВА. Однако проверка в производственных условиях действия водорастворимых добавок показала, что они усиливают слипание блоков, а так же, из-за сильной водоудерживающей способности затрудняют сушку изделий и вызывают повышение средней плотности газобетона. В связи с изложенным, а так же из-за высокой стоимости этих добавок считаем их использование в технологии газосиликатов нецелесообразным.

*Вода* для приготовления ячеистого бетона должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732–2011 [126] . Особенно важно при этом, чтобы рН фактор воды соответствовал нейтральной среде – 7.

## **2.5 Совершенствование методов исследований сырья и готовой продукции**

### **2.5.1 Анализ методов производственных испытаний сырья, полуфабрикатов и готовой продукции**

В соответствии с СН 277 [99] поступающие на предприятие материалы и полуфабрикаты принимают партиями, при этом проверяют по методикам, указанным в соответствующих стандартах, технических условиях и названной инструкции следующие свойства:

– минералогический состав цемента, вид гидравлической добавки и марку – по паспорту, тонкость помола, активность и сроки схватывания – по ГОСТ 310.1 – ГОСТ 310.4 [127 – 130];

- содержание  $C_2O + MgO$  в извести, содержание «пережога» – по методике прил. 4 [99];

- сроки гашения, тонкость помола – по ГОСТ 22688 [131];

- тонкость помола известково-песчаной смеси следует проверять в соответствии с прил. 5 [99];

- удельная поверхность – по ПСХ;

- содержание в кварцевом песке кварца, слюды, илистых и глинистых примесей – по ГОСТ 8735 [132];

- марку и содержание активного алюминия в алюминиевой пудре – по прил. 6 [99];

При контроле производственных процессов лаборатория проверяет:

- дисперсность песка, гипса и других материалов в порядке, предусмотренном технологической картой, но не реже одного раза в смену;

- плотность и температуру шлама согласно прил. 7 [99];

- текучесть поризованного отделочного раствора и вязкость раствора, а также температуру, смеси в момент разлива ее в формы и после вспучивания (из каждого третьего замеса);

- объемную массу ячеистобетонной смеси (в каждой третьей форме);

- высоту вспучивания смеси (в каждой третьей форме);

- пластическую прочность ячеистого бетона - сырца перед прикаткой "горбушки" и резкой массива согласно прил. 2 [99];

- режим тепловлажностной обработки изделий (для каждой запарки);

- тщательность очистки и смазки форм и плотность закрытия бортов (в каждой форме);

Для оценки стабильности технологических процессов на предприятии необходимо результаты контроля качества материалов и производственных процессов ежемесячно подвергать статистической обработке, согласно прил. 8 [99] и сопоставлять их соответствие с нормируемыми показателями табл. 12 [99].

При изменении сырья и параметров производства лаборатория обязана вносить необходимые коррективы в технологию изготовления изделий.

При приемке готовых изделий проверке ОТК подлежат:

- объемная масса, прочность при сжатии ячеистого бетона в изделиях (в каждой партии);
- влажность изделий (в каждой партии);
- морозостойкость ячеистого бетона (при изменении состава бетона);
- размеры изделий, наличие выколов, трещин и других видимых дефектов (в каждой партии);

Объемная масса, прочность при сжатии, морозостойкость и влажность изделий определяют по соответствующим стандартам.

Изделия принимают партиями. Размер партии устанавливается в соответствующих нормативных документах. Партия считается принятой, если показатели качества изделий удовлетворяют требованиям соответствующих нормативных документов.

Контролируемые в соответствии с требованиями СН 277 параметрами приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.14 – Параметры, контролируемые в соответствии с требованиями СН 277

<b>№ п.п.</b>	<b>Наименование материалов и технологических процессов</b>	<b>Наименование контролируемых параметров и свойств материалов</b>
1	Цемент	Дисперсность (удельная поверхность) Активность по прочности
2	Известь немолотая	Содержание СаО Сроки гашения Температура гашения
3	Зола-унос кислая	Дисперсность
4	Зола-унос высокоосновная	Содержание СаО Дисперсность
5	Алюминиевая пудра	Содержание активного алюминия

6	Помол песка	Плотность шлама Дисперсность песка (удельная поверхность)
7	Усреднение шлама в бассейнах	Однородность шлама по высоте шламбассейна
8	Приготовление известково-песчаной (известково-зольной) тонкомолотой смеси	Содержание активного СаО Удельная поверхность
9	Приготовление водной суспензии алюминиевой пудры	Содержание алюминия в 1 л или в 1 кг
10	Приготовление ячеистобетонной смеси	Температура шлама Температура воды Расход материалов
11	Формование изделий	Температура ячеистобетонной смеси при заливке в формы Вязкость ячеистобетонной смеси при заливке
12	Ячеистый бетон	Пластическая прочность ячеистого бетона-сырца перед разрезкой массивов и срезкой «горбушки» Объемная масса Прочность при сжатии

В приведенных в таблице 2.14 имеются требования, значения которых в настоящее время определяются автоматически, поэтому сотрудниками лаборатории они могут не проводиться. В то же время, на наш взгляд отсутствуют измеряемые параметры, которые периодически проводить необходимо, например: влажность массива перед резкой и температура массива перед автоклавом. Эти данные необходимы технологическому персоналу для определения причин брака (залипание подрезного слоя или слипания изделий в массивах) и принятия оперативных решения по корректировке составов или температурных режимов заливок.

### 2.5.2 Предлагаемые методики испытаний сырья и готовой продукции

Требования стандартов по методам проведения некоторых испытаний газосиликатных смесей и бетонов не учитывают специфику новых



производств. Предлагаем новые методики, адаптированные к производственным условиям Российских предприятий.

Наибольшие нарекания вызывает методика испытания извести на температуру и время гашения. Ниже (табл. 2.15) предлагается методика ее испытания, в сравнении со стандартной методикой ГОСТ 22688 и методикой фирмы-поставщика технологического и лабораторного оборудования МАЗА-ХЕНКЕ.

Второй по количеству возникающих конфликтов с потребителями газобетонных изделий является методика испытаний прочности при сжатии образцов газосиликата. Во избежание неточностей и разногласий с потребителями продукции, настоятельно рекомендуется при определении прочности при сжатии готовых блоков использовать метод подготовки образцов по методике ГОСТ 10180 [133] – выбуриванием цилиндров. Это позволяет выдерживать очень точные геометрические размеры образцов и получать результаты с минимальным коэффициентом вариации внутри партии.

Табл. 2.15 – Методики проведения лабораторных испытаний газосиликатных смесей и готовой продукции

	Стандартная методика	Методика поставщика технологического оборудования	Предлагаемая автором методика
1	2	3	4
<b>Метод испытания времени и температуры гашения извести</b>			
Средства анализа	<p>1 бытовой термос вместимостью 500 мл;</p> <p>1 деревянная отполированная палочка;</p> <p>25 мл. воды, имеющей температуру 20°C;</p> <p>1 термометр ртутный на 100°C;</p> <p>1 секундомер;</p> <p>Навеска извести, массой <math>G</math> в граммах рассчитывается по формуле</p> $G = \frac{1000}{A}$ <p>где <math>A</math> — содержание активных окисей кальция и магния в извести, %.</p>	<p>Термос Девара по DIN 1060;</p> <p>1 Штатив с креплением для мешалки;</p> <p>1 Мешалка с лопаткой по DIN 1060;</p> <p>1 термометр;</p> <p>1 секундомер или 1 электронный измеритель температуры;</p> <p>1 X/Y - самописец, 0/100 °C, продвижение около 20 мм/мин;</p> <p>1 герметично закрывающаяся ёмкость для хранения пробы;</p> <p>1 Проба белой молотой извести, около 500 г</p> <p>Дистиллированная вода</p>	<p>Бытовой термос вместимостью 500 мл;</p> <p>1 деревянная отполированная палочка;</p> <p>200 мл. воды, имеющей температуру 20°C;</p> <p>1 термометр ртутный или электронный на 150°C;</p> <p>1 секундомер;</p> <p>1 герметично закрывающаяся ёмкость для хранения пробы;</p> <p>проба молотой извести 300 г.</p> <p>Дистиллированная вода.</p>

1	2	3	4
Выполнение испытания	<p>Массу навески <math>G</math> помещают в термосную колбу, вливают 25 мл воды, имеющей температуру 20 °С, и быстро перемешивают деревянной отполированной палочкой. Колбу закрывают пробкой с плотно вставленным термометром на 100°С и оставляют в покое.</p> <p>Ртутный шарик термометра должен быть полностью погружен в реагирующую смесь. Отсчет температуры реагирующей смеси ведут через каждую минуту, начиная с момента добавления воды. Определение считается законченным, если в течение 4 мин температура не повышается более чем на 1°С.</p> <p>За время гашения принимают время с момента добавления воды до начала периода, когда рост температуры не превышает 0,25 °С в минуту.</p>	<p>Термос Девара наполняют 600 мл воды при температуре 20 °С. Мешалку и термометр вставляют в термос (или тепловой сенсор). Число вращений устанавливают на 300 (+/- 50). Пробу извести перед опытом следует хранить так, чтобы она приобрела температуру 20 °С.</p> <p>Навеску пробы массой 150 г взвешивают и быстро высыпают в сосуд при работающей мешалке. Крышку следует без промедления закрыть.</p> <p>После подачи пробы извести проводят через каждую минуту измерение температуры гашения. Результаты протоколируют. При исследовании «быстрой извести» измерения проводят чаще, например, через каждые 30 сек.</p>	<p>В термосную колбу бытового термоса, вместимостью 500 мл, вливают 200 мл воды, имеющей температуру 20 °С. Туда же помещают приготовленную навеску извести массой 50 гр. Все это быстро перемешивают деревянной отполированной палочкой. Колбу закрывают пробкой с плотно вставленным термометром на 150 °С и оставляют в покое.</p> <p>После подачи пробы извести проводят через каждую минуту измерение температуры гашения. Результаты протоколируют.</p> <p>При исследовании «быстрой извести» измерения проводят через каждые 30 сек. Определение считается законченным, если в течение 4 мин температура не повышается более чем на 1°С.</p> <p>За время гашения принимают время с момента добавления воды до начала периода, когда рост температуры не превышает 0,25 °С в минуту.</p>

## Выводы по главе 2

Автором обоснованы требования к сырьевым материалам для производства газосиликатных бетонов автоклавного твердения.

1. Сформулированы новые требования к подбору цемента для автоклавных бетонов. Указано, что основным фактором, влияющим на стабильность показателей газосиликатных смесей в первоначальный период структурообразования и качество конечного продукта, является активность смеси по СаО. Поэтому, для цемента так же, как и для остальных активных сырьевых компонентов, необходимо определять его активность по СаО.

2. Из многообразия кремнеземсодержащего сырья, используемого для производства газобетонов, которое было апробировано в нашей стране, так и за рубежом наиболее широко используются кварцевые пески, теоретическое обоснование применения которых в отечественной и зарубежной литературе отсутствует.

Установлено, что требования к модулю крупности кварцевого песка, установленные ГОСТ 8736, относятся лишь к тяжелым силикатным бетонам, а для газобетоносилкатов, при производстве которых песок тонко измельчается, допускается использование песка, имеющего модуль крупности в пределах  $M_{кр} 0,2 - 0,6$ . При этом достигается значительная экономия энергоресурсов, используемых при помоле кремнеземистого компонента и расширяется сырьевая база. Ограничение нижнего предела модуля крупности кварцевого компонента связано с тем, что слишком мелкие пески отличаются худшей размалываемостью и высокой водоудерживающей способностью, вызывающей чрезмерный рост энергозатрат на их оттаивание и сушку в осеннее-зимний период.

На основе правил кислотно-основных взаимодействий Соболева – Рамберга, а также термодинамических расчетов произведено ранжирование активности кислого компонента силикатных бетонов: кварц > полевые шпаты > слюды. Внутри названных групп также проведено ранжирование минералов. Например: калиевый полевой шпат активнее натриевого и кальциевого, а среди слюд: мусковит → биотит. На этой основе, рекомендовано применение взамен кварцевого песка (при его отсутствии) полевых шпатов, или отсевов дробления гранита без снижения качества конечного продукта.

На основании результатов исследований, основываясь на данных о сравнении активностей полевых шпатов при взаимодействии с известью, допустимо использование песков с высоким содержанием полевых шпатов, при этом важно строго контролировать содержание «крупки» (крупных частиц, размерами более 2,5мм).

В данной технологии возможно применение глинистых минералов. Они хороши для улучшения реологии и повышения седиментационной устойчивости песков, а активность их взаимодействия с известью достаточна, благодаря высокой (на 1 – 2 порядка выше кварца) удельной поверхности.

3 Указано, что определение активности по СаО обратного шлама, добавляемого в бетонную смесь предпочтительнее испытания его удельной поверхности, определение которой существующими методами в настоящее время не представляется возможным.

4. Разработаны теоретические представления о механизме гашения извести водой и влиянии на этот процесс добавок-электролитов и ПАВ. Установлены закономерности влияния электролитов на скорость гашения извести: химические соединения, которые уменьшают растворимость Са(ОН)<sub>2</sub> в воде замедляют гашение, а добавки, повышающие ее – ускоряют. На этой основе предложены замедлители быстрогасящихся и ускорители медленногасящихся известей.

5. Из множества газообразователей, которые были испытаны за 100 лет, наилучшими являются алюминиевые пудры и пасты. Другие виды газообразователей для ячеистых бетонов не технологичны, не экономичны и не стабильны. Кроме того, как будет показано в главе 3, алюминий участвует в синтезе гидросиликатной связки газобетона. Особенно важную роль это играет в литевой технологии.

6. Режимы автоклавной обработки газобетонов в настоящее время также теоретически не обоснованы. Решение конференций, содержащих рекомендации по обработке газобетонов давлением до 2,5 МПа. Теоретическое обоснование данной стадии производства газобетона будет рассмотрено в главах 3 – 5, где показано, в том числе, что выше 200 °С запарка не эффективна.

### 3 Идентификация и анализ фазового состава газосиликатной связки

#### 3.1 Фазовый состав гидросиликатного связующего газосиликата

Известно, что запарка газосиликатных изделий производится при температуре 174 – 190 °С. Литературные данные по вопросу фазового состава гидросиликатной связки газобетонных изделий в условиях автоклавной обработки неоднозначны и крайне противоречивы. Согласно наиболее авторитетным источникам, основными гидратными фазами, которые образуются в интервале температур 160 – 200°С, являются тоберморит (11,3 Å) и ксонотлит [133 – 137]. Первый имеет состав  $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5,5\text{H}_2\text{O}$ , или  $\text{CaO}\cdot 1,2\text{SiO}_2\cdot 1,1\text{H}_2\text{O}$ , а второй –  $6\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ , или  $\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2\cdot 0,17\text{H}_2\text{O}$ . Имеющиеся литературные данные не дают прямого ответа на вопрос о том, какой из этих гидросиликатов образуется в зависимости от температуры и продолжительности запарки.

Так, например, опубликованы результаты исследований ряда ученых (Моохер, Тейлор [137]) о достаточно прочных автоклавных силикатных материалах, которые не содержат тоберморита. Другие исследователи, в частности Пуртон [138] утверждает, что образование тоберморита вообще вредит прочности, а Бесси [139] и Пауэрс [140] полагают, что природа продуктов реакции имеет несущественное значение, гораздо важнее заполнение пространства и что прочность цементного камня зависит от объемной концентрации продуктов гидратации в пространстве. Поэтому считается, что следует стремиться к максимально возможному снижению капиллярной пористости путем сокращения количества воды затворения. Для того чтобы компенсировать отрицательное влияние избыточного количества воды при литьевой технологии, необходимо увеличивать концентрацию гидросиликатной связки, т. е. повышать расход вяжущих веществ и дисперсность песка. Использование же ударных воздействий при

изготовлении ячеистого бетона позволяет интенсифицировать синтез гидросиликатов в автоклаве.

Исследование процессов фазообразования в системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  экспериментальными методами требует больших затрат времени и материально-технических ресурсов, поэтому отечественными и зарубежными исследователями проблема фазообразования в этой системе не решена.

Нами предлагается теоретический, расчетный метод решения этого вопроса. Методика расчета основана на том, что растворимость гидроксида кальция в воде сильно зависит от температуры. Так, если при температуре  $0^\circ\text{C}$  она равна  $1,3$  г/л в пересчете на  $\text{CaO}$ , то при  $90^\circ\text{C}$  –  $0,52$  г/л, а при  $200^\circ\text{C}$  –  $0,05$  г/л. График растворимости  $\text{Ca(OH)}_2$  приведен на рис. 3.1.

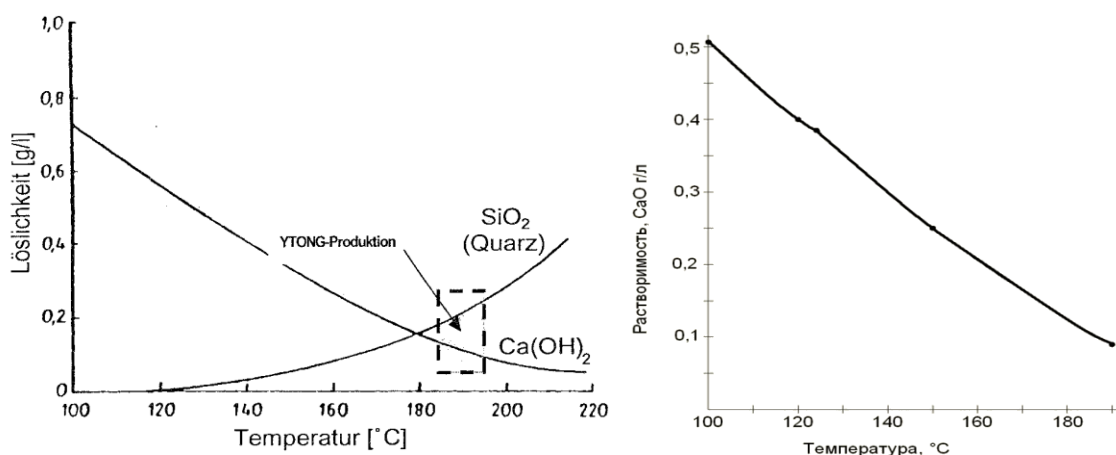


Рис. 3.1 – Графики растворимости гидроксида кальция в пересчете на  $\text{CaO}$   
*a* – по данным фирмы YTONG из [141]; *б* – по данным отечественных  
 исследователей

В связи с этим, рассчитав методом химической термодинамики растворимость гидросиликатов кальция по иону  $\text{Ca}^{2+}_{(p)}$ , можно оценить температуру их образования.

При расчете исходим из следующего численного значения изобарно-изотермического потенциала образования тоберморита при  $298^\circ\text{K}$ :

$$\Delta G^{\circ}_{298} = 2361 \text{ ккал/моль (564.8 кДж/моль) [129, 136].}$$

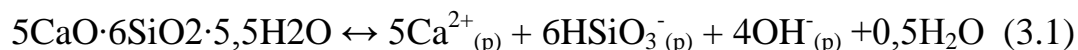
Основываясь на этом и используя данные [142] о влиянии температуры на  $\Delta G^{\circ}_T$  оксидных соединений, находим величину изобарно-изотермического потенциала образования рассматриваемого нами тоберморита при повышенных температурах, например, для 423°K:

$$\Delta G^{\circ}_{423} = 2181 \text{ ккал/моль (521.8 кДж/моль).}$$

Таким же образом определяем  $\Delta G^{\circ}_{423}$  для других составляющих равновесного процесса (1), ккал/моль:

$$\text{Ca}^{2+} = 132,7; \text{HSiO}_3^- = 217; \text{OH}^- = 29,7; \text{H}_2\text{O} = 52,0.$$

Уравнение растворения и гидролиза тоберморита выглядит следующим образом:



Изменение свободной энергии для (1) в стандартных условиях:

$$\Delta G_p = 96,7 \text{ ккал/моль.}$$

Известно, что  $\Delta G_p = -RT \ln \text{ПР}$ , где:

R – газовая постоянная, равная 1,987 кал/(моль·K), или 8,314 Дж/(моль·°K);

T – абсолютная температура;

ПР – произведение растворимости исходного вещества (тоберморита).

Для T = 423°K –  $2,3 \cdot RT = 1,945$  ккал. Отсюда получим:

$$- \lg \text{ПР}_{(\text{тоберм.})} = \frac{96,7}{1,945} = 49,59.$$

Произведение растворимости тоберморита, согласно приведенному выше уравнению, равно:

$$\text{ПР}_{\text{тб}} = [\text{Ca}^{2+}]^5 \cdot [\text{HSiO}_3^-]^6 \cdot [\text{OH}^-]^4.$$

Из этого уравнения находим коэффициенты для пересчета  $[\text{HSiO}_3^-]$  и  $[\text{OH}^-]$  в  $[\text{Ca}^{2+}]$ :

$$[\text{HSiO}_3^-] = 1,2[\text{Ca}^{2+}]; [\text{OH}^-] = 0,8[\text{Ca}^{2+}].$$

При этом получаем:

$$-15 \lg [\text{Ca}^{2+}] = 49,59 = 0,084 = 49,67; \lg [\text{Ca}^{2+}] = 4,7;$$



$$[\text{Ca}^{2+}] = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л.}$$

Полученное значение активности ионов кальция выражено в моль/л. В технической литературе принято выражать концентрацию ионов кальция в г/л по СаО. У него молекулярная масса равна 56 Д, где Д – Дальтон – единица измерения атомных и молекулярных масс.

Отсюда получим:

$$5 [\text{Ca}^{2+}] = 4,9 \cdot 5 \cdot 56 \cdot 10^{-4} = 0,137 \text{ г/л СаО.}$$

Эту величину активности ионов кальция необходимо пересчитать на концентрацию С [143]:

$$C = a/f_a,$$

где  $f_a$  – коэффициент активности ионов в растворе.

Для расчета последнего при  $t = 20 - 25^\circ\text{C}$  известно много табличных справочных данных, теоретических и эмпирических методов расчета.

Для насыщенного раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   $f_a \approx 0,8$  при комнатной температуре.

Для высоких температур (100 – 200 °С и выше) справочные данные отсутствуют, за исключением [143], в котором показано, что коэффициенты активности ионов с ростом температуры от 20 до 60 °С уменьшаются во втором знаке после запятой. Исходя из этого, для ионов  $\text{Ca}^{2+}$  при 170 °С принимаем  $f_a \approx 0,75$ . Отсюда получим численные значения концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$ :

$$C = 0,137/0,75 = 0,18 \text{ г/л (по СаО).}$$

Это соответствует нижнему значению температуры образования тоберморита ~ 165 °С.

Теперь рассчитаем концентрацию кремнекислоты (в пересчете на  $\text{SiO}_2$ ) и рН среды в жидкой фазе, находящейся в равновесии с тоберморитом:

$$[\text{HSiO}_3^-] = 6 \cdot \text{PP}_{\text{т6}} = 6 \cdot 4,9 \cdot 60 \cdot 10^{-4} \text{ г/л по SiO}_2 = 0,17 \text{ г/л SiO}_2.$$

Принимаем  $f_a = 0,75$  и получаем концентрацию  $\text{SiO}_2$  в жидкой фазе тоберморита:

$$C_{\text{SiO}_2} = 0,17/0,75 = 0,23 \text{ г/л.}$$

Рассчитаем рН жидкой фазы:

$$[\text{OH}^-] = 4 \cdot \text{PP}_{\text{т6}} = 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot 4 = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л;}$$

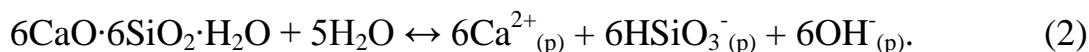
$$\text{pH} = 14 + \lg (1,96 \cdot 10^{-3}) = 11,3.$$

В данном случае пересчет активности на концентрацию не производится, так как рН – это показатель именно активности ионов.

Аналогичный расчет произведем для ксонотлита.

$$\Delta G^\circ_{243 \text{ ксон.}} = 2134 \text{ ккал/моль.}$$

Принимаем следующую схему растворения и гидролиза ксонотлита:



$$\Delta G_p = 2134 - 6 \cdot 132,7 - 6 \cdot 217 - 6 \cdot 29,7 + 5 \cdot 52 = 117,6 \text{ ккал/моль.}$$

$$\Delta G_p = -RT \ln \text{PP}_{\text{обр}}; \quad -\lg \text{PP} = 60,3;$$

$$\text{PP} = [\text{Ca}^{2+}]^6 \cdot [\text{HSiO}_3^-]^6 \cdot [\text{OH}^-]^6;$$

$$-\lg \text{PP} = 6 \lg [\text{Ca}^{2+}] + 6 \lg [\text{HSiO}_3^-] + 6 \lg [\text{OH}^-] = 18 \lg [\text{Ca}^{2+}] = 60,3;$$

$$\lg [\text{Ca}^{2+}] = 4,65.$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 4,47 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л; } 6[\text{Ca}^{2+}] = 0,125 \text{ г/л.}$$

$$f_a = 0,75; \quad C_{\text{Ca}^{2+}} = 0,16 \text{ г/л по CaO.}$$

$$t = 175 - 180 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$[\text{HSiO}_3^-] = 4,47 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 6 = 0,161 \text{ г/л по SiO}_2.$$

$$f_a = 0,75; \quad C_{\text{SiO}_2} = 0,21 \text{ г/л по SiO}_2.$$

$$[\text{OH}^-] = 4,47 \cdot 10^{-4} \cdot 6 = 26,82 \cdot 10^{-4} = 2,68 \cdot 10^{-3};$$

$$-\lg [\text{OH}^-] = 3 - 0,43 = 2,54;$$

$$\text{pH} = 14 - 2,54 = 11,46 \approx 11,5.$$

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что нижние пределы температуры образования тоберморита и ксонотлита отличаются мало, что объясняет известные экспериментальные данные о совместном присутствии этих двух соединений в автоклавированных смесях извести и песка. Тот факт, что ксонотлит содержит всего 0,17 частей  $H_2O$  на одну часть  $SiO_2$ , а тоберморит – 1,1 часть  $H_2O$  соответственно, как будто свидетельствует о том, что ксонотлит является вторичной и более высокотемпературной фазой, чем тоберморит. Однако экспериментальные данные не дают четкого подтверждения этому предположению, так как и та, и другая фаза обнаруживаются совместно при 200 °С и даже 300 – 340 °С [134, 135, 144].

Ключом к решению вопроса о совместном присутствии тоберморита и ксонотлита в системе  $CaO-SiO_2-H_2O$  могут служить экспериментальные данные специалистов по геотермальным скважинам, которые установили, что в процессе добычи перегретого водяного пара в цементном кольце геотермальных скважин, состоящем из цементно-песчаного вяжущего, при температуре 200 – 300 °С образуется ксонотлит. Когда добыча пара по разным причинам (ремонтные и другие работы) временно прекращается и температура в скважине сильно снижается, ксонотлит превращается в тоберморит [144].

Когда добыча пара возобновляется, а цементный камень вновь нагревается до 200 °С и более, наблюдается обратный переход тоберморита в ксонотлит.

Многочисленные взаимные превращения этих фаз приводят к быстрому разрушению цементного кольца геотермальных скважин. Так, по данным [126], они выдерживают не более 15 – 20 циклов нагрева – охлаждения, после чего необходимы ремонтные работы.

Не исключено, что подобные превращения происходили и у авторов, опубликовавших результаты своих экспериментальных исследований системы  $CaO-SiO_2-H_2O$  при высоких температурах [134, 135].

Из изложенного можно сделать следующие выводы, имеющие практическое значение:

– в условиях автоклавирования силикатных и газосиликатных изделий при температуре 175 – 200 °С в них возможно образование как тоберморита (11,3Å), так и ксонотлита;

– повышение температуры способствует переходу тоберморита в ксонотлит, т.к. при этом снижается содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в жидкой фазе;

– охлаждение изделий после их автоклавирования способствует переходу части или всего ксонотлита в тоберморит, что сопровождается присоединением значительного количества воды к молекуле ксонотлита. Это может привести к локальному увеличению объема твердой фазы и отрицательно повлиять на физико-механические свойства материала. Превращению ксонотлита в тоберморит способствует также высокая влажность изделий, поэтому ее необходимо снижать;

– опыт эксплуатации гидротермальных скважин свидетельствует о том, что разрушение гидросиликатной связки при взаимных превращениях тоберморит ↔ ксонотлит наблюдается лишь после 10 – 15 циклов, поэтому это явление для газосиликатных изделий в большинстве случаев представляет ограниченную опасность.

### **3.2 Рентгено- и термографический анализы автоклавных ячеистых бетонов**

Для проверки вышеприведенных теоретических расчетов, идентификации и фазового анализа были отобраны пробы от газобетонных блоков автоклавного твердения марок по средней плотности D 400, D 500 и D 600.

Газобетонные блоки изготовлены из следующих сырьевых материалов:

– известь молотая, производства Россошанского завода Воронежской обл.

– порландцементы типа ЦЕМ I 42,5 ОАО «Себряковцемент», г. Михайловка Волгоградской обл., и ОАО «Щуровский цемент», г. Коломна, Московской обл.;

– песок карьера месторождения «Октябрьское», г. Коломна.

– алюминиевая пудра ПАП-2, производитель: ООО "СУАЛ-ПМ", Россия, г. Шелехов, Иркутской обл.

На рис. 3.2 – 3.5 приведены рентгенограммы исследуемых образцов.

Идентификация пиков РФА, эндо- и экзотермических эффектов на кривых ДТА производилась с использованием справочных данных, приведенных в [116, 117, 135].

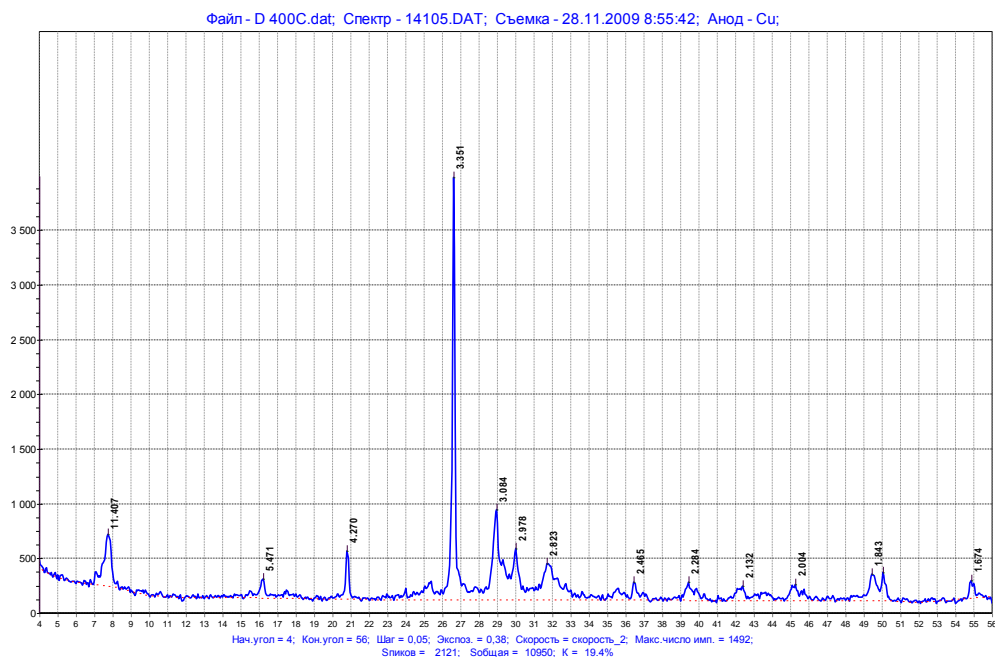


Рис. 3.2 – Рентгенограмма газобетона средней плотностью  $\rho=400\text{кг/м}^3$ , изготовленного с применением Себряковского цемента

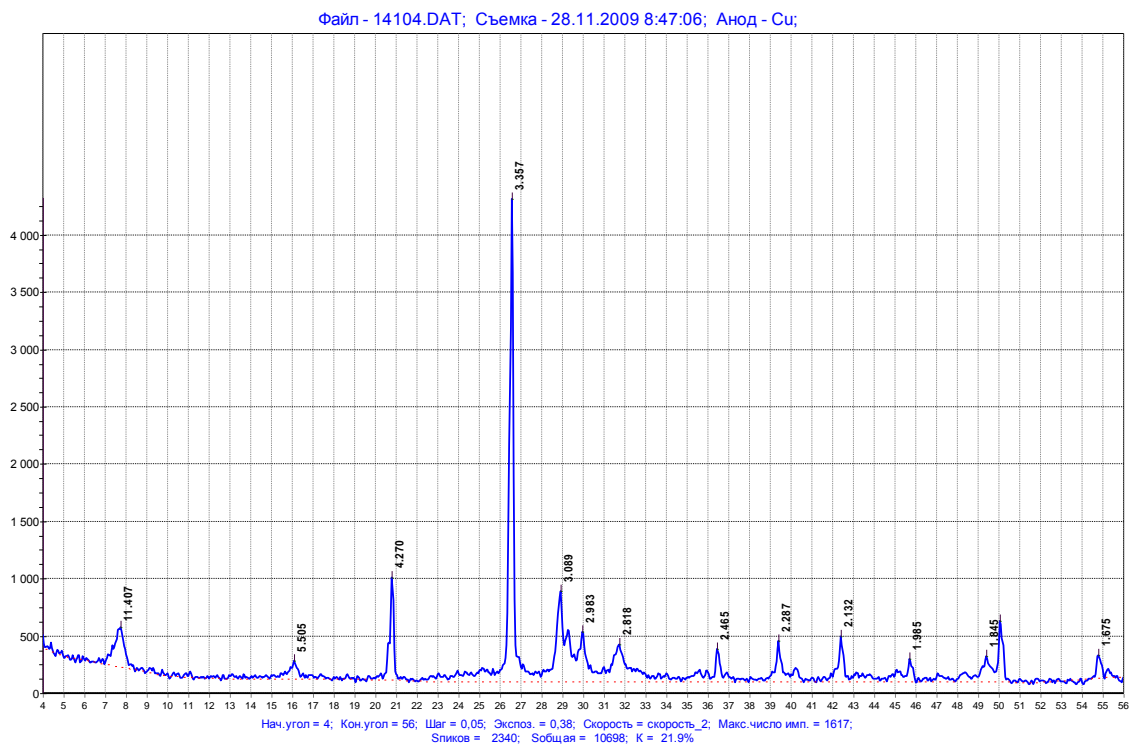


Рис. 3.3 – Рентгенограмма газобетона средней плотностью  $\rho=500\text{кг/м}^3$ ,  
изготовленного с применением Себряковского цемента

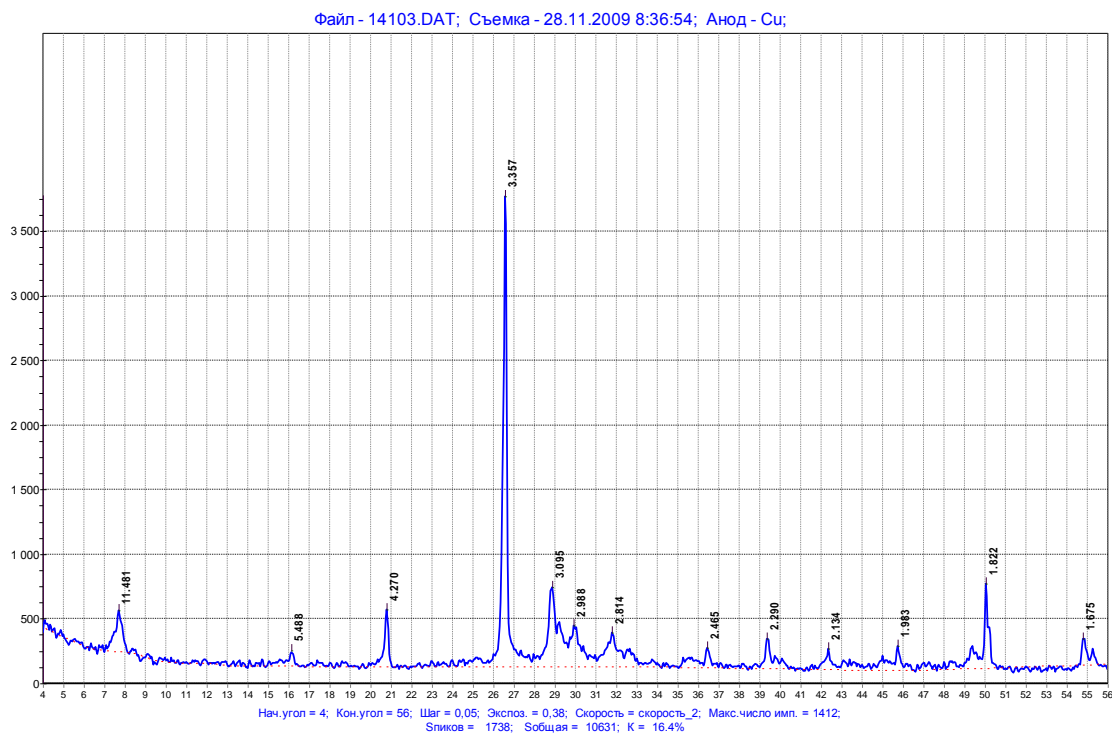


Рис. 3.4 – Рентгенограмма газобетона средней плотностью  $\rho=600\text{кг/м}^3$ ,  
изготовленного с применением Себряковского цемента

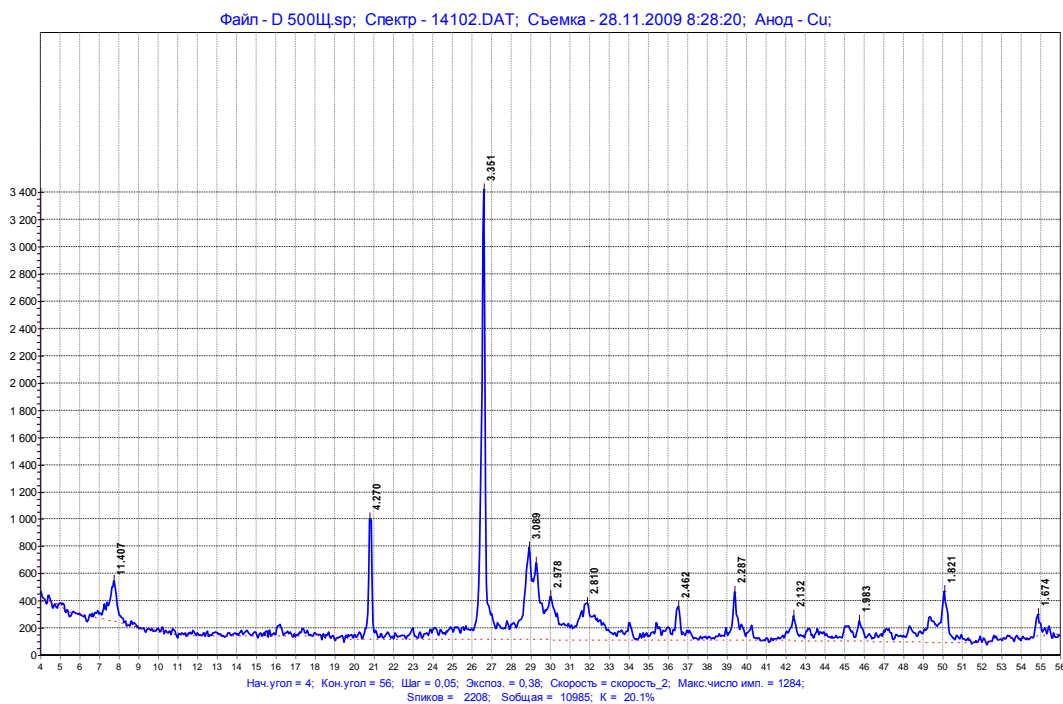


Рис. 3.5 – Рентгенограмма газобетона средней плотностью  $\rho=500\text{кг/м}^3$ , изготовленного с применением Щуровского цемента

Как видно из рентгенограмм, все исследованные образцы содержат тоберморит  $11,3 \text{ \AA}$  (пик  $11,4 \text{ \AA}$ ). Этот довольно интенсивный пик имеет ступенчатый характер, отличается повышенным отношением ширины к высоте, что свидетельствует о плохой закристаллизованности и неоднородном составе тоберморита. По-мере увеличения средней плотности образцов (от  $400$  до  $600 \text{ кг/м}^3$ ), изготовленных с применением Себряковского цемента, интенсивность пика  $11,4 \text{ \AA}$  снижается от  $469$  до  $323$  единиц (рис. 3.6).

У образцов марки по средней плотности D 500, изготовленных с добавлением цемента Щуровского завода, интенсивность этого пика равна  $293$  против  $341$  у газобетона с той же маркой по средней плотности, изготовленного с добавлением Себряковского цемента.

Пики  $3,08 \text{ \AA}$  на рентгенограммах всех образцов является основным диагностическим признаком ксонотлита ( $3,07 \text{ \AA}$ ). По высоте этот пик в  $1,5$

– 2 раза выше пика 11,4 Å, что говорит в пользу того, что ксонотлит является преобладающей гидратной фазой в системе.

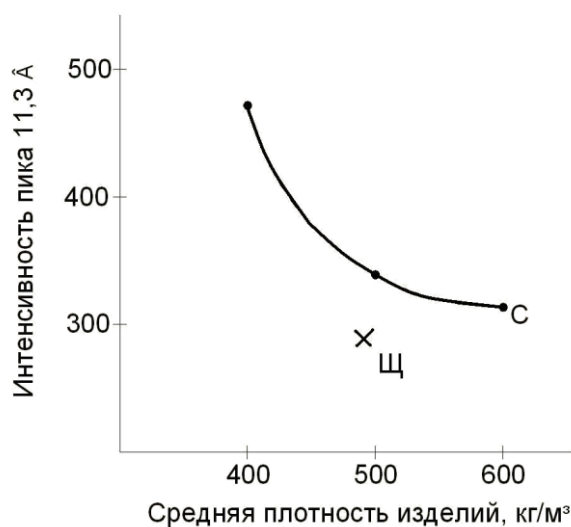


Рис. 3.6 – График зависимости содержания тоберморита от средней плотности газобетона

Содержание ксонотлита в образцах так же, как и тоберморита снижается с ростом их средней плотности в пределах D 400 – D 600 от 824 до 613 единиц (рис. 3.7). Такая закономерность изменения содержания гидросиликатной связки в газобетонах объясняется тем, что с уменьшением плотности в образцах возрастает содержание извести, и улучшаются условия протекания гетерогенных реакций взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которые находятся под диффузионным контролем, благодаря увеличенной пористости.

О наличии ксонотлита в системе говорит и наличие довольно интенсивного пика 2,8 Å. Таким образом, преобладающим гидросиликатом кальция в исследованных нами материалах является ксонотлит.



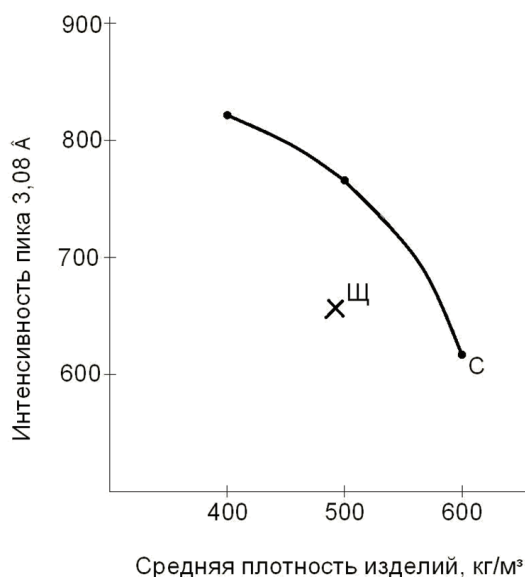


Рис. 3.7 – График зависимости содержания ксонотлита от средней плотности газобетона

Сдвоенный пик при  $1,82 - 1,86 \text{ \AA}$  с интенсивностью  $240 - 250$  единиц принадлежит тобермориту  $11,3 (1,83 \text{ \AA})$ .

Слабый широкий пик  $5,47 - 5,5 \text{ \AA}$  принадлежит гидрогранатам, гидроалюминатным соединениям, к числу которых относится моносulfатная форма гидросulfоалюмината кальция  $C_3A\bar{S}H_{12}$  (рис. 3.8).

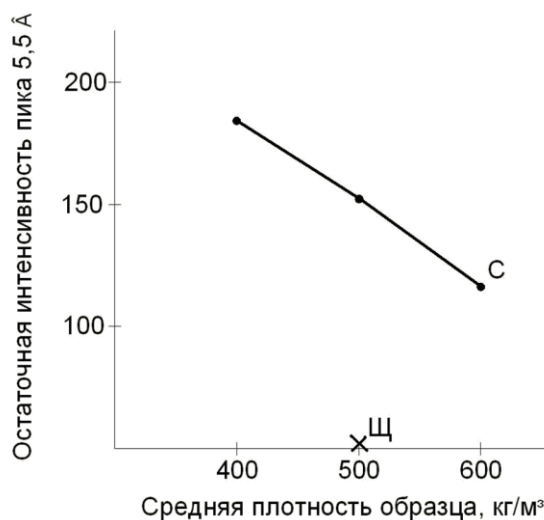


Рис. 3.8 – Зависимость содержания моносulfата кальция от средней плотности газобетона

Судя по небольшой интенсивности пика  $5,5 \text{ \AA}$ , этих соединений в образцах мало. Содержание указанных фаз в образцах, изготовленных с применением Себряковского цемента, что видно из рис. 3.8 уменьшается по-мере роста средней плотности газобетона.

Интересно, что в бетоне D 500, содержащем цемент Щуровского завода, пик  $5,5 \text{ \AA}$  отсутствует. Причина этого не ясна.

На рентгенограммах всех образцов имеется пик  $4,27 \text{ \AA}$ , который может принадлежать как кварцу, так и ксонотлиту, рис. 3.9.

У кривой РФА газобетона D 500 с добавкой Себряковского цемента этот пик максимален по высоте и имеет ступенчатую форму. Возможно, у этого образца есть как тот, так и другой минералы, а в большинстве других этот пик принадлежит кварцу.

На всех рентгенограммах самым интенсивным и острым является пик кварца  $3,37 \text{ \AA}$ . Четкой зависимости между его высотой и маркой газобетона по плотности нет.

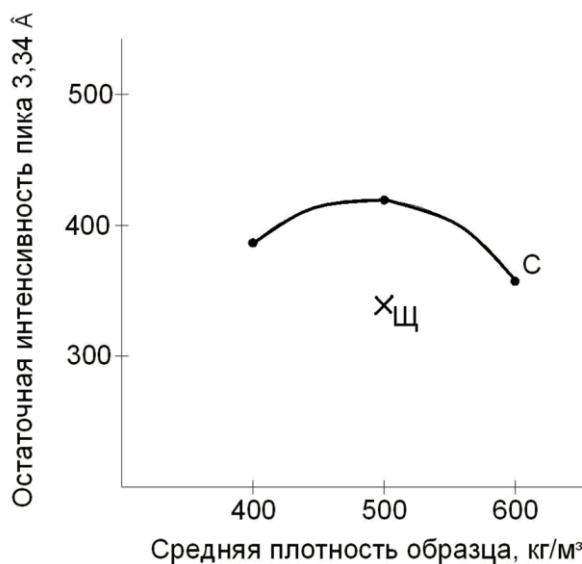


Рис. 3.9 – Зависимость содержания остаточного кварца от средней плотности газобетона

И наконец, слабые пики  $2,20 - 2,30 \text{ \AA}$  принадлежат гидрогранатам типа  $C_3ASH_4 - C_3AS_2H_2$ . К сожалению, они совпадают с аналогичными

пиками кварца, поэтому РФА не дает однозначной информации о наличии в системе этих соединений. Слабость этих пиков не позволяет установить зависимость их высоты от средней плотности газобетона.

Для уточнения приведенных данных был выполнен термографический анализ образцов, подвергнутых рентгенофазовому анализу. На рис. 3.10 – 3.21 приведены их термограммы (Т, ДТА, ДТG).

Анализ термограмм приводит к следующим выводам.

Интенсивный и широкий эндотермический эффект с максимумом при 140 – 168 °С вызван удалением адсорбированной воды из образцов. Зависимость температуры максимума этих эффектов от плотности, приведенная на рис. 3.11, 3.14, 3.17 показывает, что в ряду D 400 → D 500 → D 600 эта температура уменьшается от 168,3 до 156,6 и 149,3 °С. Таким образом, чем ниже плотность газобетона, тем прочнее он удерживает молекулы воды.

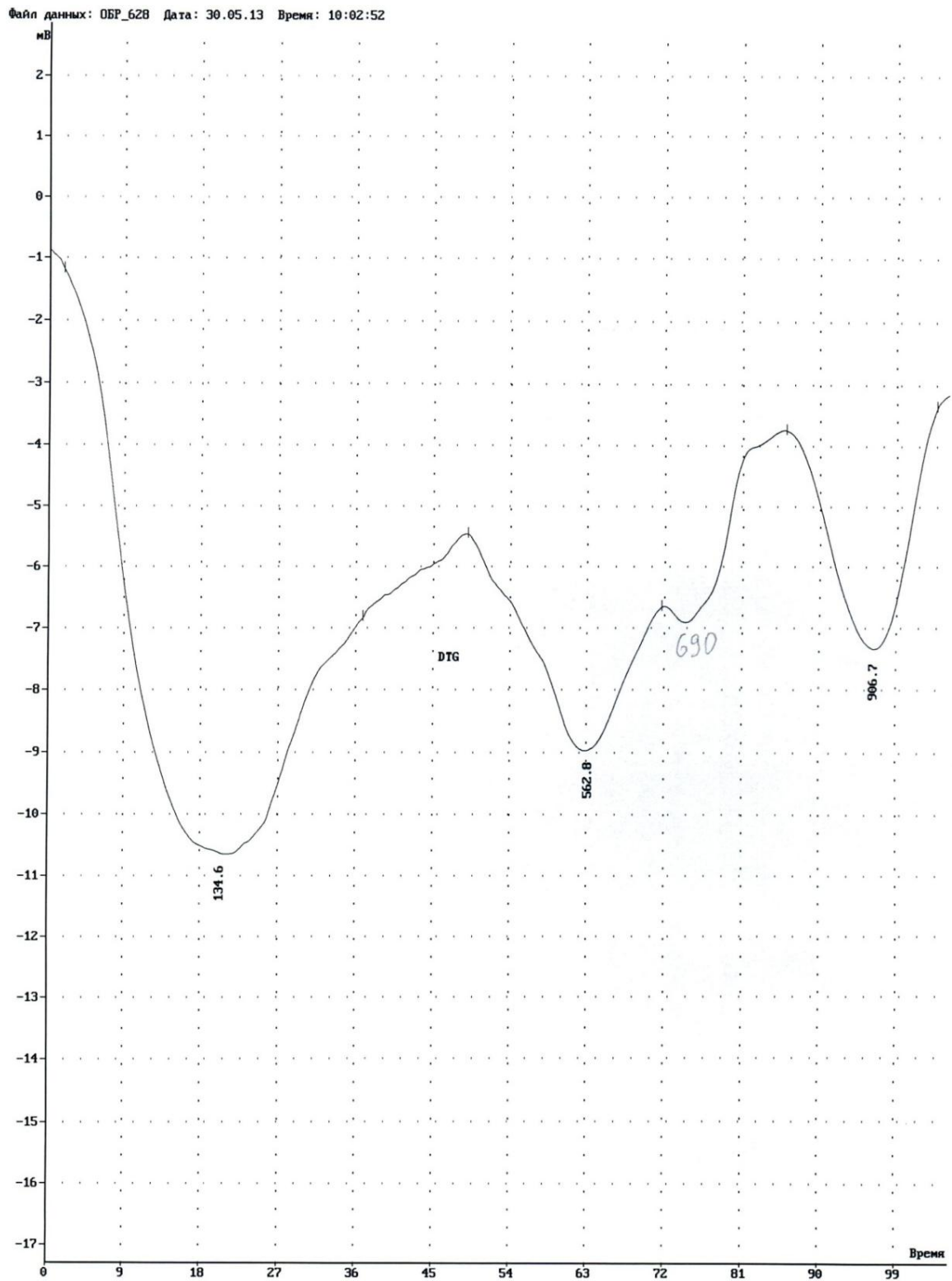


Рис. 3.10 – Кривая DTG образца, имеющего среднюю плотность 500 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Щуровского цемента

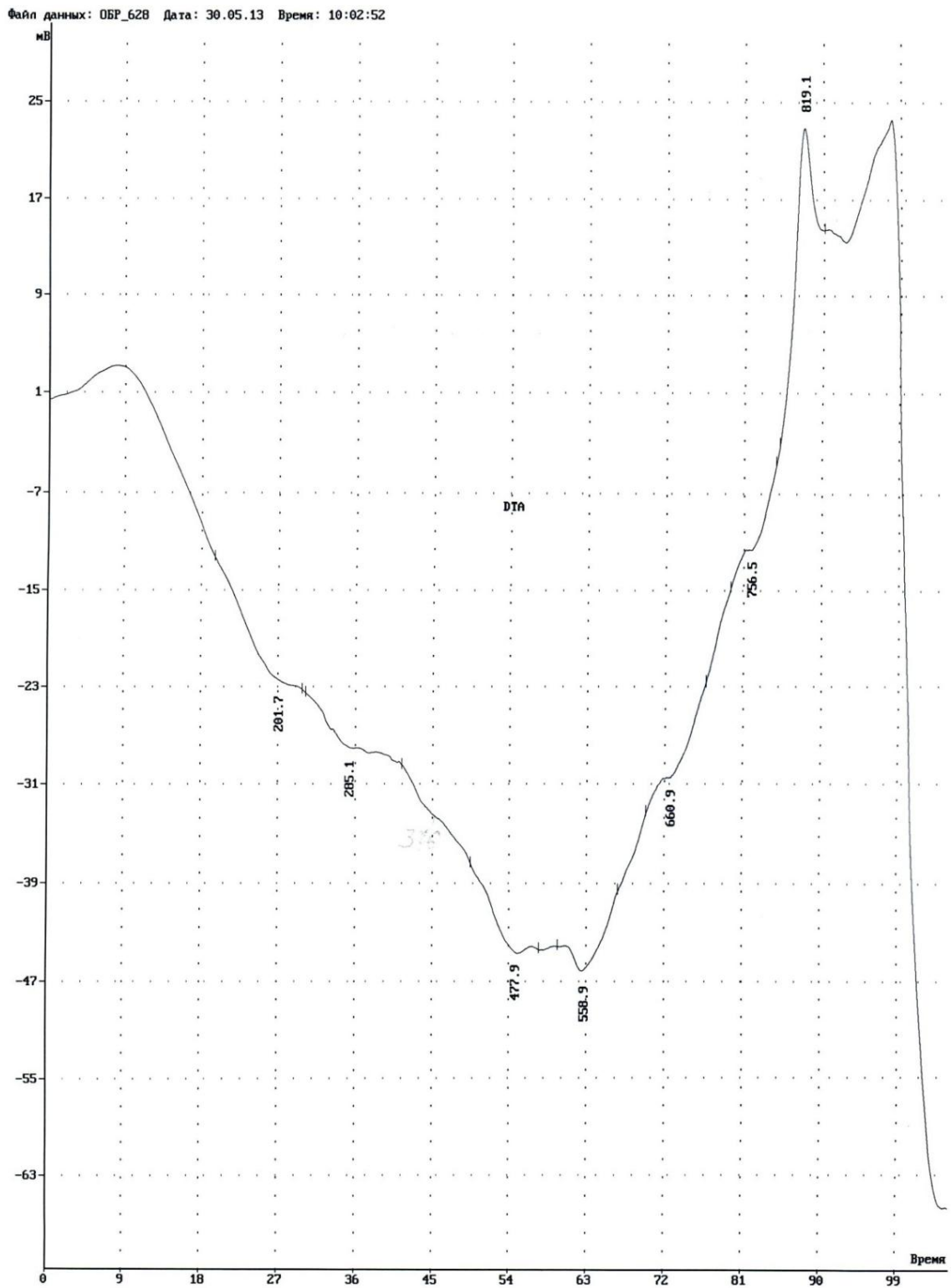


Рис. 3.11 – Кривая ДТА газобетона со средней плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>,  
изготовленного с применением Щуровского цемента

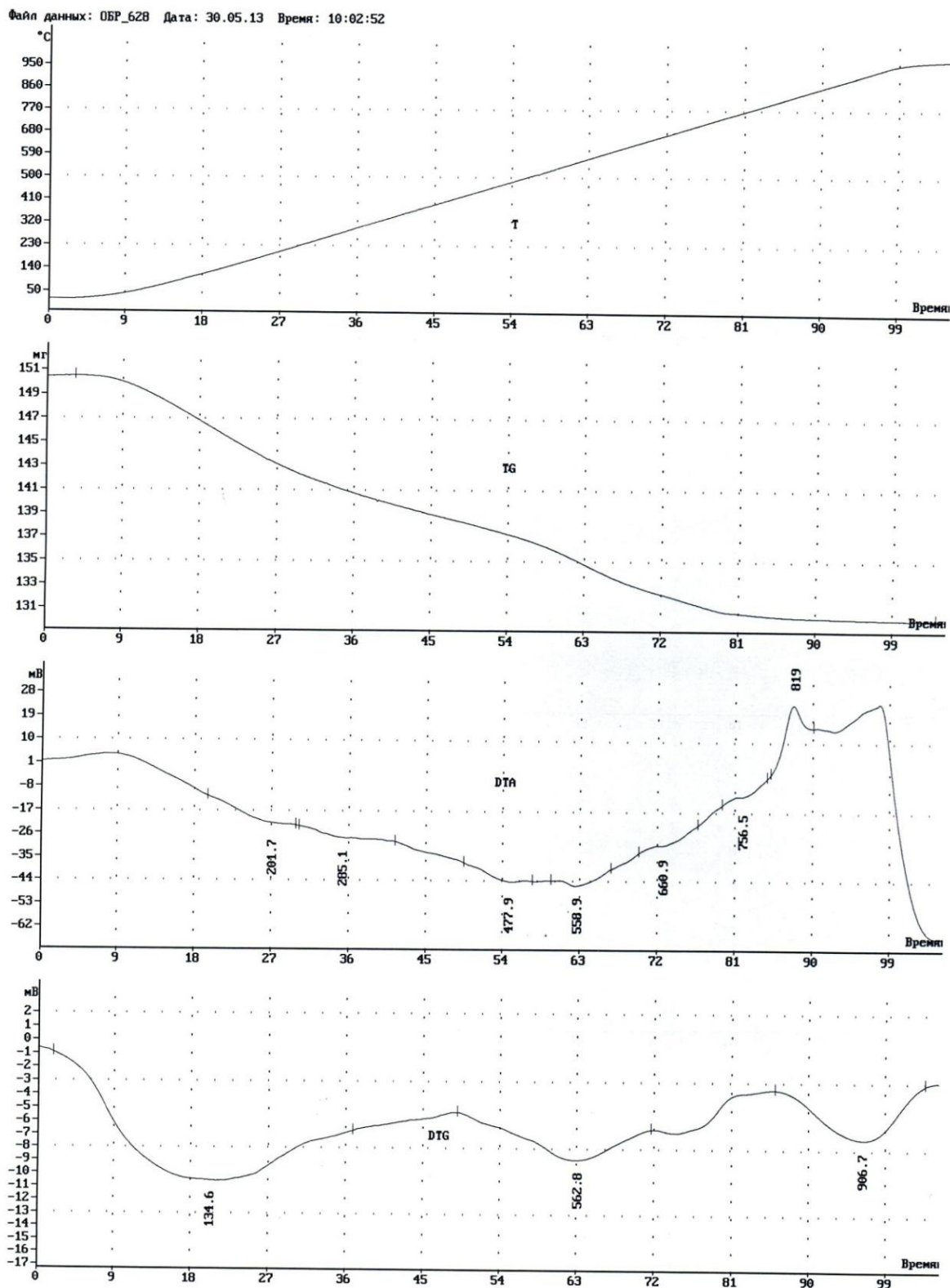


Рис. 3.12 – Графики T, TG, DTA и DTG как функции времени образца газобетона со средней плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Щуровского цемента

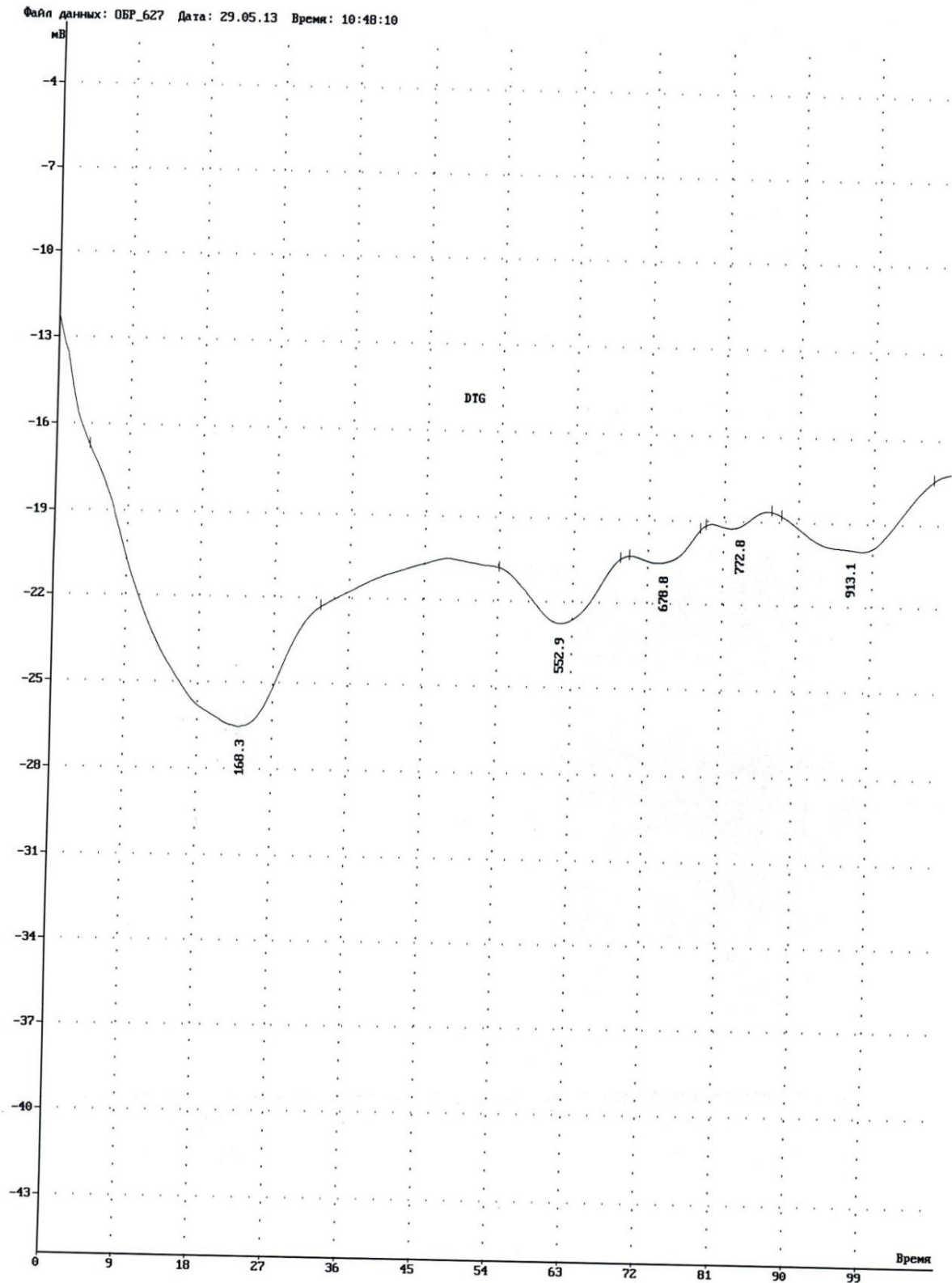


Рис. 3.13 – Кривая DTG образца, имеющего среднюю плотность 400 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Себряковского цемента

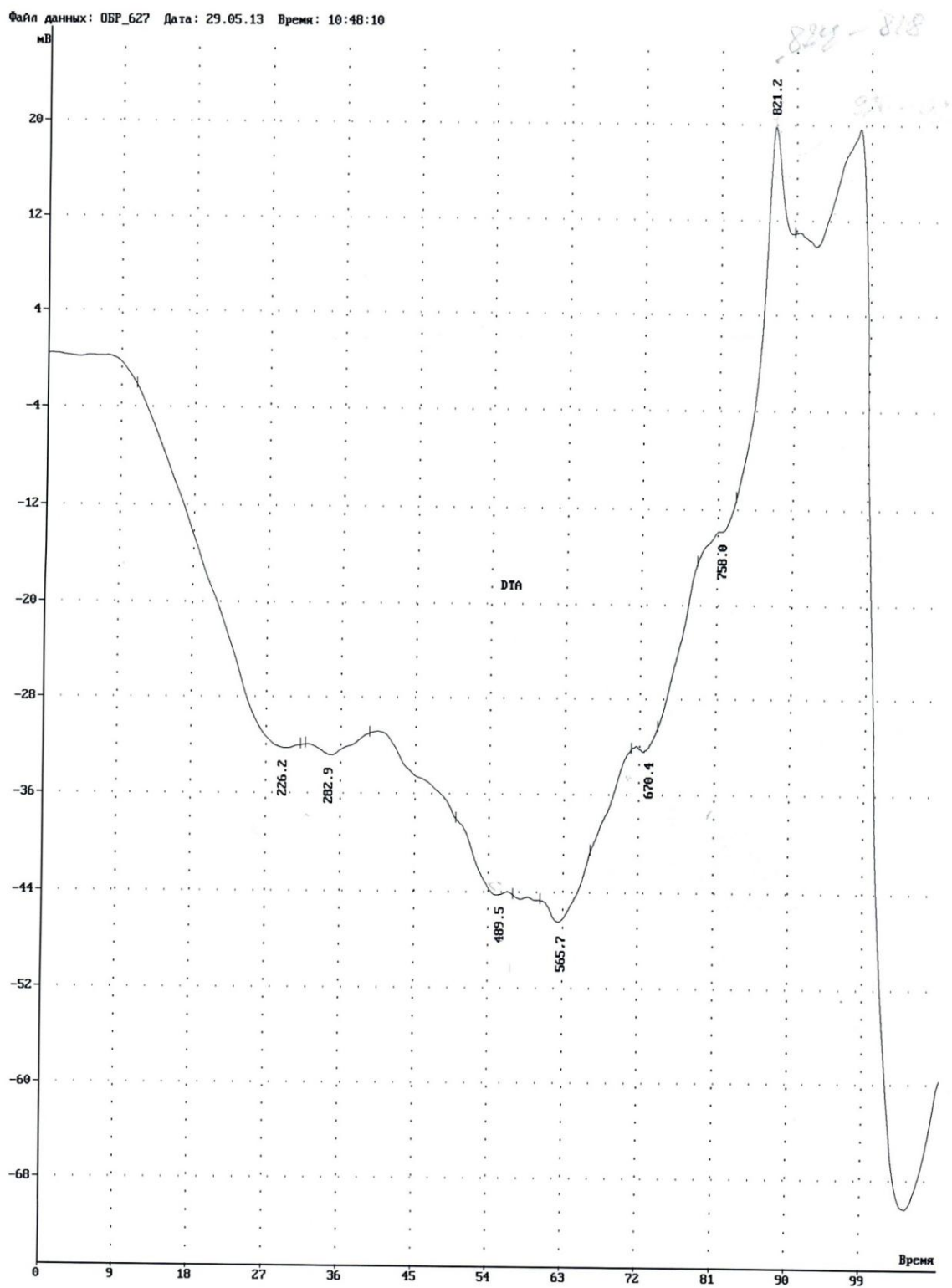


Рис. 3.14 – Кривая ДТА газобетона со средней плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>,  
изготовленного с применением Себряковского цемента



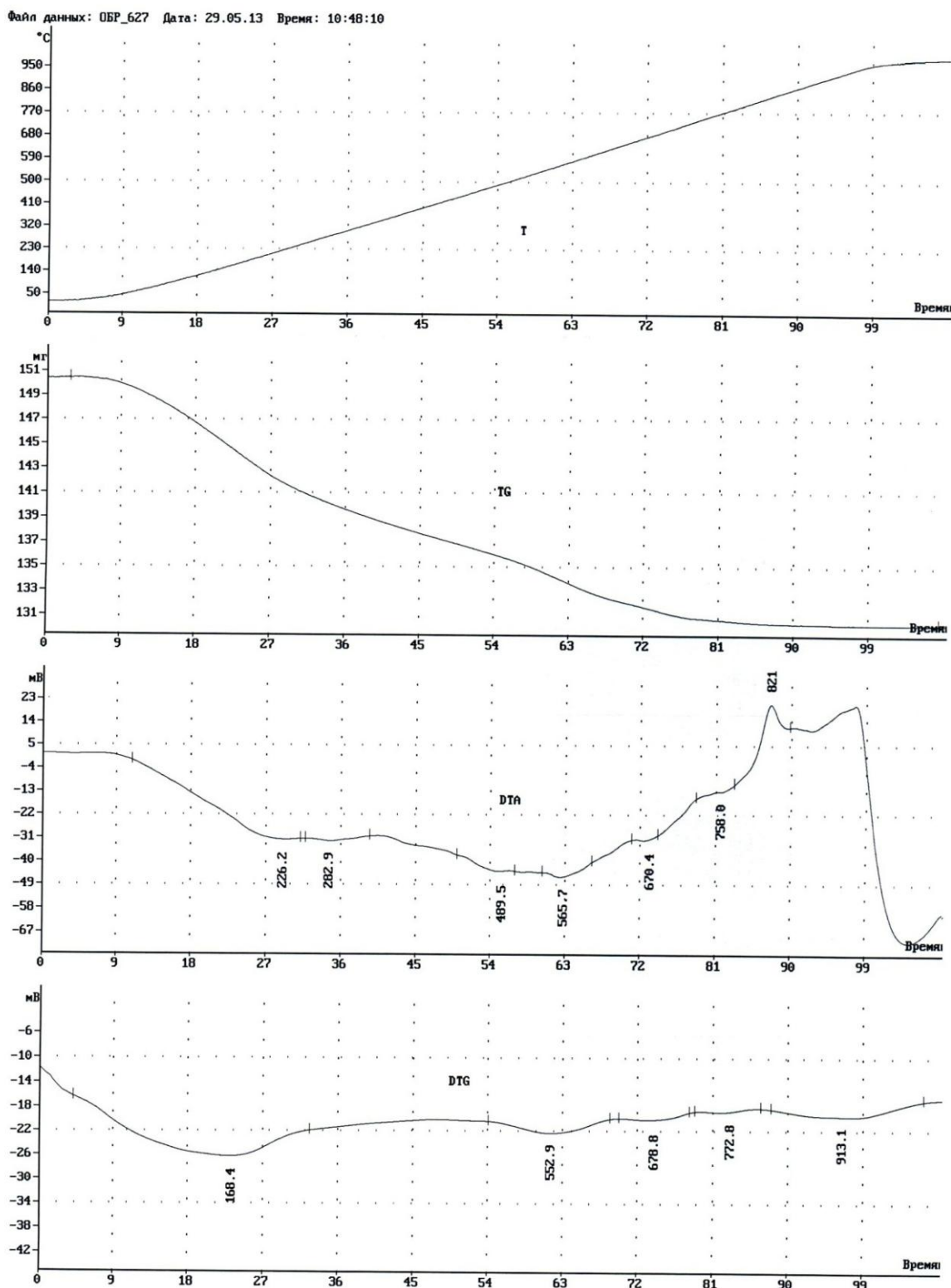


Рис. 3.15 – Графики T, TG, DTA и DTG как функции времени образца газобетона со средней плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Себряковского цемента

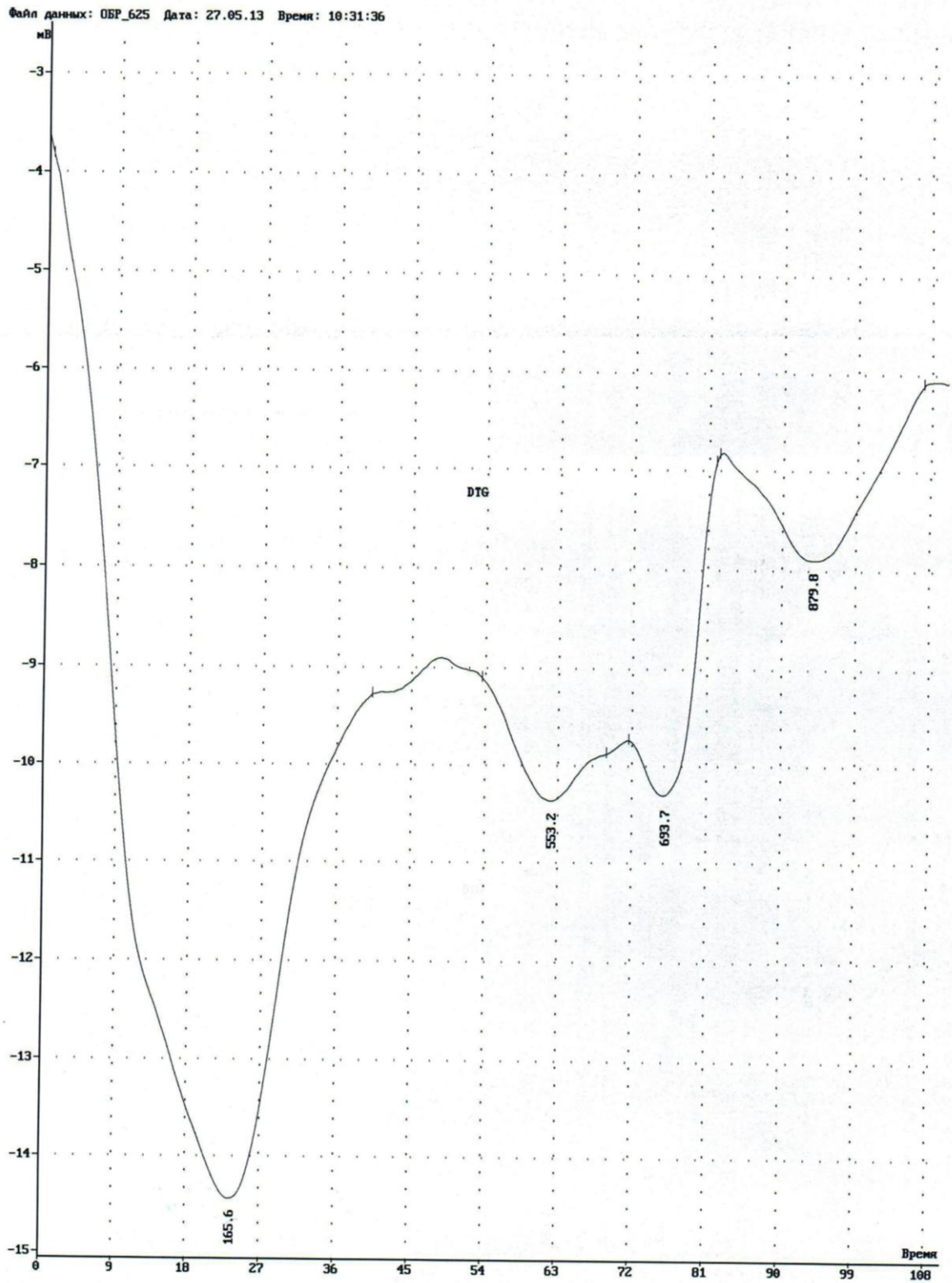


Рис. 3.16 – Кривая DTG образца, имеющего среднюю плотность 500 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Себряковского цемента

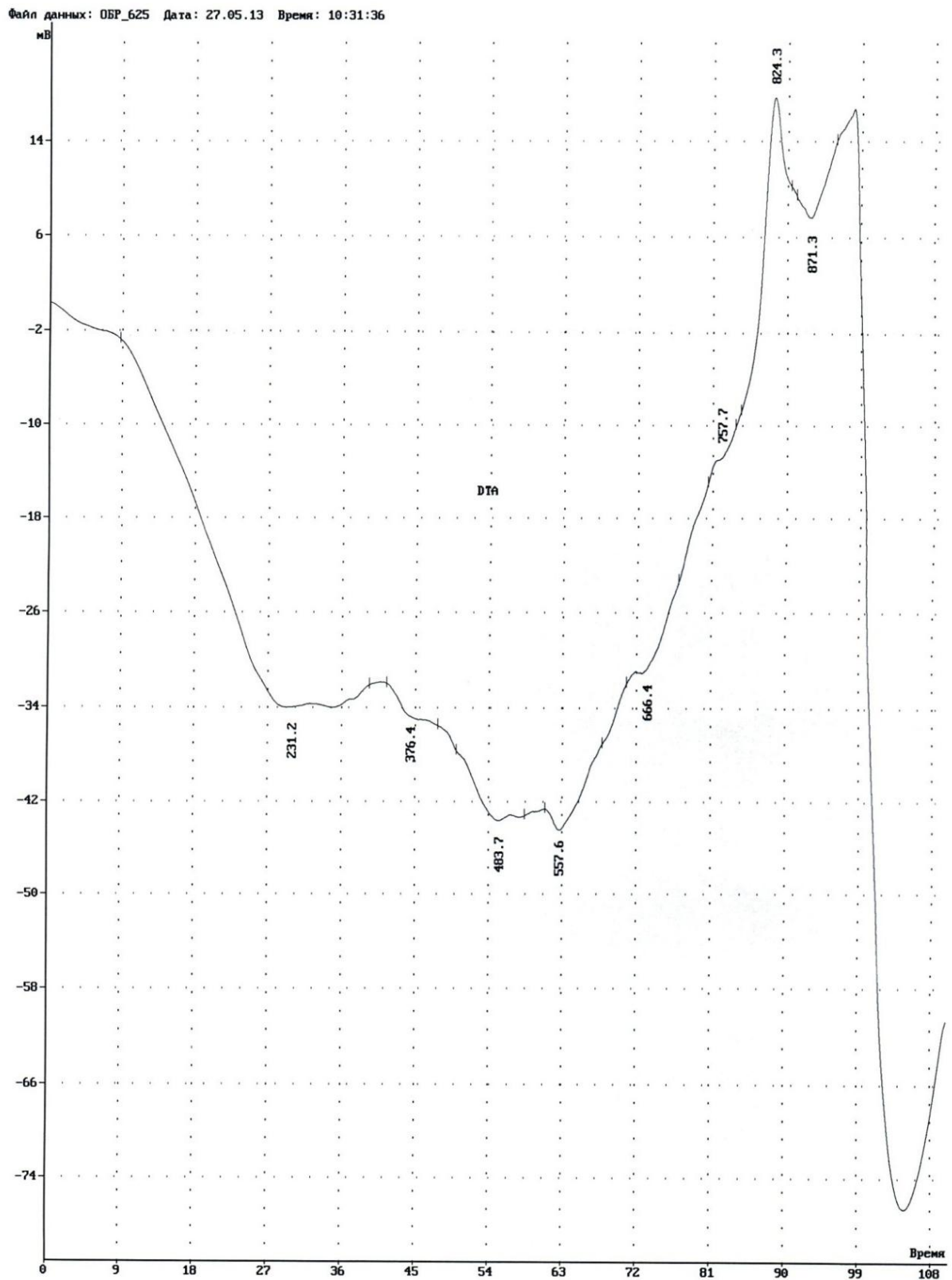


Рис. 3.17 – Кривая ДТА газобетона со средней плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>,  
изготовленного с применением Себряковского цемента

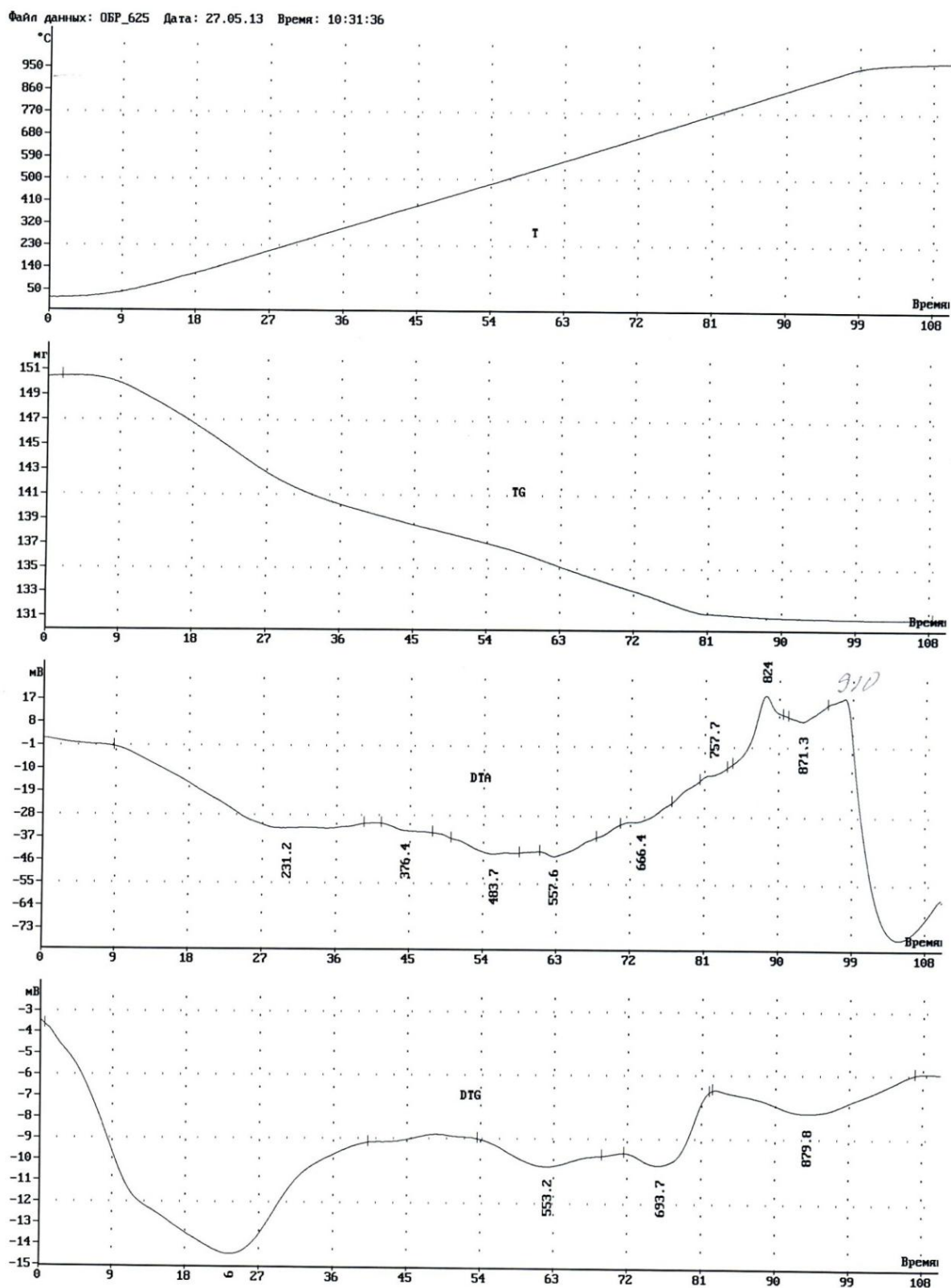


Рис. 3.18 – Графики T, TG, DTA и DTG как функции времени образца газобетона со средней плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Себряковского цемента

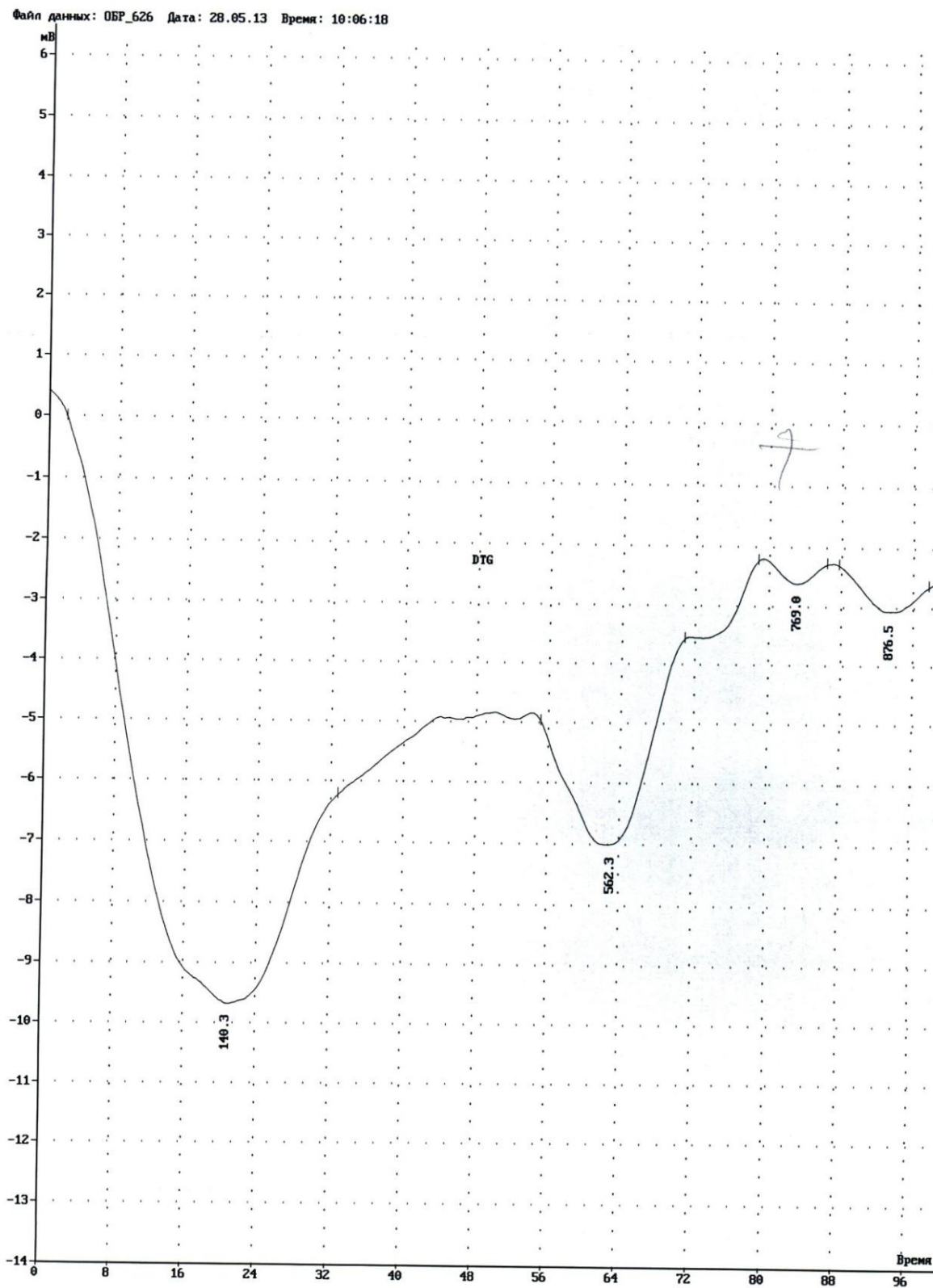


Рис. 3.19 – Кривая DTG образца, имеющего среднюю плотность 600 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Себряковского цемента

Файл данных: ОБР\_626 Дата: 28.05.13 Время: 10:06:18

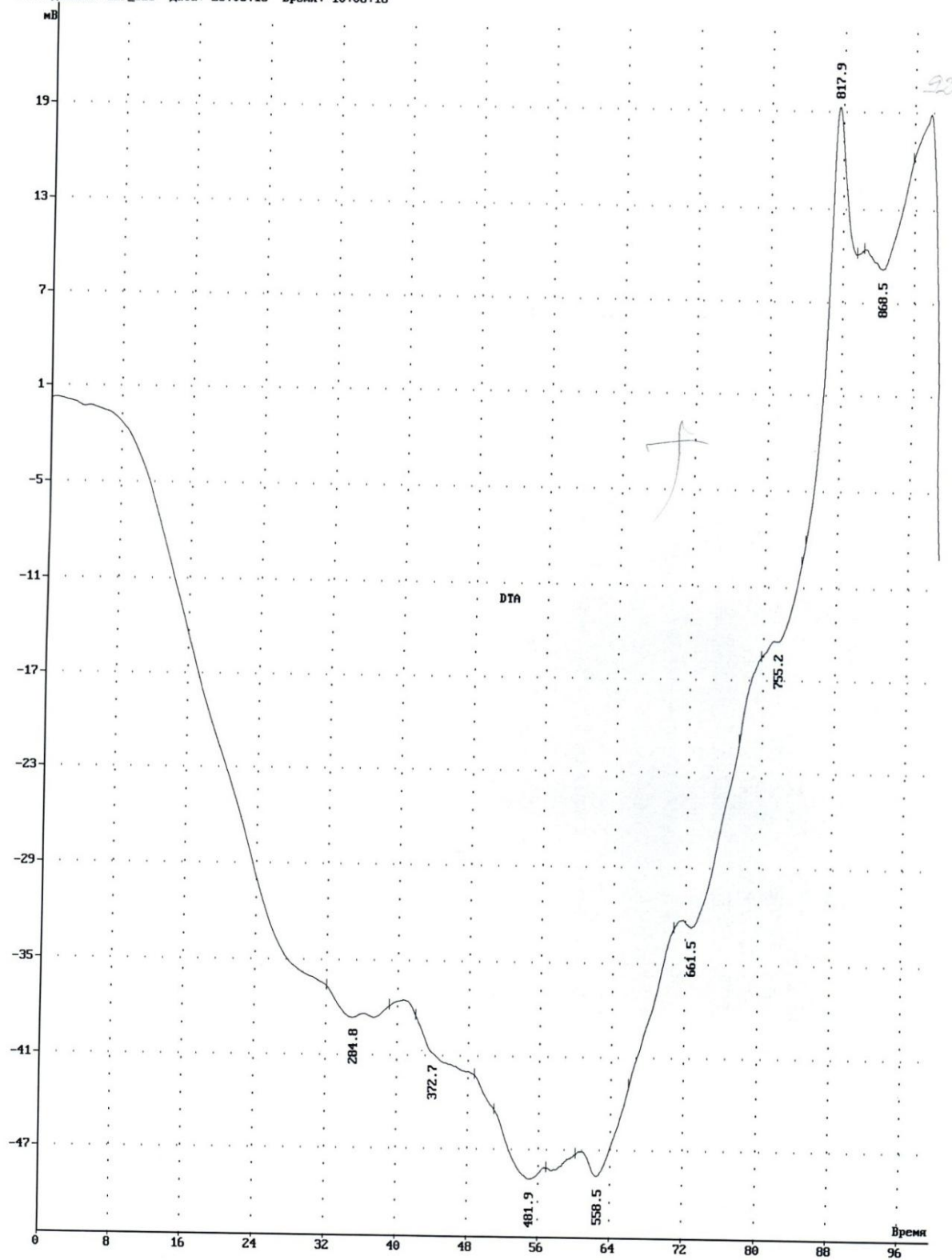


Рис. 3.20 – Кривая ДТА газобетона со средней плотностью 600 кг/м<sup>3</sup>,  
изготовленного с применением Себряковского цемента



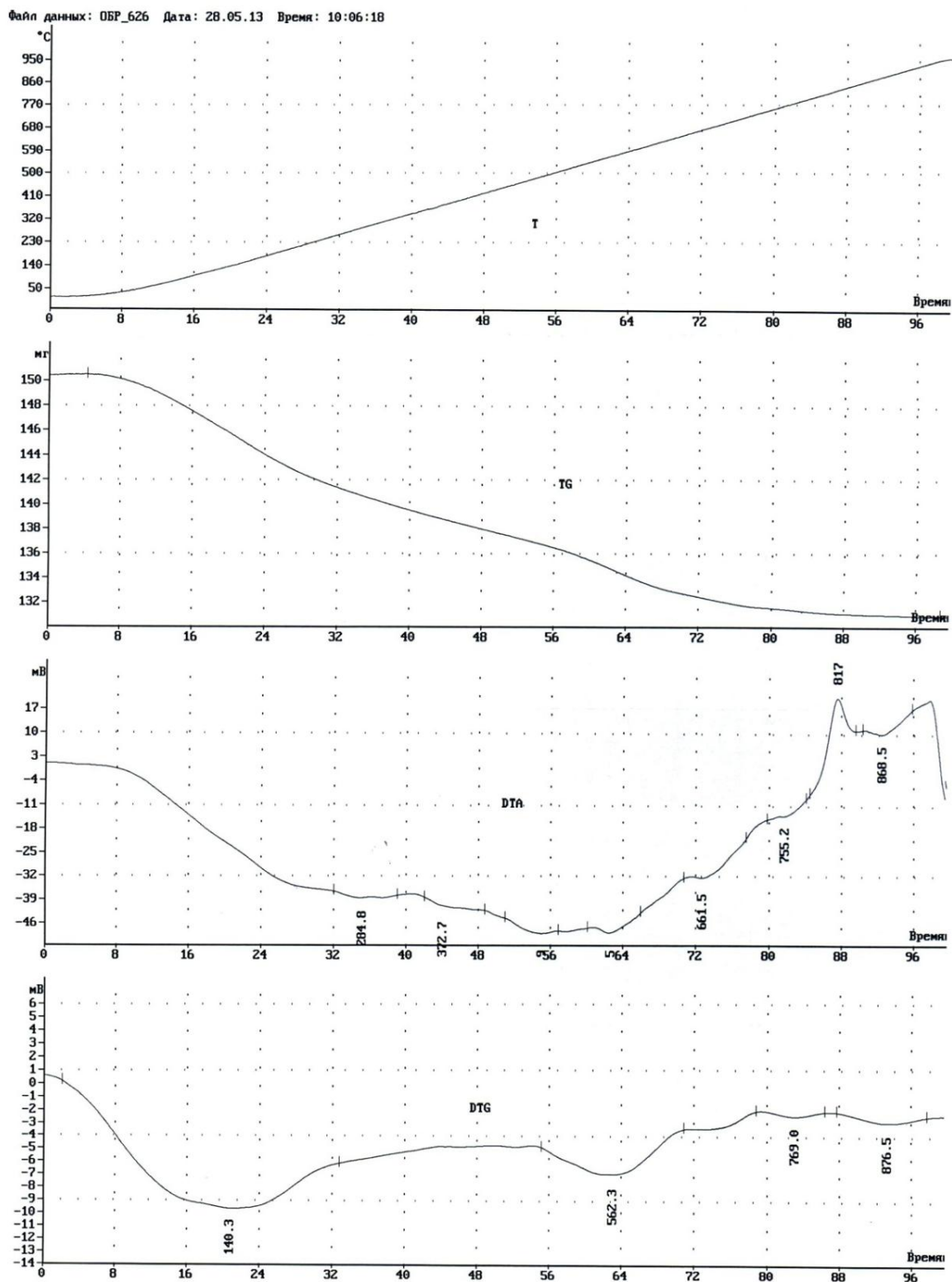


Рис. 3.21 – Графики T, TG, DTA и DTG как функции времени образца газобетона со средней плотностью 600 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного с применением Себряковского цемента

Эндотермические эффекты при температурах 226 – 230 °С и 489,5 – 481,9 °С обусловлены дегидратацией, (точнее дегидроксилизацией) гексагональных гидроалюминатных фаз ряда  $C_4AH_{13}$  –  $C_3A\bar{S}H_{12}$ . Температура первого эффекта возрастает с увеличением средней плотности образцов, а второго – снижается.

Эндоэффект при 282,9 – 283 – 284,8 °С и 483,7 – 482 – 489,5 и 665 – 618 °С обусловлены дегидратацией гидрогранатов кальция  $C_3AS_2H_2$ .

Эндоэффект при 557 – 567 °С очевидно вызван полиморфным превращением  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц.

Слабые эндоэффекты при 755 – 757 °С обусловлены декарбонизацией  $CaCO_3$ .

Интенсивный экзотермический эффект при температуре 818 – 824 °С вызван присутствием тоберморита 13,3 Å, который при этой температуре окончательно теряет остатки воды, после чего на его основе кристаллизуется волластонит. Считается, что температура этого экзоэффекта возрастает с увеличением основности тоберморита. Из этого следует, что максимальная основность у тоберморита из образца D 500, хотя это должно бы быть у D 400. Есть данные, что температура экзоэффекта повышается также при внедрении ионов  $Al^{3+}$  в структуру тоберморита.

Наконец, интенсивный экзоэффект при температуре 920 – 930 °С, по видимому обусловлен ускорением твердофазового взаимодействия алюминатных фаз с кварцем либо с CaO в результате  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения  $Al_2O_3$  (эффект Хедвалла [145]).

Таким образом, данные РФА и ДТА с ДТG согласуются между собой и свидетельствуют о том, что основными связующими газобетонных материалов с маркой по средней плотности D 400 – D 600 является тоберморит 11,3 Å, ксонотлит и возможно моносольфоалюминат кальция.



Наличие гидрогранатов под вопросом, так как их пики накладываются на отражения кварца и их эндоэффекты ДТА очень слабы.

Плотность изделий накладывает заметное влияние на содержание и состав гидратных фаз, но это не носит принципиального характера.

Процессы гидратного фазообразования на 20 – 40 % более полно произошли в образцах D 400 в сравнении с D 600.

Снижение плотности с параллельным увеличением основности смеси  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-SiO}_2$  приводит к повышенному содержанию в образцах как тоберморита, так и ксонотлита благодаря облегчению диффузии ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и других в системе. Уменьшение плотности и основности смесей должно усиливать переход тоберморита в ксонотлит, однако приведенные экспериментальные данные пока это не подтверждают.

Заслуживает внимания тот факт, что содержание тоберморита, ксонотлита и гидроалюминатных фаз закономерно убывает с уменьшением средней плотности образцов, тогда как содержание остаточного кварца максимально при плотности  $500 \text{ кг/м}^3$ . Очевидно, этот образец производственного изготовления изначально имел отклонения в содержании кварца в сторону завышения, либо песок, используемый в его составе, был недоизмельчен.

### **3.3 Тепловыделение при образовании гидросиликатной связки**

#### **3.3.1 Термодинамический анализ фазового состава гидросиликатной связки автоклавного газобетона**

Известно, что процессы взаимодействия гидроксида кальция с тонкоизмельченным кварцем при автоклавной обработке с образованием гидросиликатов кальция сопровождаются тепловыделением. Численное значение тепловыделения этого процесса очень сложно измерить

экспериментальными методами, поэтому здесь необходим теоретический подход.

Результаты таких расчетов приведены в книге [136] в виде графиков. Для реакции образования тоберморита из гидроксида кальция и кварца при температуре 179°C получена величина  $\Delta H_p = 30 - 31$  ккал/моль. Позднее авторы работы получили для этой реакции  $\Delta H_p = 20 - 25$  ккал/моль.

Ниже излагаются результаты расчета не только тоберморита, но и ксонотлита при температуре 180°C.

Принимаем следующие численные значения энтальпии образования, а также теплоемкости тоберморита и межфазных соединений, из которых он образуется, ккал (кДж)/моль [136]:

$$\Delta H_{298T6}^0 = 2556 (10684);$$

$$C_p = 110,6 + 189 \cdot T \cdot 10^{-3} (462,3 + 0,79 \cdot T)$$

$$\Delta H_{SiO_2}^0 = 217,7 (910);$$

$$C_p = 11,7 + 8,2 \cdot T \cdot 10^{-3} (52,4 + 34,3 \cdot 10^{-3} \cdot T)$$

$$\Delta H_{Ca(OH)_2}^0 = 235,5 (983,5);$$

$$C_p = 19,0 + 10,8 \cdot T \cdot 10^{-3} (79,4 + 45,1 \cdot T \cdot 10^{-3})$$

Величина стандартной энтропии  $S_{298}^0$  равна, кал/моль (Дж/моль): тоберморита 146 (610,3); кварца 10,0 (41,8);  $Ca(OH)_2 - 20$  (83,6).

Расчет энтальпии реакции синтеза тоберморита и ксонотлита при температуре 180 °C производим по [136]:

1. Рассчитываем энтальпию  $H_{298}$  реакции



$$\Delta H_{298} = -\frac{2556,3}{5} + 235,3 + 1,2 \cdot 217,7 + 0,1 \cdot 68,3 = -7,9 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$$

2. Изменение энтропии процесса:

$$\Delta S_{298}^0 = \frac{146}{5} - 20 - 1,2 \cdot 10 - 0,1 \cdot 16,7 = 4,47 \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

3. Теплоемкость тоберморита при 180 °С равна:

$$C_p = 110,6 + 189 \cdot 453 \cdot 10^{-3} = 196,2 \text{ кал/моль} \cdot \text{К}$$

4. Молекулярная масса тоберморита:

$$M_{\text{тб}} = 146,8 \text{ Дт}$$

где Дт – Дальтон.

5. Рассчитываем изменения теплоемкости при реакции:

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot T + \Delta c \cdot T^{-2} = 67,15 + 158,6 \cdot 10^{-3} \cdot T = 71,9 \text{ кал/моль} \cdot \text{К}$$

6. Теперь рассчитываем тепловыделение реакции при 180°С:

$$\begin{aligned} \Delta H_T &= \Delta H_{298} + \int_{298}^{458} \Delta C_p \cdot dT = 7,9 \cdot 103 + 160(67,15 + 158,6 \cdot 103 \cdot 453) = \\ &= 7,9 \cdot 103 + 160(67,15 + 71,84) = 7,9 \cdot 103 + 22,2 \cdot 103 = \\ &= 30,1 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} = 125,8 \text{ кДж/моль.} \end{aligned}$$

Таким образом, результаты расчета тепловыделения тоберморита совпали с данными [136].

Теперь рассчитаем, насколько повысится температура в автоклаве в результате такого тепловыделения.

Для этого рассчитываем удельную теплоемкость тоберморита:

$$C_{p \text{ уд}} = \frac{196,2}{146,8} = 1,33 \frac{\text{кал}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\Delta H_{m\bar{o}} = C_p \cdot \Delta t \cdot m$$

Здесь  $m=1$  кг, поэтому  $\Delta t = \frac{30,1}{1,33} = 22,6^\circ \text{C}$ .

Так как теплоемкость тоберморита несколько выше, чем исходных компонентов, из которых он образуется, принимаем  $\Delta t=23^\circ \text{C}$ .

Таким же способом рассчитываем тепловыделение при синтезе ксонотлита.

Рассмотрим реакцию:



$$\Delta H_{\text{КС}}^0 = 2396,7 \text{ ккал/моль} (10018,2 \text{ кДж/моль})$$

$$S_{\text{КС}}^0 = \frac{21,3}{6} = 20,25 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{K}} \left( 84,6 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$$

Остальные исходные данные для расчета приведены выше.

$$\Delta H_{298\text{p}} = -2396,7 - 5 \cdot 68,3 + 6 \cdot 235,3 + 6 \cdot 217,8 = -13,6 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$$

$$\Delta H_{\text{КС}} = -\frac{13,6}{6} = -2,27 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$$

$$\Delta S_{\text{p453}} = 20,25 + 0,8 \cdot 16,7 - 20 - 10 = 3,61 \text{ кал/моль} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$C_{\text{ркс}} = 132,25 + 65,2 - 18,35 \cdot 10^{-3} = 197,5 \text{ кал/моль} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\Delta a = 132,25 - 19 - 11,2 - 0,17 \cdot 12,65 = 180 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{К}}$$

$$\Delta b = 65,2 - 10,8 - 8,2 - 11,4 = 34,8$$

$$\Delta H_T = \Delta H_{298} + \int_{298}^{453} \Delta C_p \cdot dT = -2,27 \cdot 10^{-3} + 155(100 + 34,8 \cdot 453 \cdot 10^{-3}) =$$

$$\frac{22,9 \text{ ккал}}{\text{моль}} = 95,7 \text{ Дж/моль}$$

$$M_{\text{кс}} = 113 \text{ ДТ}$$

$$C_p = 1,74 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{К}} = 95,7 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta H_{\text{уд}} = \frac{95,7 \cdot 10^3}{113} = 8,47 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг}$$

$$\Delta t = \frac{8,47 \cdot 10^2}{7,27} = 11,7 \sim 12 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Результаты расчетов показывают, что энтальпия образования ксонотлита из  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и кварца в полтора раза ниже, чем тоберморита. В работе [146] показано, что изменение энтальпии в изотермических условиях с небольшой поправкой равно тепловыделению вяжущих систем. Отсюда следует вывод, что тепловыделение при синтезе тоберморита 11,3  $\text{А}$  как силикатной связки ячеистых бетонов автоклавного твердения гораздо больше, чем ксонотлита.

Таким образом, судя по произведенным расчетам, тепловыделение, обусловленное синтезом тоберморитовой связки газосиликата, вызывает локальное повышение температуры во внутренних слоях материала на 22 – 23 $^\circ\text{С}$ , а ксонотлитовая связка поднимает внутреннюю температуру газобетонного массива на 12  $^\circ\text{С}$ . Это представляет определенный практический интерес.

### 3.3.2 Анализ тепловыделения газосиликатов, изготовленных с применением различных вяжущих и песков

Для определения тепловыделения при автоклавной обработке газобетонов был проведен анализ графиков автоклавирования бетонов, изготовленных с различными песками.

Исследованы газобетонные смеси, изготовленные на кварцевых песках карьера месторождения «Октябрьское», г. Коломна Московской обл.

Характеристики песка, по испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТ 8736 – 93, а также результаты химического анализа приведены в табл. 3.1, 3.2.

Таблица 3.1 – Данные документа о качестве на кварцевый песок,  
применяемый в настоящем исследовании

№ п/п	Показатель	Нормативное значение	Фактическое значение
1	Модуль крупности	Св. 2,0 до 2,5	2,06
2	Полный остаток на сите № 063, в % по массе	Св. 30 до 45	31,98
3	Содержание зерен крупностью		
	Свыше 10 мм	Не более 0,5	0
	Свыше 5 мм	Не более 5	0
	Менее 0,16 мм, в % по массе	Не более 5	4,98
4	Содержание пылевидных и глинистых частиц, в % по массе	Не более 2	0,7
5	Содержание глины в комках, в % по массе	Не более 0,25	0
		Средний I кл.	

Песок относится к группе – средний I кл.

Таблица 3.2 – Химический состав кварцевого песка

№ п/п	№ пробы	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	ппп %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	SO <sub>4</sub> %	Cl %
1	Белый	98,1	0,27	0,54	0,31	0,05	<0,1	0,015	0,03	0,0049	0,0046
2	Желтый	97,79	0,15	0,55	<0,1	0,05	<0,1	0,01	0,03	0,0049	0,0042

На рисунках 3.22 – 3.24 приведены графики изменения температуры и давления пара в автоклаве, установленные на Егорьевском заводе строительных материалов при производстве газобетонных изделий на линии Masa-Henke по ударной технологии.

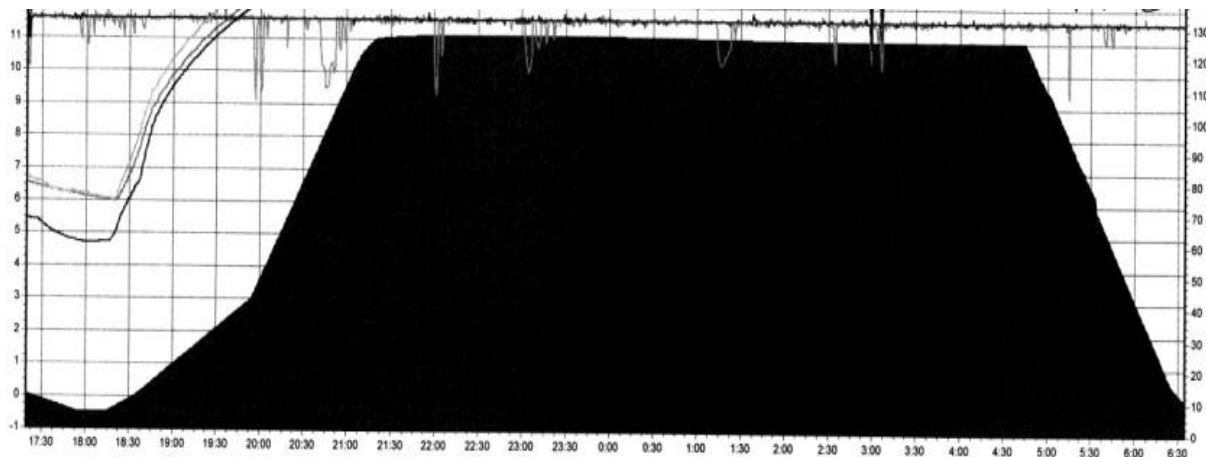


Рис. 3.22 – График автоклавирования газобетона марки D 600

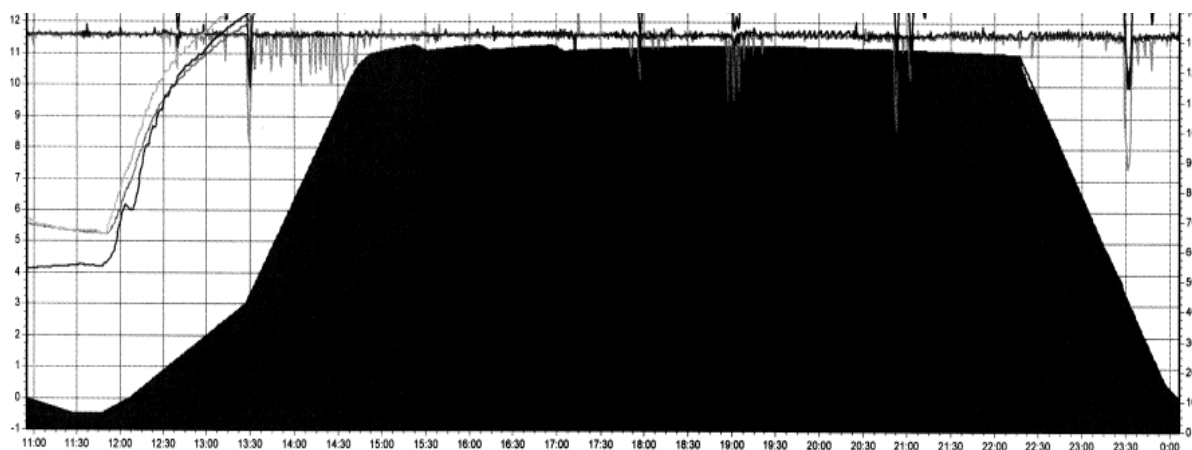


Рис. 3.23 – График автоклавирования газобетона марки D 500

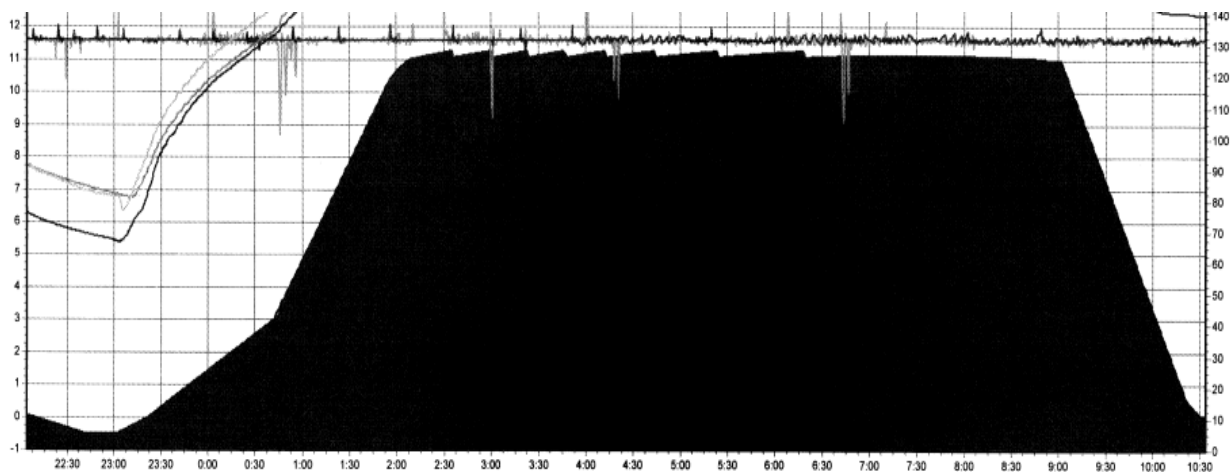


Рис. 3.24 – График автоклавирования газобетона марки D 400

Анализ графиков, характеризующих работу автоклавов, показал следующее:

– при запарке изделий с маркой по плотности D 600 давление пара после выхода на рабочий режим стабильно держится на отметке 11,0 ата (1,1 МПа);

– при автоклавировании газосиликатных изделий с маркой по плотности D 400 и 500 после выхода на режим давление в автоклаве повышается на 0,25 – 0,3 кгс/см<sup>2</sup> (0,025 – 0,03 МПа), что вызывает срабатывание автоматического регулирования давления пара в автоклаве. При этом отключается подача пара в автоклав и через несколько минут это давление снижается до заданного значения 1,1 МПа. Затем давление вновь повышается до очередного срабатывания системы автоматического регулирования;

– количество циклов отключения-включения системы автоматического регулирования находится в пределах 2 – 7, а интервале между ними от 15 – 20 до 150 минут. Общая их продолжительность колеблется в пределах 2 – 3,5 часов.

– С течением времени частота циклов переключений снижается. Так, если первые два переключения происходят через 15 – 20 минут, то два последних – через 40 – 50 минут после предыдущего;

– частота и количество пиков включений-отключений подачи пара, а также их острота возрастают по мере увеличения содержания в газосиликате извести и алюминиевой пасты или пудры. Это косвенно свидетельствует о том, что повышение давления пара в автоклаве обусловлено не только синтезом гидросиликатной связки изделий, но и гидроалюминатных фаз. Однако вклад последних в общее тепловыделение, очевидно, относительно мал.

На заводе, работающем по литьевой технологии, проведены исследования тепловыделения бетонов, изготовленных на



полевошпатовых песках Архимандритского месторождения (г. Уфа). Характеристики песков приведены в табл. 3.3 и 3.4.

Результаты ситового анализа песков и испытания на присутствие в них вредных глинистых, илистых и пылевидных примесей, приведенные в табл. 3.3, свидетельствуют, что все пробы песка относятся к группе мелких песков (модуль крупности их соответствуют 1,37; 1,42 и 1,55), по содержанию полных остатков на сите №0,63 пески относятся к группе очень мелких.

Таблица 3.3 – Результаты ситового анализа песков

Наименование проб песка	Наименование остатков	Содержание остатков на сите при просеивании на сите (% по массе) с размером отверстий, мм						Прошло сквозь сито 0,16мм, % по массе	Модуль крупности	Содержание илистых, глинистых и пылевидных примесей, % по массе
		5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16			
проба №1	частные	0,0	0,0	0,5	1,0	52,0	46,0	0,5	1,55	0,5
	полные	0,0	0,00	0,0	1,5	53,5	99,5			
проба №2	частые	0,2	1,5	1,0	0,5	22,5	73,0	0,5	1,37	3,0
	полные	0,2	1,5	2,5	3,0	25,5	98,5			
проба №3	частые	0,0	2,0	1,0	3,0	25,0	68,5	0,5	1,42	0,5
	полные	0,0	2,0	3,0	6,0	31,0	99,5			

Таблица 3.4 – Химический состав проб песка

Наименование показателя	Содержание, % по массе					
	значения показателя (фактическое)			нормы		
	проба №1	проба №2	проба №3	ГОСТ 8736	СН 277	
1	2	3	4	5	6	
1. Общее содержание оксида кремния SiO <sub>2</sub> , % (по ГОСТ 8269.1)	83,95				не нормируется	не менее 85% для кварцевых песков, не менее 60% для полевошпатовых песков
Содержание кварца (несвязанный SiO <sub>2</sub> ), %(по СН 529)	82,04	82,97	83,35			
2. Содержание растворимого кремнезема SiO <sub>2</sub> , ммоль/л (по ГОСТ 8269.0)	95				не нормируется	не нормируется

1	2	3	4	5	6
3. Содержание оксидов $Al_2O_3+Fe_2O_3$ , %	8,72	8,4	8,36	не нормируется	не нормируется
4. Содержание оксида кальция $CaO$ , %	2,18	2,14	2,17	не нормируется	не нормируется
5. Содержание оксида магния $MgO$ , %	1,04	1,03	1,01	не нормируется	не нормируется
6. Содержание серосодержащих соединений (сера, сульфиды, кроме пирита) и сульфаты в пересчете на $SO_3$ , %	0,22	0,32	0,24	не более 1,0% в пересчете на $SO_3$	в соответствии с требованиями ГОСТ 8736
7. Потери при прокаливании	0,89	2,06	1,45	не регламентируются	не нормируется
8. Органические примеси, по окраске раствора гидроксида натрия	светлее цвета эталона	светлее цвета эталона	светлее цвета эталона	светлее цвета эталона	не нормируется

Песок Архимандритского месторождения содержит значительное количество  $SiO_2$  (общее), но содержание в нем кварца (несвязанного  $SiO_2$ ) невысоко, поэтому пески не являются кварцевыми.

На рис. 3.25 приведен график автоклавирования газобетоносиликатов на Архимандритском песке.

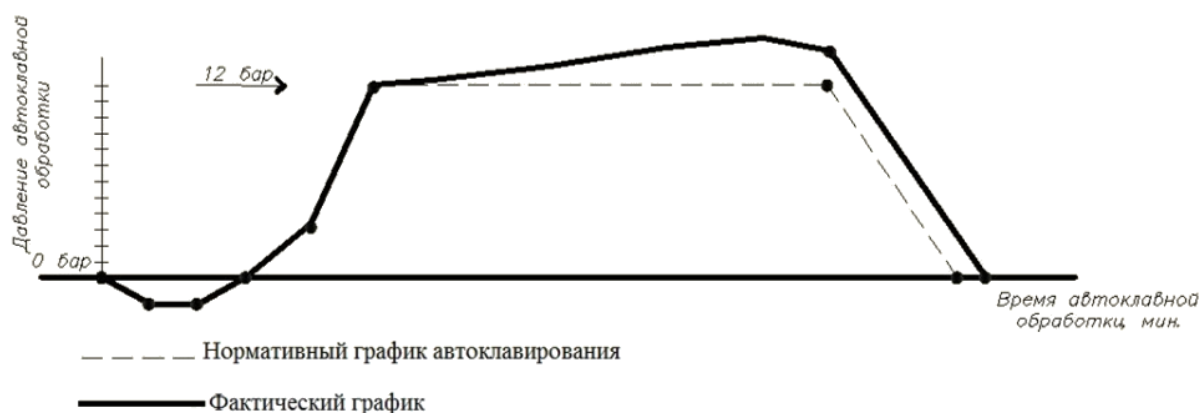


Рис. 3.25 – График автоклавирования газобетонов, изготовленных на кварцево-полевошпатовом песке

Из приведенного графика автоклавной обработки газобетоносилкаты с применением кварцево-полевошпатовых песков видно, что интенсивность тепловыделения бетонов увеличивается к концу изотермической выдержки.

При автоклавной обработке бетонов, в составе которых используется полевошпатовый песок, тепловыделение начинается только через час – полтора после начала изотермии. Нарастание выделения тепла происходит вначале медленно, затем, достаточно быстро. Максимальное значение тепловыделения наблюдается к четвертому – пятому часу изотермической выдержки газобетонов в автоклаве, давление при этом повышается на 1,5 МПа. По-видимому, данная экзотермическая реакция связана с образованием гидроалюминатов кальция. Наблюдаемое при использовании не кварцевых песков снижение прочности газобетонов очевидно связано с тем, что реакция образования гидросиликатов и гидроалюминатов не закончена. Для этих песков необходима более длительная тепловая обработка. Это можно определить по графику автоклавирования, длительность которого определяется моментом нормализации давления в автоклаве.

### **3.4 Макроструктура поровых перегородок в зависимости от способа производства автоклавных ячеистых бетонов**

Преобладающим фактором, определяющим свойства ячеистого бетона по ударной или литьевой технологиям, является структура межпорового вещества, которая складывается из гидросиликатных новообразований, а также капиллярной пористости, пропорциональной содержанию воды в ячеистобетонной смеси. Гидросиликатная связка представлена в основном смесью минералов тоберморитовой группы – 11,3 мкм тоберморита, ксонотлита и, по мнению многих исследователей, C-S-H (II) с различной степенью конденсации силикатных анионов в их структуре. Общее содержание

гидросиликатов кальция изменяется от 30 до 45%, в том числе 11,3 нм тоберморита от 15 до 30% [147].

Авторы [147, 148] утверждают, что при использовании ударной технологии состав гидросиликатной связки не имеет отчетливой корреляционной зависимости от свойств ячеистого бетона: при низком (15 – 20%) и при высоком (30% и более) содержании тоберморита, при плотности бетона  $500 \text{ кг/м}^3$  материал имеет практически одну и ту же прочность. Это связано с особенностями изготовления ячеистого бетона средней плотностью  $450\text{--}500 \text{ кг/м}^3$  по ударной технологии.

Считаем, что это утверждение верно не во всех случаях.

В настоящем разделе производится сравнительная оценка качества макро- и микроструктуры ячеистых бетонов марок по средней плотности  $D$  400,  $D$  500 и  $D$  600, изготовленных по ударной технологии. Для выполнения сравнительных исследований были изготовлены три промышленные партии автоклавного ячеистого бетона. Из них отобраны образцы и при помощи электронного микроскопа в Наноцентре Белгородского государственного университета сделаны фотографии при 50 и 2000-кратном увеличении (рис. 3.26 – 3.28).

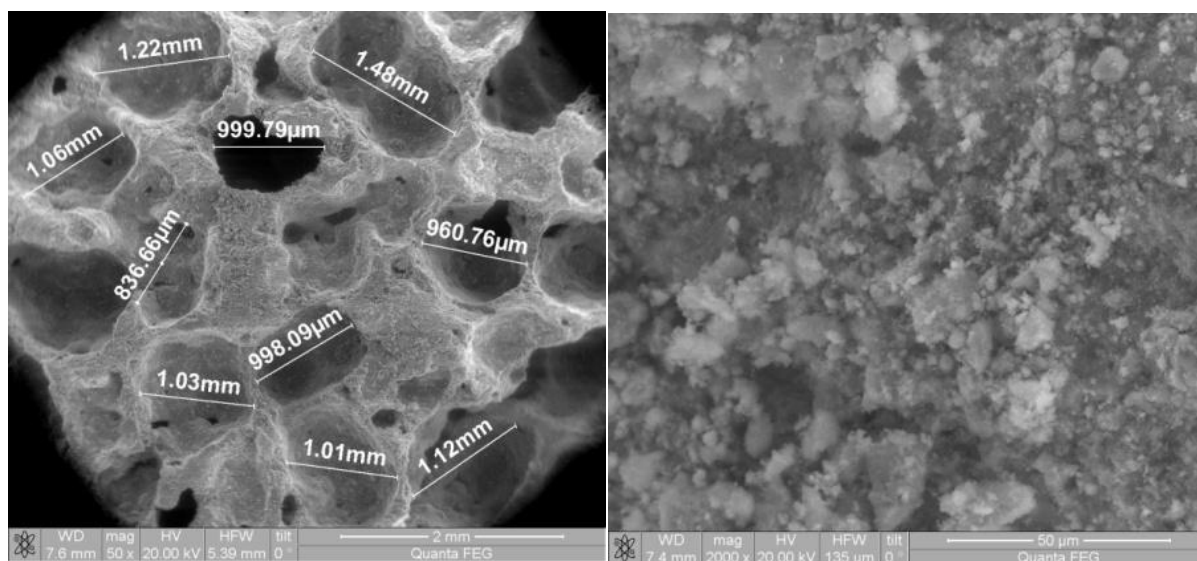


Рис. 3.26 – Макро- и микроструктура ячеистого автоклавного бетона  $D$  400

При рассмотрении макро- и микроструктуры бетона марки по средней плотности D 400 можно видеть следующее:

- пористость образца составляет порядка 60%;
- средний размер пор в бетоне ~ 1 мм;
- материал межпоровых перегородок рыхлый, с развитой поверхностью и большим количеством белого налета.

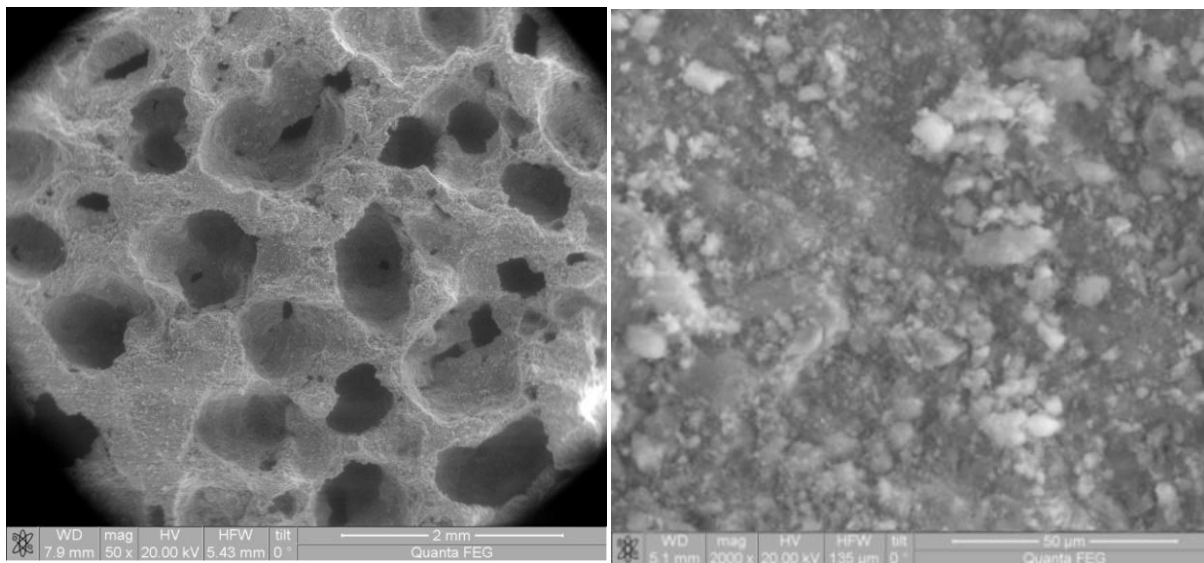


Рис. 3.27 – Макроструктура ячеистого автоклавного бетона D 500

Макропористость образца бетона, имеющего среднюю плотность 500 кг/м<sup>3</sup> (рис. 3.27), составляет около 50%. Средний размер поры образца несколько меньше чем в D 400 и составляет 750 µm (0,75 мм), при этом поверхность тела бетона более плотная.

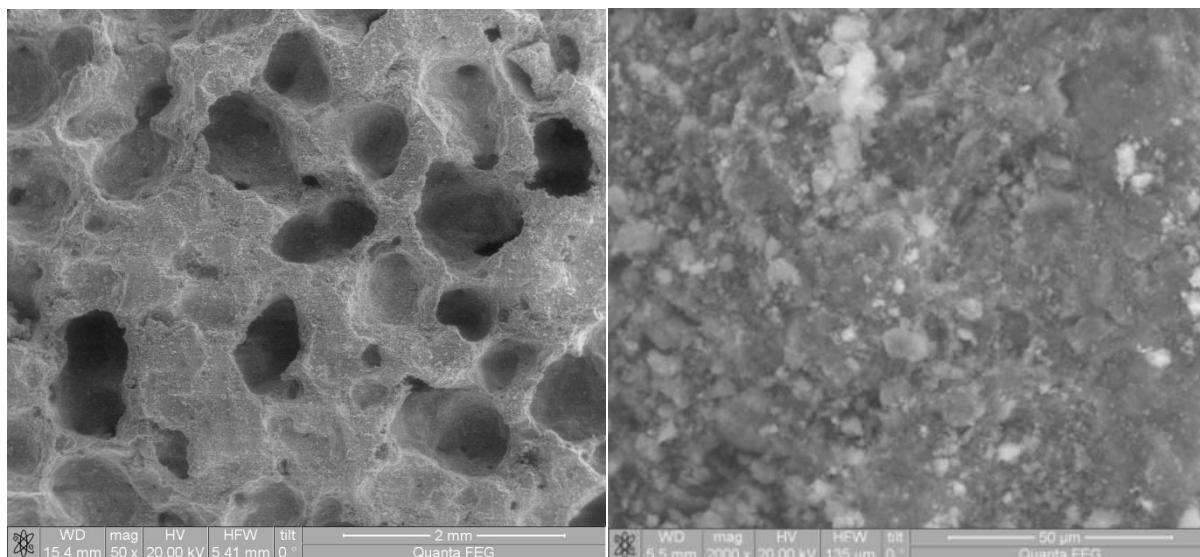


Рис. 3.28 – Макроструктура ячеистого автоклавного бетона D 600

Фотографии ячеистого бетона, имеющего среднюю плотность  $600 \text{ кг/м}^3$ , наглядно иллюстрируют, что при общем снижении пористости образца до  $\sim 40\%$ , уменьшается до  $500 \text{ μm}$  и средний диаметр поры. При этом тело межпорового бетона становится плотным, практически без налета, наблюдаемого нами на предыдущих снимках.

Мы знаем, что базовая прочность пористых бетонов прямо пропорциональна плотности. Например, для марки по средней плотности D 400 обычно без труда получается класс бетона по прочности при сжатии B 1,5 МПа, для D 500 – B 2,5, а для D 600 – B 3,5. Понятно, что не только пористость бетона влияет на его прочностные свойства, но плотность и прочность тела бетона.

Поэтому, считаем, что чем плотнее получается материал межпоровых перегородок, чем правильнее форма и расположение пор, тем выше прочность, атмосферостойкость и долговечность ячеистого бетона, в конечном счете.

В огромном количестве публикаций, посвященных сравнительной оценке качественных характеристик ячеистого бетона, полученного по различным технологиям (литьевая, вибрационная, ударная) высказываются подчас совершенно противоположные мнения [147, 148, 149].

Проанализируем существующее состояние дел по данному вопросу.

Наиболее масштабные сравнительные исследования указанных технологий проведены и описаны Н.П. Сажневым [147, 148]. Он утверждает, что прочность, долговечность и показатели эксплуатационной стойкости бетонов, произведенных по ударной технологии, выше, чем у литых бетонов. Это подтверждается и собственными исследованиями авторов.

Группа исследователей во главе с Сажневым Н.П. отмечают, что ударная технология, по сравнению с литевой, позволяет:

- уменьшить расход сырьевых материалов: цемента на 20 – 30%, извести на 10 – 15%, газообразователя на 5 – 10%;

- уменьшить более чем в два раза количество литевых форм и количество постов созревания, а, следовательно, размеров камер созревания и габаритов цеха;

- уменьшить энергозатраты на 10 – 20% при помоле кремнеземистого компонента и автоклавной обработки благодаря применению материалов с более низкой тонкостью помола и смеси с пониженным содержанием воды;

- повысить на 25 – 40% прочностные показатели при аналогичных сырьевых материалах;

- исключить необходимость применения гипса;

- использовать исходные сырьевые материалы с более низкими качественными показателями;

- снизить отпускную влажность бетона до 25%;

- при изготовлении армированных изделий исключить «всплывание» арматурных каркасов, обеспечивая их проектное положение в изделиях;

- увеличить сцепление бетона с арматурой за счет более плотного обволакивания стержней бетонной массой.

Другие авторы [149, 155] своими достаточно обоснованными выводами отстаивают совершенно иную точку зрения. На примере сравнительного анализа показателей производства газобетона плотностью

500 кг/м<sup>3</sup> они показывают преимущества производства газобетона по литьевой технологии с использованием добавки двуводного гипса на стадии помола песка [151]. Они утверждают, что применяя литьевую технологию производства автоклавного газобетона, представляется возможным сократить расход вяжущего на 18% и газообразователя на 30%.

Сравнительные испытания, проведенные для оценки качества макроструктуры ячеистых бетонов, полученных по ударной и литьевой технологиям [147], показали, что они схожи: макроструктура равномерна, без расслоений и трещин, относительное количество ячеек с дефектными простенками межпорового материала в литом бетоне равно 7,0, в бетоне, полученном по ударной технологии, – 6,0, а в бетоне, изготовленном по вибротехнологии, – 14,2. Показатель изотропности и бездефектности ячеистой структуры бетона, изготовленного по ударной технологии, равен 0,66. Средняя величина для литьевого бетона – 0,64. Это объясняется повышением качества макроструктуры и уплотнением пор в материале с пониженным В/Т.

С целью проверки вышеприведенных утверждений о макроструктуре, нами были отобраны образцы из промышленных партий ячеистого бетона автоклавного твердения одной марки по средней плотности (D 500), сделаны фотографии при 50-кратном увеличении электронными микроскопами, которые представлены на рис. 3.29.

Из приведенных микрофотографий видно, что поровая структура ячеистых бетонов, изготовленных по ударной и литьевой технологиям, коренным образом отличается друг от друга. Форма пор образца, изготовленного по литьевой технологии, более совершенна (правильна и сферична) (рис. 3.29 б), чем у образца, изготовленного ударным способом, но, несмотря на то, что марка по средней плотности образцов одинакова, средняя прочность бетона, изготовленного по ударной технологии составила 4,3 МПа, а по литьевой – 3,7 МПа.



а)

б)

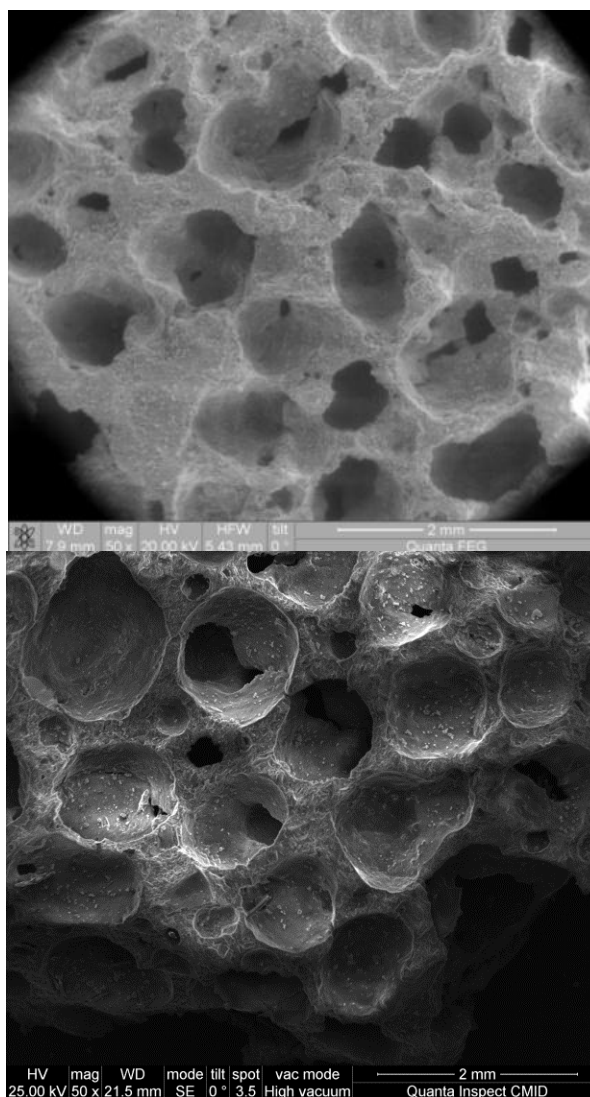


Рис. 3.29 – Макроструктура ячеистого бетона, изготовленного:  
а – по ударной технологии, б – литого бетона

Коэффициент равноосности ячеек, который наиболее точно характеризует качество макроструктуры бетона, при вертикально направленном ударном воздействии, в обоих случаях находится в пределах 0,83 – 0,85.

При ударной технологии наблюдается полимодальное распределение пор по размерам: сравнительно крупные поры бетона в них окружены толстыми межпоровыми перегородками, имеющими собственную микропористую структуру. Соотношение размера крупных пор к мелким 1

: 100, а отношение диаметра крупной поры к толщине межпоровой перегородки составляет  $\approx 3 : 1$ . Такие межпоровые перегородки достаточно устойчивы против процессов растрескивания и разупрочнения.

В структуре ячеистого бетона, изготовленного по литевой технологии, наблюдаются значительно более крупные поры, окруженные тонкими и плотными межпоровыми перегородками. Отношение диаметра поры к толщине межпоровой перегородки  $\approx 5 - 8 : 1$ . Таким образом, в них наблюдается одномодальное распределение пор по размерам. Межпоровые перегородки в литых бетонных смесях из-за преобладания растяжения тангенциального направления над сжимающими (радиальными) менее устойчивы против процессов растрескивания и разупрочнения.

Образование полимодальной пористой структуры ячеистых бетонов автоклавного твердения, изготовленных по ударной технологии, объясняется следующим образом: в связи с повышенной вязкостью заливочной массы первоначально в ней образуется мелкопористая однородная структура гидросиликатной связки. Затем, когда смесь подвергается ударным воздействиям и происходит ее тиксотропное разжижение, часть мелких пузырьков сливается, образуя вторичные поры, характеризующиеся большими размерами. С изложенным механизмом образования структуры ячеистого бетона при ударной технологии согласуется тот факт, что как взаимное расположение, так форма и размеры крупных вторичных пор крайне разнообразны.

Результаты теоретических расчетов, основанных на уравнении Ламе, собственных деформаций и напряжений, возникающих в вяжущих системах, с кольцеобразными элементами структуры, к которым относятся и газобетоны, приводят к выводу о том, что контракционные явления, уменьшающие объем системы «вяжущее – вода» в бетонах, изготавливаемых по литевой технологии, приводят к появлению сил стяжения, разуплотняющих межпоровые перегородки. При ударной технологии этого явления не наблюдается, так как отношение диаметра

поры и толщины межпоровой перегородки находится в области геометрических размеров кольцеобразных элементов структуры, при которых наблюдается баланс тангенциальных и радиальных напряжений.

Проверка морозостойкости ячеистых бетонов при прочих равных условиях показывает, что морозостойкость бетонов, изготовленных ударным способом, во всех случаях не менее чем на марку выше, бетонов, изготовленных по литевой технологии.

Нами подтверждено так же, что ударная технология менее зависима от изменений качества сырьевых компонентов, однако, несмотря на все ее преимущества, предполагает более высокую культуру производства, чем литевая.

Опыт изготовления бетонов с использованием ударно-резательной зарубежной технологии в России пока невелик и теоретических наработок недостаточно для быстрого принятия решений по оптимизации составов, структуры и получения стабильных качественных характеристик изделий на выходе из автоклава. Работы в этом направлении необходимо продолжать.

Напряжения, возникающие в газосиликате вследствие роста в них газовых пузырьков, могут быть приближенно вычислены на основании следующих соображений. Наиболее устойчивой представляется система, в которой тангенциальные напряжения цементного кольца вокруг газового пузырька стремятся к нулю.

Еще в 2007 году, занимаясь вопросами обеспечения максимального сцепления бетонов с заполнителями, нами решалась задача о влиянии размеров цементного кольца на его собственные деформации при усадке [152]. Задача решалась на основе решения посредством формулы ЛАМЕ.

Для радиальных напряжений:

$$\sigma_r = \frac{-\Delta_\varepsilon \left(1 - \frac{a^3}{b^3}\right)}{\frac{1}{2E_2} \left[ \left(2 \frac{a^3}{b^3} + 1\right) - \mu_2 \left(4 \frac{a^3}{b^3} - 1\right) \right] + \frac{1}{E_1} \left(1 - \frac{a^3}{b^3}\right) (1 - 2\mu_1)}$$

Для тангенциальных напряжений:

$$\sigma_t = \frac{\Delta_\varepsilon \left(2 \frac{a^3}{b^3} + 1\right)}{\frac{1}{E_2} \left[ \left(2 \frac{a^3}{b^3} + 1\right) - \mu_2 \left(4 \frac{a^3}{b^3} - 1\right) \right] + \frac{2}{E_1} \left(1 - \frac{a^3}{b^3}\right) (1 - 2\mu_1)}$$

где  $\Delta_\varepsilon$  – разница удлинения ядра по отношению к оболочке [153], равная 8;

$a$  – радиус ядра;

$b$  – наружный радиус оболочки;

$E_1, E_2$  – модули упругости ядра и оболочки;

$\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона материала ядра и оболочки.

Путем проведения соответствующих преобразований нами получены следующие уравнения:

$$\Delta L_{рад} = (d_n - d_\varepsilon) \varepsilon_{рад}$$

$$\Delta L_{тан \varepsilon} = \pi d_\varepsilon \cdot \varepsilon_{рад} \text{ и } \Delta L_{тан н} = \pi d_n \cdot \varepsilon_{тан}$$

$$\Delta L_{тан \varepsilon} / \Delta L_{рад} = \frac{\pi d_\varepsilon \cdot \varepsilon_{рад}}{(d_n - d_\varepsilon) \varepsilon_{рад}}$$

$$\Delta L_{тан н} / \Delta L_{рад} = \frac{\pi d_n \cdot \varepsilon_{тан}}{(d_n - d_\varepsilon) \varepsilon_{рад}}$$

$$\frac{\Delta L_{тан \varepsilon}}{\Delta L_{рад}} \approx \frac{\pi d_\varepsilon}{d_n - d_\varepsilon} \text{ и } \frac{\Delta L_{тан н}}{\Delta L_{рад}} \approx \frac{\pi d_n}{d_n - d_\varepsilon}$$

$$\frac{d_n}{d_\varepsilon} = 2 - 3$$

Таким образом, получено, что для наиболее прочной и наименее деформативной структуры газосиликата необходимо, чтобы отношение наружного диаметра или радиуса кольца к внутреннему, равнялось 2 – 3, что и наблюдается у газобетона, изготовленного по ударной технологии.

### **3.5 Зависимость физико-механических свойств газосиликата от его микроструктуры**

Просмотр многочисленных электронно-микроскопических снимков газосиликатных изделий заводского изготовления со средней плотностью 400 – 600 кг/м<sup>3</sup> показывает, что в них можно выделить три типа структурных элементов: глобулярные образования (3.30), состоящие из более или менее изометрически крупных частиц, имеющих контакты по внешней поверхности, игловидные частицы, на основе которых формируется конденсационно-кристаллизационная структура твердения (рис. 3.31) и участки с сетчатой структурой (рис. 3.32), в которой стенки пор имеют идеально гладкую поверхность, образуя структуры срастания и прорастания. Частицы, из которых такие участки состоят, имеют преимущественно пластинчатую форму с очень гладкими базальными плоскостями. В целом отмечается чрезвычайно высокая регулярность этих участков и практическое отсутствие дефектов структуры. По-видимому, эти частицы состоят из кристаллов тоберморита и ксонотлита. Форма пор большинства участков такой структуры близка к треугольной. Максимальная длина микропоры достигает 1,5 – 2 микрометра, т.е. это не гелевые поры.

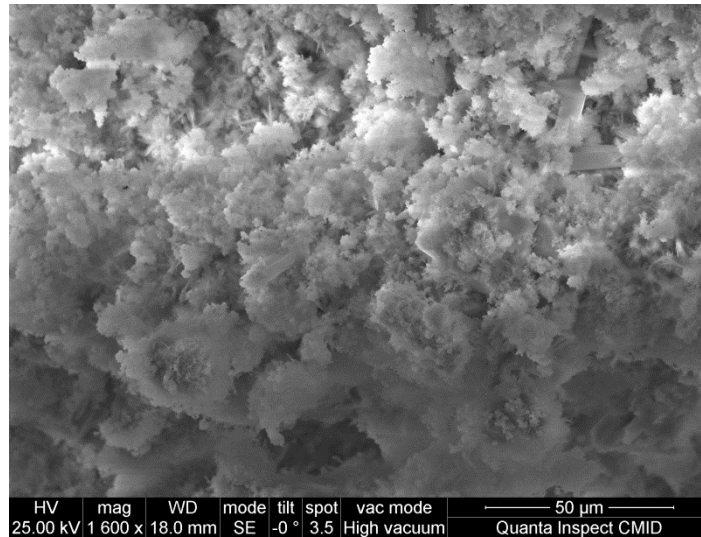


Рис. 3.30 – глобулярные образования в межпоровой перегородке газосиликата  
(литьевая технология)

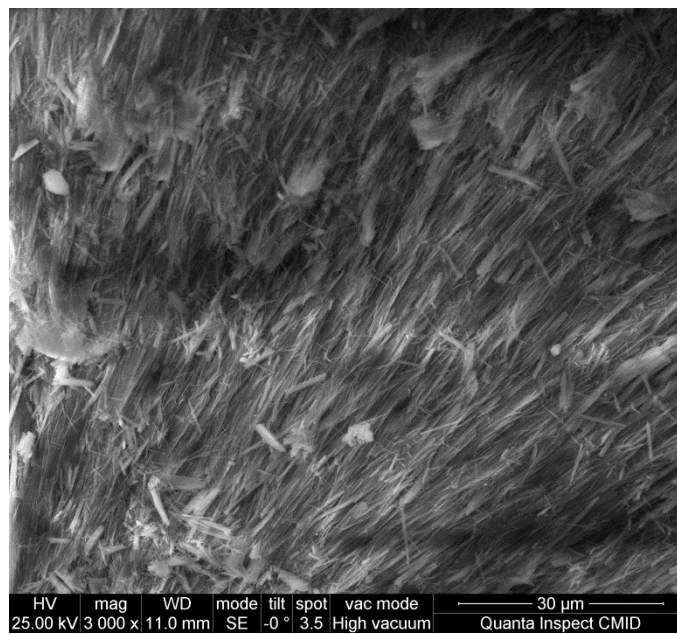


Рис. 3.31 – Игольчатые и волокнистые образования газосиликата  
(литьевая технология)

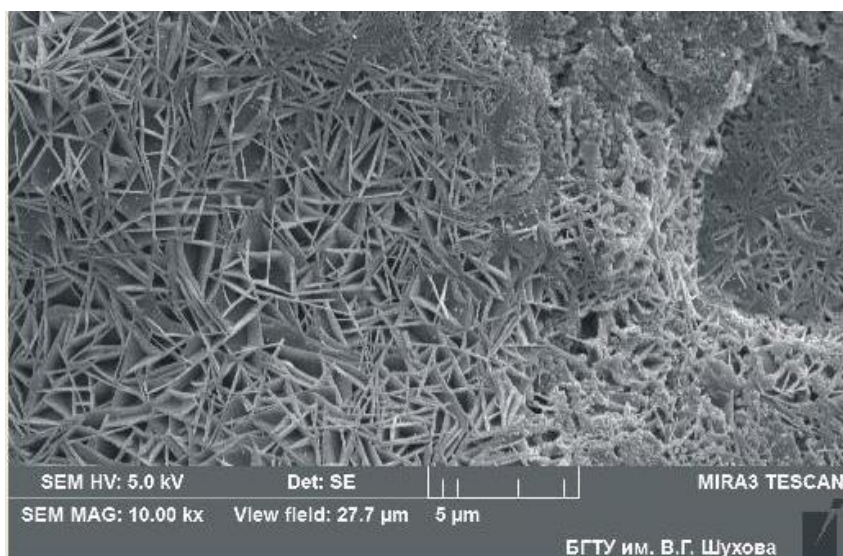


Рис. 3.32 – Сетчатая структура газосиликата

Сетчатая структура изделий свидетельствует о том, что она образовалась путем рекристаллизации вышеупомянутых типов (глобулярных и игольчато-пластинчатых), которые отличаются нерегулярным составом и структурой, а также повышенной растворимостью. Процессы рекристаллизации таких термодинамически неустойчивых новообразований могут приводить к созданию достаточно совершенной кристаллической структуры материала.

Создание таких структур может быть обеспечено оптимизацией составов заливочных смесей и применением двух типов добавок: готовых центров кристаллизации в виде аддитива и небольшого количества электролитов, повышающих растворимость гидросиликатной связки в данной среде, к которым относится и  $\text{CaSO}_4$ . Газосиликатные изделия, в которых преобладает сетчатая структура, имеют повышенные показатели прочности при сжатии. Так, изделия марки по средней плотности D 500, в которых наблюдалась преимущественно сетчатая структура, имели прочность при сжатии 4,33 МПа, против 3,37 МПа базовых образцов.

Из этого следуют выводы:

– образование сетчатых структур более вероятно на основе тоберморитовой связки отличающейся большей равновесной растворимостью;

– для увеличения возможности появления таких структур в состав смеси необходимо вводить добавки, увеличивающие емкость жидкой фазы по ионам кальция и кремнекислоты, т.е. повышать их концентрацию в жидкой фазе.

Изложенное открывает перспективы значительного увеличения физико-механических характеристик газосиликатных бетонов автоклавного твердения.

### **Выводы по главе 3.**

1. Во всех странах мира, в том числе и в Российской Федерации технологии производства газобетонных изделий предусматривают автоклавную обработку при температурах 175 – 190 °С. Согласно данным отечественных и зарубежных авторов, в этих условиях основными связующими являются тоберморит и ксонотлит. Однако, имеющиеся данные о температурных полях устойчивости этих двух минералов крайне противоречивы. В связи с этим, произведен термодинамический расчет температур образования тоберморита и ксонотлита из сырьевой смеси состава 1 : 1 и установлено, что первый устойчив при температуре не ниже 160 °С, а второй – 180 °С. Имеющиеся во многих литературных источниках сведения о том, что тоберморит обнаружен в смесях, обработанных при температуре 300 °С некорректны, так как согласно данным С.А. Абрамова, при изменении температуры окружающей среды ксонотлит способен переходить в тоберморит и наоборот. Результаты теоретических расчетов подтверждены фазовым анализом газосиликатных бетонов заводского изготовления.

2. Установлено, что существенный вклад в процесс нагрева силикатной смеси при запаривании вносит реакция взаимодействия гидрооксида кальция с силикатным компонентом (80 кДж/кг для тоберморита и 45



кДж/кг – для ксонотлита). Это может вызвать повышение температуры внутри газобетона на 23 и 12 °С соответственно.

3. Путем применения высокоактивной извести при производстве изделий низких плотностей (400 и 300), можно существенно повысить их прочность и долговечность без дополнительных энергозатрат, используя энергию тепловыделения процесса гидротермального синтеза, так как при этом будет стимулироваться превращение тоберморита  $11,3 \text{ \AA}$  в ксонотлит.

4. Изложенные в главе результаты автоклавной обработки газосиликатных изделий дают основание рекомендовать при производстве газобетонов на кварцевых пеках в первые 3 – 4 часа после выхода на режим, а полевошпатовых – последние 3 часа, снизить давление подаваемого пара на 0,025 – 0,03 МПа, что позволит на несколько процентов сократить энергозатраты на производство изделий за счет рационального использования тепловыделения при синтезе гидросиликатной и гидроалюминатной связки изделий.

Снижение влажности после автоклавной обработки бетонов предотвращает или ограничивает фазовые превращения тоберморит $\leftrightarrow$ ксонотлит. На основании этого показано, что ударная технология (в низком В/Т) производства силикатных газобетонов предпочтительнее литьевой.

5. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что поровая структура ячеистых бетонов, изготовленных по ударной и литьевой технологиям коренным образом отличается друг от друга.

При ударной технологии наблюдается полимодальное распределение пор по размерам: сравнительно крупные поры бетона в них окружены толстыми межпоровыми перегородками, имеющими собственную микропористую структуру. Соотношение размера крупных пор к мелким 1 : 100, а отношение диаметра крупной поры к толщине межпоровой перегородки составляет  $\approx 2 : 1$ . Такие межпоровые перегородки достаточно устойчивы против процессов растрескивания и разупрочнения.

В структуре ячеистого бетона, изготовленного по литьевой технологии, наблюдаются значительно более крупные поры, окруженные тонкими и плотными межпоровыми перегородками. Отношение диаметра поры к толщине межпоровой перегородки  $\approx 1 : 5$ , т.е. в них наблюдается одномодальное распределение пор по размерам. Такие межпоровые перегородки из-за преобладания растяжения тангенциального направления над сжимающим (радиальным) менее устойчивы против процессов растрескивания и разупрочнения.

Результаты теоретических расчетов, основанных на уравнении Ламе, собственных деформаций и напряжений, возникающих в вяжущих системах, содержащих кольцеобразные элементы структуры, к которым относятся и газобетоны, приводят к выводу о том, что контракционные явления, уменьшающие объем системы «вяжущее – вода» в бетонах, изготавливаемых по литьевой технологии, приводят к появлению сил стяжения, утончающих межпоровые перегородки. При ударной технологии этого явления не наблюдается, так как отношение диаметра поры и толщины межпоровой перегородки находится в области геометрических размеров кольцеобразных элементов структуры, при которых наблюдается баланс тангенциальных и радиальных напряжений.

6. Изложенные соображения о механизме формирования структуры при литьевой и ударной технологии приводят к выводам о том, что:

– для получения структуры с крупными порами, необходимо понижать вязкость, но увеличивать активность смеси. При этом рекомендуется максимально снизить температуру заливки (38 – 39 °С);

– для получения мелкопористой структуры необходимо использовать смеси, изготавливаемые по ударной технологии, т.е. с пониженным В/Т, а для создания вторичной крупнопористой структуры необходимо осуществлять их тиксотропное разжижение. Это может быть достигнуто увеличением амплитуды и снижением частоты ударных воздействий.

7. По электронно-микроскопическим снимкам газосиликатов заводского изготовления выделяется 3 типа структур: глобулярные образования, коагуляционная структура и участки с сетчатой структурой. Идеальная структура газосиликатных изделий должна содержать максимальное количество участков третьего типа, так как они не имеют дефектов, а бетон такой структуры обладает максимальными физико-механическими показателями не только по прочности при сжатии и растяжении, но также минимальными деформативными характеристиками. Необходимо стремиться к получению газосиликатных материалов именно с такой структурой.

Область образования сетчатой структуры, очевидно, возрастает с увеличением концентрации ионов кальция и кремнекислоты в жидкой фазе. Из этого следуют выводы:

- образование сетчатых структур более вероятно на основе тоберморитовой связки отличающейся большей равновесной растворимостью;

- для увеличения возможности появления таких структур в состав смеси необходимо вводить добавки, увеличивающие емкость жидкой фазы по ионам кальция и кремнекислоты, т.е. повышать их концентрацию в жидкой фазе.

Установлено, что создание сетчатых структур может быть обеспечено применением двух типов добавок: вводом в состав готовых центров кристаллизации в виде аддитива и электролитов, повышающих растворимость газосиликатной связки в данной среде, к чему можно отнести и  $\text{CaSO}_4$  в малых количествах. Изложенное открывает перспективы значительного увеличения физико-механических характеристик газосиликатных бетонов автоклавного твердения.

#### **4. Обоснование влияния состава, дисперстной сырьевой смеси и технологических факторов на синтез гидросиликатной связки и структуру газосиликатных изделий**

##### **4.1 Физико-химические основы формирования структуры газосиликата**

Твердение известково-кремнеземистых материалов в условиях обработки паром в автоклавах представляет ряд сложных физико-химических процессов, изучением которых занимались и занимаются в нашей стране многие ученые, в том числе: Н.Н. Смирнов [154], И.Ф. Пономарев [155], П.П. Будников [156], Ю.М. Бутт [9, 134], П.И. Боженков [2], Л.С. Болквадзе [157], Б.Н. Виноградов [7], А.В. Волженский [158], Х.С. Воробьев [159], К.Э. Горяйнов [160], Г.И. Книгина [161, 162], С.А. Кржеминский [163], М.Я. Кривицкий [164], К.К. Куатбаев [11, 20], К.Ф. Ломунов [165], Л.А. Малинина, С.А. Миронов [166], А.П. Меркин [167], П.А. Ребиндер [168], А.В. Саталкин [11], К.И. Саснаускас [169], Е.Е. Сегалова [170, 171], Е.С. Силаенков [172], Л.М. Хавкин [173], М.С. Шварцзайд [174] и другие исследователи.

До и в начале 20 века были известны несколько теоретических положений, характеризующих процессы формирования гидросиликатной связки в процессе автоклавирования.

Так, Х. Ле-Шателье [175] выделил при этом два основных процесса: растворение сырьевых компонентов и кристаллизацию новообразований из насыщенных растворов, против теории Ле-Шателье возражали В. Михаэлис [176], Х. Эмборн [177] и В. Родт [178]. Они утверждали, что согласно их наблюдениям, при твердении существенное значение должны иметь коллоидно-химические процессы и описывали три стадии: гидратацию, получение гелеобразных новообразований и их перекристаллизацию.

Некоторые из основных положений теории автоклавной обработки известково-кремнеземистых материалов разработаны А. В. Волженским [158] в 1932 – 1935 гг. Согласно его взглядам, автоклавная обработка состоит из трех стадий. Первая включает период с момента впуска пара в автоклав до достижения заданной температуры обрабатываемых изделий. Вторая характеризуется постоянством температуры и заданного давления пара в автоклаве. При этом максимальное развитие получают все те химические и физико-химические процессы, которые обуславливают возникновение цементирующих новообразований и твердение известково-песчаных или бетонных изделий. Третья начинается с момента прекращения доступа пара в автоклав и включает время остывания изделий в нем до их извлечения.

Позднее, с учетом термодинамических свойств водяного пара и экспериментальных данных, в работе П.И. Боженова и Г.Ф. Суворовой [96] процессы подъема и снижения давления были разбиты на части и предложены пять этапов автоклавирования, к которым К.Э. Горяйнов и П.Г. Заседателёв [160] добавили еще один процесс – вакуумирование на последнем этапе обработки (во время снижения температуры).

Из всех названных процессов, на наш взгляд, наибольший интерес представляет стадия изотермической обработки в автоклаве, так как в основном от нее зависят все основные эксплуатационные свойства готовых изделий и особенно их долговечность. Рассмотрим ее более подробно.

Общепринятая в настоящее время точка зрения о данном процессе основана на том, что к моменту изотермической выдержки поры материала в достаточной степени заполнены раствором гидроксида кальция, непосредственно соприкасающимся с кремнеземистыми компонентами. Чем выше температура, мельче частички кремнеземистого материала и, следовательно, больше их реагирующая поверхность, чем теснее они соприкасаются и легче разлагается данная модификация кремнеземистого материала, тем скорее протекают процессы взаимодействия гидроксида

кальция с кремнеземистым материалом и водой при одной и той же концентрации гидроксильных ионов.

При взаимодействии кварца с известью в реакцию в первую очередь вступают гидроксильные ионы, образующиеся при растворении  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в воде. Они гидратируют молекулы  $\text{SiO}_2$  и делают их способными к последующим реакциям с ионом кальция. Считается, что под влиянием ионов  $\text{OH}^-$  происходит разрыв связей  $-\text{SiO}-\text{SiO}-$  в тетраэдрах кремнезема и образование групп  $\text{HO}-\text{Si}-\text{OH}$ , которые в последующем взаимодействуют с ионами кальция с образованием гидросиликатов кальция.

Сначала, при наличии насыщенного раствора гидроксида кальция, в известково-песчаных смесях, подвергаемых тепловой обработке при  $174,5-200$  °С, образуется двухосновный гидросиликат кальция состава  $(1,8-2,4) \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1 - 1,25) \text{H}_2\text{O}$ . Этот гидросиликат, по системе Х. Тейлора [179] обозначают  $\alpha - \text{C}_2\text{S}$ . По системе Р. Богга [180], он имеет формулу  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и кристаллизуется в форме призматических пластинок размером до  $10 - 20$  мкм и более. Кроме того, образуется гидросиликат кальция состава  $(1,5 - 2) \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , кратко обозначаемый, по Х. Тейлору,  $\text{C}-\text{S}-\text{H}$  (II), а по Р. Боггу,  $\text{C}_2\text{SH}_2$ . В дальнейшем с увеличением температуры и длительности тепловлажностной обработки, сопровождающихся снижением концентрации гидроксида кальция в растворе и увеличением растворимости кремнезема, возникают условия для образования менее основных гидросиликатов кальция. Преимущественно возникают гидросиликаты группы  $\text{C}-\text{S}-\text{H}$  (I), по Х. Тейлору, или, по Р. Боггу,  $\text{CSH}(\text{B})$ , химического состава, меняющегося в пределах  $(0,8-1,5) \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,5 - 2)\text{H}_2\text{O}$ . Они кристаллизуются в виде тончайших слоистых пластинок, которые при повышенном значении отношения  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  свертываются в удлиненные трубки, имеющие вид волокон или игл длиной до  $0,5 - 1$  мкм.

Длительная тепловая обработка способствует образованию хорошо выраженных кристаллов тоберморита, имеющего состав  $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ ). Новообразования такого состава получают при изготовлении строительных изделий из известково-песчаных бетонов в промышленных условиях при продолжительности изотермической выдержки под давлением пара 0,9 – 1,6 МПа от 4 до 8 ч.

По данным Ю.М. Бутта и Л.Н. Рашковича [134], Г. Калоузека [181 – 183] и др., гидросиликаты группы  $\text{CSH}$  (В), образующиеся в известково-песчаных смесях при автоклавной обработке, обеспечивают получение бетонов высокой прочности.  $\text{C}_2\text{SH}$  (А) характеризуется менее выраженными вяжущими свойствами, что связано с увеличенным размером частиц таких новообразований. С другой стороны, известково-песчаные бетоны, связанные  $\text{CSH}$  (В) и отчасти  $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ , отличаются пониженной морозостойкостью и повышенной склонностью к усадке при высыхании. Наличие же в бетонах  $\text{C}_2\text{SH}$  (А) способствует повышению морозостойкости и стойкости против действия углекислоты воздуха [9].

Образующиеся малорастворимые низкоосновные гидросиликаты кальция выпадают в виде исключительно дисперсных субмикроскопических коллоидальных осадков. Последние возникают преимущественно на поверхностях песчинок, окаймляя их по контуру. В процессе запаривания каемки на песчинках утолщаются за счет образования все новых и новых слоев гидросиликатов кальция. При этом новообразования соединяются в одну общую своеобразную сетку, связывающую все частички песка.

Принято, что в условиях кратковременной обработки материалов в автоклавах необходимо быстрое образование значительного количества цементирующих веществ для сцепления всех частичек в единый монолит. Чем компактнее уложены все частички в сформованном изделии, тем скорее будет достигнут заданный эффект твердения при минимальном количестве новообразований.

Кристаллы гидросиликатов кальция вначале образуются в коллоидном состоянии и неразличимы даже в оптическом микроскопе, но при наличии водной среды и в условиях высокой температуры с течением времени переходят в более крупные кристаллические образования. К концу запаривания гидросиликаты кальция, а также другие возникшие цементирующие вещества в зависимости от возраста будут иметь различную структуру: образовавшиеся в начале запаривания успеют в какой-то степени перекристаллизоваться, возникшие же на последней стадии запаривания будут еще находиться в виде тонкодисперсных субмикроскопических частичек.

При тепловлажностной обработке в автоклавах прочность известково-песчаных изделий вначале возрастает, достигает некоторого максимума, а затем при длительном запаривании снижается. Это явление характерно для изделий и на других вяжущих веществах. Причиной прекращения роста прочности и ее падения следует считать затухание процессов возникновения новообразований и структурные изменения, происходящие в пленках новообразований.

В первые часы запаривания рост прочности известково-кремнеземистых изделий обуславливается интенсивным образованием частичек гидросиликатов кальция тончайшей дисперсности, обладающих высокими клеящими (вяжущими) свойствами. С течением времени процесс возникновения гидросиликатов затухает вследствие образования пленок на песчинках, затрудняющих взаимодействие кремнезема и гидроксида кальция. Это обстоятельство приводит к постепенному снижению интенсивности роста прочности системы во времени. Но наряду с образованием высокодисперсных частичек гидросиликатов кальция с самого начала запаривания изделий идет параллельный процесс – увеличиваются размеры ранее образовавшихся частичек, которые превращаются в более крупные кристаллы. Укрупнение частичек гидросиликатов, обуславливающее уменьшение площади контактов между



ними, вызывает снижение механических показателей твердеющей системы. С того момента, когда процесс укрупнения частичек вследствие перекристаллизации начинает преобладать над процессом образования новых частичек высокой дисперсности, уже создаются предпосылки не к росту, а к падению прочности изделия. Это подтверждается сопоставлением прочности изделий и удельной поверхности новообразований в образцах из известково-песчаных, цементно-песчаных и шлакопесчаных смесей. При запаривании прочность при сжатии образцов, а также удельная поверхность новообразований вначале возрастают до определенного максимума, зависящего от свойств исходных материалов и температуры тепловой обработки. Дальнейшее запаривание приводит к снижению механической прочности с уменьшением удельной поверхности частичек новообразований вследствие перекристаллизации. Тем самым подтверждается справедливость гипотезы, по которой наибольшая прочность цементного камня, а, следовательно, и изделия достигается при максимальной удельной поверхности новообразований.

Наша точка зрения на физико-химические процессы, происходящие при автоклавировании газосиликатов, следующая.

По данным Р. Айлера [184] и других авторов, кварц начинает энергично реагировать с гидроксидом кальция лишь при температуре выше 150°C. При этом, с повышением температуры до 150 °C и выше активность реакции кремнезема и извести резко возрастает.

На рис. 4.1 показана зависимость степени связывания извести различными видами кремнеземсодержащих материалов от температуры [184].

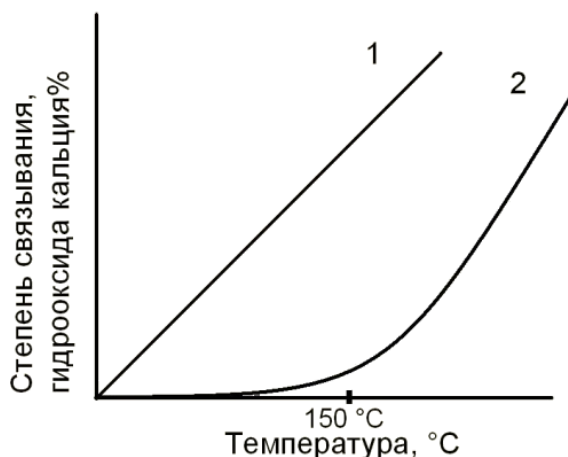


Рис. 4.1 – Степень связывания гидроксида кальция различными видами кремнезема в зависимости от температуры  
1 – аморфный кремнезем; 2 – β-кварц молотый

Как видно из рисунка, аморфная кремнекислота (силикагель, трепел, диатомит) взаимодействуют с водным раствором гидроксида кальция уже при температуре, близкой к 0 °C.

Порошок кристаллического диоксида кремния – β-кварца – с гидроксидом кальция почти не взаимодействует вплоть до температуры 150 °C. При этой и более высокой температуре химическая реакция между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{SiO}_2$  резко активизируется, а при 170 – 200 °C уже идет с приемлемой для промышленности скоростью. Вот почему запарка известково-песчаных материалов при 140 – 150 °C и ниже нецелесообразна с технико-экономической точки зрения.

Наши термодинамические расчеты показали, что изменение свободной энергии в системе  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-SiO}_2$  при комнатной температуре (25°C) меньше, чем при 180 – 200 °C, хотя известно, как по данным Р. Айлера, так и из практики, что при автоклавной обработке реакция образования гидросиликатной связки при 170 – 200 °C идет гораздо активнее чем при комнатной температуре.

Причина этого парадокса в следующем.

Снижение химического сродства между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{SiO}_2$  при высоких температурах обусловлено тем, что при этом более чем на 30 ккал/моль уменьшается свободная энергия образования кремнекислоты (для иона  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ,  $\Delta G_{298}^0 = -283,7$  ккал/моль, а  $\Delta G_{473}^0 = -248$  ккал/моль). Свободная энергия реакции ионов кальция практически не меняется, а гидроксильных групп падает. В результате свободная энергия реакции  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2$  с выделением в жидкую фазу кремнекислородных анионов и гидроксильных групп смещается в положительную область на 20 – 40 ккал/моль, в зависимости от схемы расчета. Наблюдаемый в действительности резкий рост скорости этой реакции, по нашему мнению, обусловлен эффектом Хэдвалла [185] – явлением, заключающемся в резком ускорении гетерогенных реакций при температуре фазового превращения более пассивного (покрываемого) компонента реакции – кварца.

В данной системе, согласно справочным данным [186], кварц претерпевает полиморфные превращения, переходя в тридимит либо кристаболит. Известно, что этот переход осуществляется при температуре 163 °С при отсутствии посторонних примесей. В присутствии щелочных и щелочноземельных оксидов –  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  – температура фазового превращения смещается на 10 – 20 °С вниз. При помоле содержание активной фазы диоксида кремния возрастает, особенно в поверхностных слоях частиц. Фазовый переход тридимита активизирует химические реакции с его участием. В связи с изложенным в системе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - $\text{SiO}_2$  это превращение происходит при температуре 150 – 160 °С, что совпадает с критической точкой, отмеченной Р. Айлером, т.е. эффектов Хэдвалла..

Согласно литературным данным, эффект Хэдвалла сопровождается резким ускорением гетерогенных реакций, чем и объясняется большая скорость взаимодействия компонентов газосиликатной смеси в автоклаве. При этом, по-видимому, процессы идут послойно, где гидроксильные

ионы выступают как катализаторы фазовых превращений кварц – тридимит (кристаболит).

На основе изложенного, можно говорить, что было бы целесообразно рассматривать не систему известь – кварц, а систему известь – тридимит (кристаболит).

В последнее время некоторые авторы оспаривают наличие тридимита и его модификаций, однако, никто не отрицает, что при температуре 150 °С кварц испытывает определенные структурные изменения, которые неизбежно сопровождаются эффектом Хэдвалла.

Вторым важным фактором, резко ускоряющим реальную скорость взаимодействия кремнекислоты с гидроксидом кальция при автоклавной обработке – резкое ускорение диффузионных процессов в этой системе, особенно ионов  $\text{Ca}^{2+}$ .

Согласно основным положениям химии растворов и физики твердого тела, при увеличении температуры коэффициент диффузии ионов возрастает по квадратичному закону. Есть мнение также о существовании экспоненциального роста скорости диффузии с повышением температуры [187, 188].

Согласно первому мнению, при увеличении температуры с 298 до 498 °К коэффициент диффузии возрастает в  $\sqrt{\frac{473}{298}} = 1,3$  раза, т.е. всего на 30%, что не согласуется с фактическими данными. В связи с этим, возникает предположение, что скорость диффузии возрастает по экспоненциальному закону, либо, что в данном случае при температуре 150 – 160 °С ключевую роль играет эффект Хэдвалла [134].

Как преодолеть температурный порог в 160 – 170 °С?

Гранулированные доменные шлаки и кислые золы ТЭЦ находятся в стекловидном состоянии. Данное состояние является термодинамически неустойчивым и характеризуется избыточной свободной энергией, которая может выделяться при химических реакциях. Известно, что при их

использовании в смеси с известью можно понизить температуру запарки на 20 – 30 °С либо уменьшить ее продолжительность [190].

Третья стадия запаривания начинается с момента прекращения доступа пара в автоклав и кончается в момент извлечения изделия из него. При охлаждении автоклава в теле изделий возникает интенсивное парообразование, что при чрезмерно быстром сбросе давления может нарушить структуру цементирующих веществ и понизить прочность газосиликата. Это обстоятельство надо учитывать при изготовлении изделий методом автоклавной обработки. Кроме механического воздействия пара на изделия в период его нагревания и охлаждения в автоклаве большое влияние оказывают термические напряжения.

В процессе остывания бетона после изотермической выдержки может происходить перекристаллизация неустойчивых в нормальных температурных условиях минералов, способных при остывании, особенно длительном, присоединять воду, что неизбежно происходит с увеличением объема газосиликата, и может приводить к снижению его прочности. Для предотвращения этого процесса, как уже было сказано ранее, необходимо максимально снижать количество воды в газобетонных смесях, а для стабилизации бетонов возможно быстрое высушивание газобетонов при высоких температурах с одновременной карбонизацией (для закупорки) поверхностного слоя изделий [186].

Для этих целей может использоваться обработка газобетонных массивов после автоклавирования в среде продуктов отходящих газов котельной. Предлагаемая схема обработки изделий отходящими газами котельной приведена на рис. 4.2.

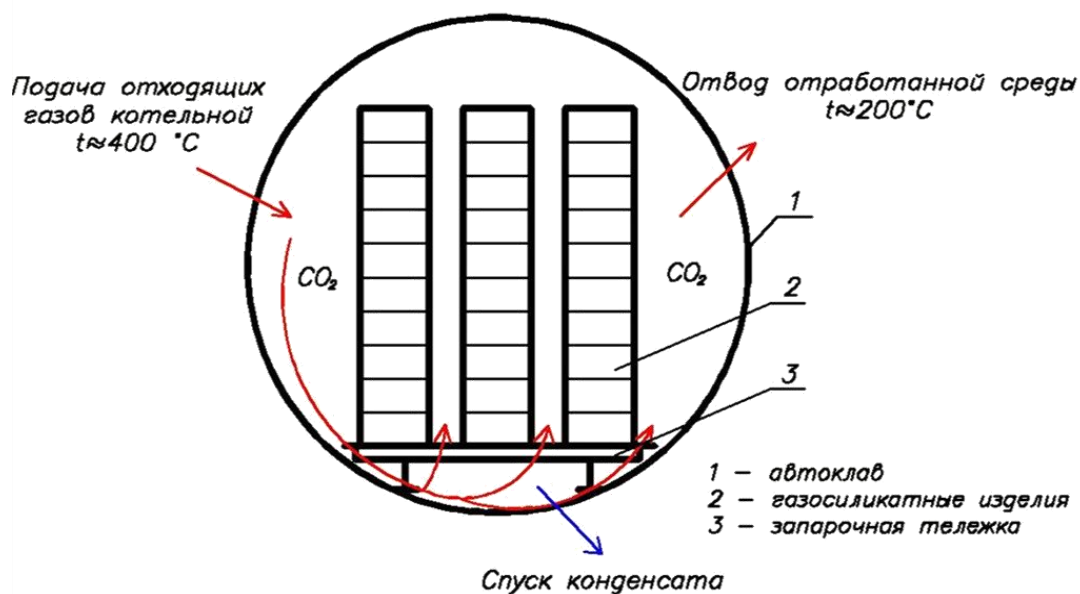


Рис. 4.2 – Схема обработки газосиликатных изделий в автоклаве отходящими газами котельной

Ввод процесса подсушивания и карбонизации поверхностных слоев газобетонов, кроме прочего, позволит уменьшить экологическую напряженность окружающей среды, так как значительно понизит температуру выбрасываемых в атмосферу отходящих газов котельной и уменьшит концентрацию в них углекислого газа.

#### 4.2 Влияние структуры на прочность и плотность автоклавного ячеистого бетона

Рассмотрение зависимости прочности камня от объемного содержания гидросиликатной связки в нем показывает, что при соотношении  $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 1$ , она в 1,5 – 2 раза выше, чем при  $\text{C/S} = 2$ , именно поэтому оптимальным считается соотношение извести и песка, равное 1:1.

В первом случае носителем прочности являются низкоосновные гидросиликаты кальция тоберморитовой группы  $(0,8 - 1,2) \text{CaO} : \text{SiO}_2 \cdot (0,5$

– 1)  $\text{H}_2\text{O}$  или ксонотлит, а во втором – двухосновные гидросиликаты кальция группы гиллебрандита –  $2 \text{CaO} : \text{SiO}_2 \cdot (0,3 - 1) \text{H}_2\text{O}$ .

В работах Е.Е. Сегаловой, П.А. Ребиндера [168, 170, 171] показано, что носителями прочности цементного камня являются два основных вида связей между гидратными частицами: коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные. Первые образуются между коллоидными частицами благодаря прослойкам молекул воды между ними, которые выполняют функции своеобразного клея. При этом основную роль играют дальнедействующие водородные связи и силы Ван-дер-Ваальса между молекулами воды при участии поверхностных сил гидратных частиц. Такие связи в основном возникают в гелеобразных и слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатах кальция, которые отличаются очень малой растворимостью, особенно по  $\text{CaO}$  (до  $0,1 - 0,3$  г/л при  $25^\circ\text{C}$ ).

Двухосновные гидросиликаты кальция  $\text{C}_2\text{SH(A)}$ ,  $\text{C}_2\text{SH(B)}$  устойчивы лишь в насыщенных растворах гидроксида кальция. Они имеют повышенную равновесную растворимость в поровой жидкости вяжущих систем и образуют более закристаллизованные волокнистые и пластинчатые микрокристаллы, которые, срастаясь и переплетаясь, образуют структуру твердения. Связи, которые возникают между этими частицами при их срастании, называются кристаллизационными. Несросшиеся частицы, переплетаясь между собой как шерстинки в войлоке, образуют конденсационную структуру. Кристаллизационные и конденсационные связи действуют только на очень малых расстояниях.

Таким образом, если обеспечить плотнейшую упаковку частиц из высокоосновного вяжущего, можно резко повысить прочность камня из него.

Для проверки этого предположения был проведен эксперимент на двух смесях с соотношением  $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 3 : 1$ ,  $\text{В/Ц} = 0,4$  без добавок и то

же с добавкой 0,2% неионогенного пластификатора. Обе смеси запаривались в автоклаве при температуре 150 °С в течение 24 часов.

Результаты испытаний камня показали, что для смеси без добавки пластификатора прочность при сжатии составила  $\sigma_{сж} = 18$  МПа, прочность при изгибе  $\sigma_{изг} = 4,7$  МПа, при этом отношение  $\sigma_{сж} / \sigma_{изг} = 3,8$ . Бетон, изготовленный из смеси с пластифицирующей добавкой, показал прочность при сжатии  $\sigma_{сж} = 45$  МПа, при изгибе  $\sigma_{изг} = 23$  МПа. Обращает на себя внимание высокое отношение прочности камня при сжатии к прочности при изгибе (1,95). При этом камень с добавкой неионогенного пластификатора отличался повышенной ударостойкостью и вязкостью разрушения, что согласуется со сказанным выше.

Фазовым анализом установлено, что составы гидросиликатов в обоих случаях абсолютно идентичны и представлены двухосновными гидросиликатами кальция  $C_2SH(A)$  и портландитом. Электронно-микроскопические исследования показали, что камень с добавкой пластификатора состоит из плотно упакованных параллельно продольной оси призматических кристаллов  $C_2SH(A)$  и пластинок портландита. Камень без добавки имеет менее регулярную и более пористую структуру.

Эти данные свидетельствуют о том, что основную роль в формировании свойств бетонного камня из неорганических вяжущих играет характер контактов между частицами и поровая структура материала, которые не имеют однозначной связи с составом гидратных фаз.

Изложенное выше является теоретической основой производства плотных силикатных бетонов автоклавного твердения на высокоосновной гидросиликатной связке, которые отличаются лучшими эксплуатационными показателями и уникальными характеристиками прочности при сжатии и изгибе.

Отсюда следует вывод, что низкоосновные вяжущие образуют более прочный камень, чем высокоосновные в пористых системах, а



высокоосновные – в сильно уплотненных. Схематически это изображено на рис. 4.3.



Рис. 4.3 – Графики зависимости прочности газосиликатного камня от его пористости 1 – низкоосновные гидросиликаты кальция; 2 – высокоосновные гидросиликаты

Известно, что с уменьшением плотности ячеистого бетона снижается его прочность. Но, в отличие от неавтоклавных бетонов, у ячеистых бетонов автоклавного твердения, одной средней плотности может соответствовать несколько классов бетона по прочности. Рассмотрим этот вопрос подробнее, по результатам исследований [191] и собственных исследований авторов.

Одним из первых, французский ученый Фере (R. Feret) [192], в 1897 году предложил линейную зависимость между прочностью и отношением твердых компонентов к объему пор. Позднее американец Пауэрс (T.C. Powers) [193, 194] вывел сначала гиперболическую, а затем степенную зависимость между прочностью и плотностью. Подобные зависимости предлагались А.Ф. Полаком [195] и др.

Большую работу по исследованию данного вопроса провел Н.И. Левин [196]. Он обработал большое количество отечественных и зарубежных данных и получил зависимость в форме полинома, но для использования на практике он рекомендовал более простую формулу:

$$R = 100\gamma^2, \quad (4.1)$$

где  $R$  – прочность, кг/см<sup>2</sup>; а  $\gamma$  – плотность, т/м<sup>3</sup>.

Серьезным недостатком приведенной формулы, как и всех других предлагавшихся выражений, являлось то, что они не учитывали влияние важных технологических параметров, например таких, как вид и расход вяжущего, режимы гидротермальной обработки и т.п., а потому для практики не представляли особого интереса.

Анализируя уравнение параболы, С.М. Ицкович [197] вывел следующую зависимость:

$$R = R_0 = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2 \quad (4.2)$$

где  $R$  и  $R_0$  – прочность ячеистого бетона при плотностях  $\gamma$  и  $\gamma_0$ .

Преимущество формулы С.М. Ицковича в том, что она учитывает свойства конкретного материала. При плотности  $\gamma_0=1$  т/м<sup>3</sup> прочность бетона имеет какую-то, неизвестную нам величину  $R_0=K$ , а подставив эти значения в предыдущую формулу, получаем, что:

$$R = K\gamma^2 \quad (4.3)$$

Отсюда сделан весьма важный вывод: если при любом фиксированном значении  $\gamma$  удвоится величина  $K$ , то, соответственно, вдвое возрастет и значение  $R$ . При неизменной плотности такое возможно только в результате повышения прочности того вещества, из которого составлены перегородки между ячейками. Поэтому, по Ицковичу, параметр  $K$  является константой для бетона данного состава, отражающей прочностную характеристику того силикатного камня, из которого выполнены перегородки между ячейками, независимо от плотности бетона. Это было очень серьезным достижением, поскольку позволяло оценивать ячеистый бетон всего по одному показателю.

В Советском Союзе коэффициент прочности  $K$  использовался для сравнения между собой всех видов бетонов.

По мнению Чернова А. Н. [191] при определении прочности необходимо учитывать не менее двух независимых переменных: прочность перегородок между ячейками и качество структуры.

Для случая изготовления плотного бетона им выведена формула:

$$\frac{R}{R_{пл}} = K \left( \frac{\gamma}{\gamma_{пл}} \right)^2 \quad (4.4)$$

Отсюда видно, что чем больше показатель степени, тем ниже прочность бетона при фиксированном значении плотности.

Путем преобразований формулы (3.3), А.Н. Черновым и С.А. Самардаком, установлено, что значение степени плотности, есть тангенс угла наклона линеаризованного графика  $R = f(\gamma)$  в логарифмическом масштабе.

По поводу приведенного материала хотелось бы заметить, что коэффициент качества структуры характеризует уже полученную структуру, но не дает возможность ее регулировать. В производстве ячеистых бетонов для любой прочности должна быть обеспечена оптимальная структура максимально высокого качества. Только в этом случае можно гарантировать стабильность их свойств.

Известно, что качество структуры зависит от многих факторов и степени их оптимальности. Предлагаем коэффициент качества структуры выразить следующей функциональной зависимостью:

$$K = f(k_1, k_2, k_3, k_4, \dots, k_n) \quad (4.5),$$

где  $k_1$  – качество сырьевых компонентов;

$k_2$  – состав бетонной смеси;

$k_3$  – вязкость смеси;

$k_4$  – температура заливки;

$k_5$  – соответствие времени вспучивания массива времени формирования структуры;

$k_n$  – другие важные факторы.

Факторы, влияющие на структуру, мы расположили в порядке снижения их значимости. Кроме того, каждый из факторов в свою очередь, также является функцией от множества других причин, немаловажных для получения положительного результата.

Итак, один из факторов, от которого зависит прочность бетонов – дисперсность песка. Общая закономерность влияния этого фактора такова: при постоянном В/Т, например В/Т=0,52, с уменьшением дисперсности песка от 1500 до 2600 см<sup>2</sup>/г прочность бетона растет; при дисперсности 2600 – 3100 см<sup>2</sup>/г, наблюдается экстремум (максимальные значения прочностных характеристик), при дальнейшем повышении дисперсности – прочность бетона снижается.

Зависимость дисперсности песка и плотности бетона – обратно пропорциональна. При необходимости выпуска бетонов средней плотностью ниже 500 кг/м<sup>3</sup>, дисперсность песка должна быть увеличена, при повышении плотности – уменьшена.

Считается, что для образования оптимальной структуры бетона для каждого вещественного состава и технологии производства необходима определенная минимально возможная температура заливки. Обычно такая температура может обеспечить все дальнейшие параметры ячеистых массивов: время вспучивания, время структурообразования, скорость набора внутренней температуры и достаточной прочности перед резкой при высокой активности заливочной смеси, т.е. большом расходе извести и при ударной технологии производства. Значение ее не должно быть ниже 38 °С.

Так как во многих технологиях (в основном литевых) используется небольшое количество извести (25 – 35 кг/м<sup>3</sup>), температуру заливки при

этом увеличивают. Однако чем выше температура заливочной смеси, тем больше риск выхода из строя оборудования, а значит – получения некачественного бетона.

Что касается влияния цемента на прочность газобетона, имеются сведения, что при постоянных значениях технологических параметров содержание цемента оказывает весьма незначительное влияние на прочность ячеистого бетона. Так, Сажнев Н.П. в [147] указывает, что при использовании ударной технологии влияние цемента на прочностные свойства ячеистого бетона плотностью  $450 - 500 \text{ кг/м}^3$  несущественно и его применение в основном обуславливается необходимостью повышения технологичности процесса, в первую очередь необходимостью компенсировать низкое качество извести, обычно поставляемой на производство, а также уменьшением времени созревания ячеистобетонного сырца.

В то же время изменение значений других технологических факторов при одном и том же расходе цемента существенно влияет на свойства материала.

В результате выполнения многочисленных подборов и оптимизации составов ячеистых смесей установлено, что добавление цемента более 22 % от количества сухих веществ в бетоне – нерационально.

Оптимальный состав ячеистого бетона плотностью  $450 - 500 \text{ кг/м}^3$  по Сажневу – должен содержать около 15 % извести (100% CaO) и 10 % цемента [147].

В настоящее время для решения проблем оптимизации структуры и свойств бетонов разрабатываются компьютерные модели на основе результатов многофакторных экспериментов [197 – 199]. Решением задачи оптимизации газосиликатных бетонов наиболее успешно занимаются в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете [200 – 208].

Из собственного производственного опыта автора и многочисленными экспериментами установлено, что с увеличением дисперсности извести, значение цемента в смеси сильно возрастает. Особенно ярко это проявляется при производстве газосиликата по технологиям с подрезным слоем. Так, например, масса извести в составе газобетонной смеси при тонкости помола извести  $4000 \text{ см}^2/\text{кг}$  составляет  $60 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а при увеличении дисперсности извести до  $7000 \text{ см}^2/\text{кг}$ , масса извести может быть снижена до  $54 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Таким образом, с целью стабилизации свойств газосиликата, необходимо учитывать этот факт и вовремя производить регулирование составов.

Установлена и приведена в табл. 4.1 зависимость прочности газосиликата от количества и активности цемента и извести при

Табл. 4.1 – Соотношение между количеством цемента и известью в составе газосиликата, для обеспечения равнопрочности газобетона

Цемент * / Известь**	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
40											X
45										X	
50									X		
55								X			
60							X				
65						X					
70					X						
75				X							
80			X								
85		X									
90	X										

\* – масса портландцемента на  $1 \text{ м}^3$  газосиликата (чистоклинкерный портландцемент);

\*\* – расход извести на  $1 \text{ м}^3$  газосиликата (известь активностью 85%)

Исследование влияния количества алюминиевой пудры или пасты на свойства ячеистого бетона показало, что при литьевой технологии изготовления газобетонов можно добиться самых экономных расходов этого компонента, в то время как при ударной технологии, расходы газообразователя – максимальны, но это с лихвой компенсируется повышенным качеством и высокими эксплуатационными характеристиками газосиликата. При увеличении плотности бетонов, расходы алюминиевых компонентов уменьшаются, т.е. зависимость «плотность – расход газообразователя» обратно пропорциональна.

Увеличение количества газообразователя сверх оптимального предела может привести к бурной реакции газовыделения, что сопровождается разрушением структуры бетона (межпоровых перегородок) и может привести к «падению» массива, т.е. полному браку.

Автором установлено, что решающее влияние на качество структуры бетонной смеси оказывает соотношение в ней сырьевых компонентов и активность материалов по  $CaO$ , при этом, значение общей активности смеси по  $CaO$  с достаточной точностью можно рассчитать по следующей формуле:

$$C_{CaO} = \frac{C_{CaO,изв} \cdot P_{изв} + C_{CaO,цем} \cdot P_{цем} + C_{CaO,обр.шл} \cdot P_{обр.шл}}{P_{сух}}, (\%) \quad (4.6)$$

где  $C_{CaO,изв}$  – содержание  $CaO$  в извести, (%),

$C_{CaO, цем}$  – содержание  $CaO$  в цементе, (%),

$C_{CaO, обр.шл}$  – содержание  $CaO$  в обратном шламе, (%),

$P_{изв}$  – масса извести в смеси,  $кг/м^3$ ,

$P_{цем}$  – масса цемента в смеси,  $кг/м^3$ ,

$P_{обр.шл}$  – масса обратного шлама в смеси,  $кг/м^3$ ,

$P_{сух}$  – масса сухих компонентов в смеси,  $кг/м^3$ .

Если поставляемое на предприятие сырье достаточно стабильно, то для экспресс-контроля можно предложить упрощенную формулу расчета активности по  $CaO$  только по извести:

$$C_{CaO} = \frac{C_{CaO,изв} \cdot P_{изв}}{P_{сух.}}, (\%) \quad (4.7)$$

Установив значение активности для оптимизированной структуры смеси каждого состава бетона определенной плотности и поддерживая его по результатам испытаний материалов, можно гарантировать стабильные конечные параметры газосиликатных изделий.

В зависимости от составов бетонных смесей, при одних и тех же плотностях, автоклавные газобетоны, можно получать различных прочностей. На графике (рис. 4.4) мы показали область возможных прочностных характеристик ячеистых бетонов. Как видно, понятие – средняя прочность автоклавного ячеистого бетона при одной средней плотности – достаточно широкое.

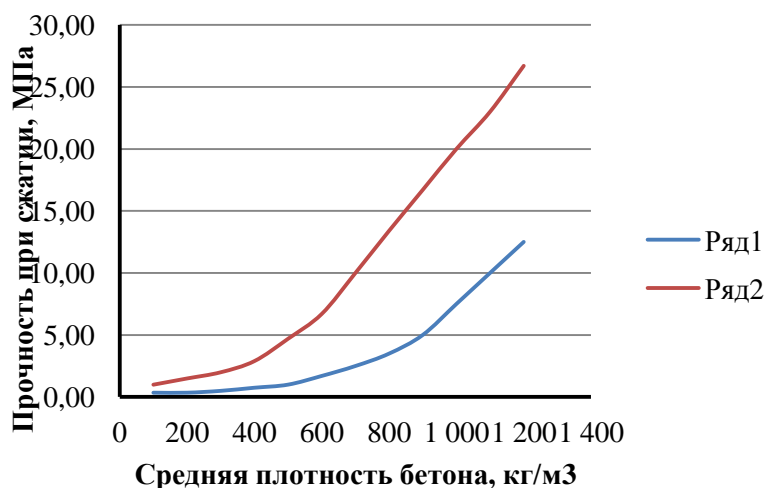


Рис. 4.4 – Границы возможных прочностных характеристик бетонов при различных плотностях

ряд 1 – граница минимальных, ряд 2 – граница максимальных значений прочностных параметров ячеистых бетонов



Границы, показанные на графике, актуальны по состоянию на сегодняшний день. С развитием науки и технологии они будут значительно расширены в сторону повышения прочности уже в ближайшие годы. Учеными страны, в том числе и автором настоящего исследования, ведется интенсивная работа в этом направлении.

Так, перед автором на одном из производственных предприятий Подмосковья была поставлена цель получения качественного газосиликата класса по средней плотности D 400, имеющего стабильную среднюю прочность не ниже 35 кгс/см<sup>2</sup>. Этот бетон получен и стабильно выпускается. Протокол испытаний производственной лаборатории предприятия см. в приложении А.

В последнее время появилось много публикаций, касающихся производства ячеистых бетонов пониженной плотности [150, 209]. Кроме того, на последних конференция Национальной ассоциации производителей газобетона в России появились доклады о разработках немецкой фирмы Маза-Хенке о системе Литопор, позволяющей производить газосиликат со средней плотностью 300 – 350 кг/м<sup>3</sup> [210].

Мы абсолютно уверены, что в ближайшие годы ячеистые бетоны, имеющие плотность 400 и 300 кг/м<sup>3</sup> можно будет причислять к конструкционно-теплоизоляционным.

Повышение прочности силикатных материалов может быть достигнуто и с помощью некоторых электролитов: NaCl, CaCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> и т.п. Механизм их действия следующий.

Известно, что гидроксид кальция отличается малой растворимостью, которая резко падает с ростом температуры. Известно также, что растворимость Ca(OH)<sub>2</sub> в воде очень мала – 1,15 г/л по CaO при комнатной температуре. В то же время растворимость кремнекислоты с ростом температуры резко возрастает, особенно в присутствии ионов гидроксила.

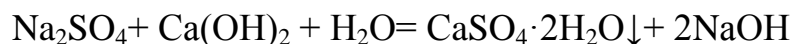
При этом усиливается образование гидросиликатной связки силикатных и газосиликатных изделий.

При добавлении 0,5 – 3% таких солей, как NaCl, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и других, концентрация ионов кальция в жидкой фазе вяжущих систем растет. Она тем больше, чем выше растворимость кальциевой соли соответствующей кислоты и увеличивается в ряду: CaSO<sub>4</sub> < CaS<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> < CaCl<sub>2</sub>. В этом же ряду растет и эффективность действия натриевых солей соответствующих кислот как ускорителей твердения гидросиликатной связки бетонов. По крайней мере, этот ряд соблюдается для силикатных материалов портландцементного клинкера.

Однако изложенное обобщение имеет и исключения. Так, например, сульфат кальция в повышенных дозировках может вызывать в структуре силикатных бетонов деструктивные напряжения, так как при автоклавной обработке, в зависимости от ее температуры, превращается в α-ПСК (полуводный сульфат кальция), либо, что более вероятно, в α-растворимый ангидрит. Последний гидратируется с большим локальным изменением объема твердой фазы, что снижает эффективность этой добавки.

В этой связи представляют интерес данные [211, 212] о том, что добавка гипса снижает прочность силикатных бетонов автоклавного твердения, а Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – повышает [213].

В современной технической литературе по вяжущим системам утверждается, что при добавлении этой соли идет обменная реакция с образованием гипса:



Наши термодинамические расчеты ( $\Delta G_p > 0$ ), а также правила кислотно-основных взаимодействий [108] свидетельствуют о том, что эта реакция идет не нацело, а лишь частично. Для ее полной реализации

необходимо отводить продукты реакции, в том числе гипс, что невозможно в составе силикатных бетонов, где концентрация ионов кальция очень мала (0,1 – 0,3 г/л). В связи с этим, добавка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  не вызывает такие большие напряжения, как гипс, и более предпочтительна.

Из изложенного следует, что необходимы серьезные исследования и производственная апробация химических добавок для интенсификации производства силикатных бетонов автоклавного твердения.

### **4.3 Влияние влажности газосиликата на формирование структуры и эксплуатационные свойства изделий**

#### **4.3.1 Влияние влажности сырца на формирование структуры и свойства газосиликатов**

Известно, что все, существующие на сегодняшний день технологии производства ячеистых материалов автоклавного твердения характеризуются большими расходами воды для приготовления бетона, особенно при работе по литевой технологии. Это способствует появлению некоторых видов дефектов изделий в процессе изготовления. В частности, повышенная влажность массива, вышедшего из зоны ферментации на линию резки, может стать основной причиной «слипания» после автоклавирования вертикальных рядов изделий между собой (рис. 4.5 а), или залипания подрезного слоя при разделении горизонтальных рядов массивов на делителе (технологическая линия «МАЗА-ХЕНКЕ»), рис. 4.5 б.

В г. Белгород в 2008 году был введен в эксплуатацию завод по производству ячеистых блоков автоклавного твердения на технологической линии «MASA-HENKE», которая от других аналогичных линий производства отличается тем, что массив кантуется один раз при его распалубке, при этом резка массива–сырца и его автоклавная обработка

происходит в вертикальном положении, а на запорочном днище формы остается подрезной слой, который после автоклавирования должен быть отделен от основного массива делителем. Однако, в данной технологии могут появляться следующие дефекты: при недостаточной прочности сырого массива – слипание между собой горизонтальных рядов блоков и некачественное отделение подрезного слоя на делительной машине. Для того чтобы эти дефекты минимизировать, технология пооперационного контроля предусматривает контроль пластической прочности бетона перед резкой. Этот показатель оправдан при условии разделения изделий еще в сырых массивах.



Рис. 4.5 – Дефекты изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения  
а – слипание вертикальных рядов блоков; б – не отделившийся подрезной  
слой в массиве

Известно, что на величину пластической прочности массивов влияет огромное количество факторов, основные из которых: плотность бетона, количество сухих веществ в единице объема, состав бетона, размер массива, точки проведения замеров, скорость погружения конуса пластометра в массив–сырец, характеристики пружины пластометра и др. Поэтому, при разных составах бетонов всякий раз необходимо подбирать приемлемую для хорошего разделения рядов порезанных массивов

пластическую прочность перед резкой. В случае очень высокой прочности массив будет хорошо делиться, но в процессе горизонтальной резки появятся трещины; при пониженной прочности массива-сырца обязательно будет залипание подрезного слоя. Поэтому, для повышения качества изделий, изготавливаемых по технологии MASA-HENKE, необходимо подобрать оптимальную температуру и прочность массива-сырца перед резкой.

Установленная зависимость качества и прочности газосиликата от его влажности перед резкой для ударной технологии производства газосиликата приведена на рис. 4.6.

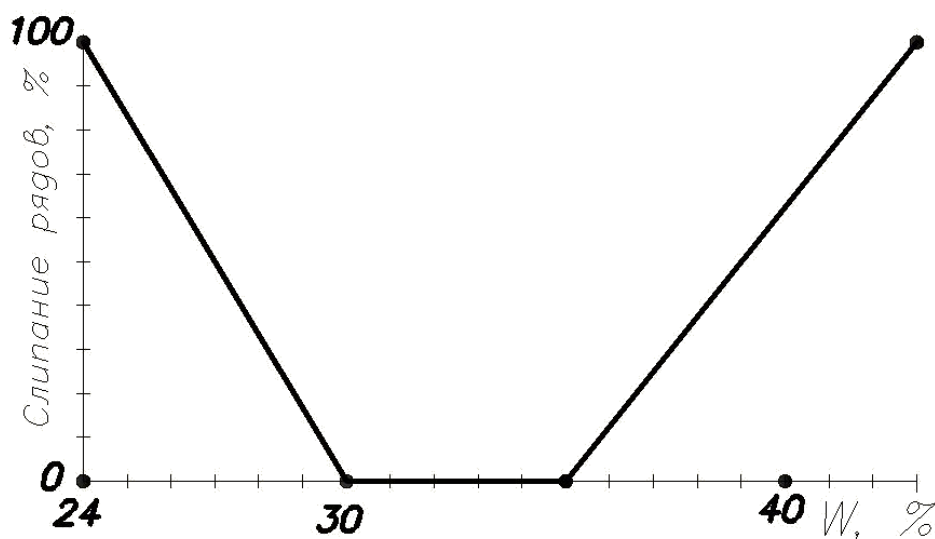


Рис. 4.6 – График зависимости степени слипания рядов массивов от влажности газосиликата перед резкой

Авторами установлено также, что быстро и качественно установить требуемый параметр прочности в названной технологии можно по температуре и влажности массива перед резкой. Для таких измерений обычно применяются термогигрометры. Однако оказалось, что все термогигрометры, производимые в России и за рубежом, предназначены для измерения влажности и температуры воздуха в помещениях. Приборы,

способные измерить влажность агрессивных (щелочных) сред с температурой 75 – 110 °С не выпускаются. Нами разработан термогигрометр, способный измерять температуру и влажность в середине массива-сырца (щелочной среде на глубине до 350 мм). Предлагаем принципиальную схему этого прибора (рис. 4.7).

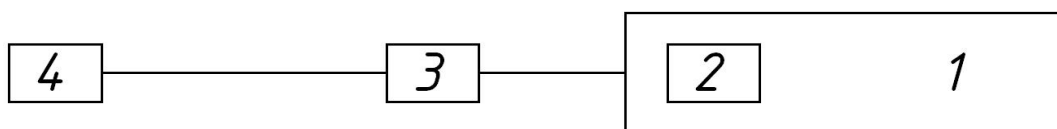


Рис. 4.7 – Принципиальная схема термогигрометра для агрессивных сред

1 – измеритель влажности и температуры; 2 – экран (дисплей);

3 – датчик температуры; 4 – датчик влажности в защитном кожухе.

В отличие от аналогов, в этом приборе датчик влажности имеет специальное щелочестойкое покрытие. Разработанный нами прибор позволяет быстро и качественно определять температуру и влажность массива-сырца перед резкой, своевременно производя необходимые изменения в составе бетона, а так же других технических и технологических параметрах в случае необходимости, что приводит к значительному улучшению показателей качества выпускаемой продукции.

#### **4.3.2 Влияние влажности газобетонов на их эксплуатационные свойства**

Имеется большое количество публикаций, касающихся отношения изделий ячеистых бетонов автоклавного твердения к влажности среды, многие из них не систематизированы и не могут служить источниками обобщений и выводов [42, 45, 214 – 216].

Начнем с рассмотрения и обсуждения основной нормативной документации, введенной в последние годы: ГОСТ 31359 и ГОСТ 31360.

Разработка и принятие этих документов для внедрения ячеистых материалов в строительство – бесспорный шаг вперед. Но остается много

вопросов, замалчивание которых не позволит в полной мере использовать все преимущества ячеистых бетонов автоклавного твердения.

ГОСТ 31359, в отличие от ранее действующих нормативных документов, расширяет диапазон конструкционно-теплоизоляционных стеновых материалов (к ним стали относить бетоны марки по средней плотности D 500), при этом должна обеспечиваться достаточная прочность бетона и, соответственно, несущая способность стен зданий, поскольку из ячеистых блоков, имеющих класс бетона по прочности при сжатии В 2,5 и В 3,5, в республике Беларусь уже проектируют и строят здания с несущими стенами высотой до пяти этажей. В то же время проектировщики, потребители, а также многие ученые-исследователи считают, что прочность бетонов напрямую зависит от их марки по плотности и поэтому изделия из бетона плотностью  $500 \text{ кг/м}^3$  не могут иметь высокую прочность. Практика производства показывает, что ячеистые бетоны автоклавного твердения при одном и том же значении средней плотности, например, D 500, можно изготовить со средней прочностью при сжатии, соответствующей диапазону пяти классов: от В 1,5 до В 5 и марок по морозостойкости от F 15 до F 75 и даже F 100. Это положительное качество новых технологий производства автоклавных ячеистых бетонов.

Еще один вопрос, требующий обсуждения – влажность ячеистых бетонов, параметр, по поводу которого до сих пор много споров и нет единства мнений. Например, в стандартах, действующих в России до 2007 года, а в стандартах республики Беларусь и до настоящего времени, регламентируется отпускная влажность изделий из ячеистых бетонов – не более 25 %. Это требование позволяло стабилизировать эксплуатационные свойства и гарантировало высыхание бетона за относительно короткий промежуток времени после возведения здания и пуска его в эксплуатацию для обеспечения нормируемого СНиП II-3-79\* [217] значения сопротивления теплопередаче стен зданий из ячеистых блоков.

Большинство предприятий, особенно работающие по литьевой технологии, не могут обеспечить такую отпускную влажность, так как отгрузка изделий производится практически сразу после автоклавирования и упаковки, с влажностью, как правило, более 40 %. Повышению влажности бетонных изделий способствуют также способ упаковки изделий «в термоусадочную пленку» и хранение их на открытых складах. В новом стандарте ГОСТ 31360 параметр «отпускная влажность» вообще отсутствует.

Кроме того, возникает много дополнительных вопросов, по которым имеются разночтения, например:

1. какое значение средней плотности принимать для отсчета влажности бетона: нормативную среднюю плотность бетона или количество сухих веществ, заданное в расходе материалов на единицу объема;

2. при какой влажности определять марку бетона по плотности:

– в сухом состоянии по ГОСТ 12730.2–78 [218];

– при эксплуатационной влажности, указанной в СНиП II–3–79\* для различных регионов (8 или 12%);

– при «равновесной» влажности 4 или 5% указанной в приложении А ГОСТ 31360;

– при так называемой, равновесной эксплуатационной влажности, которая составляет по данным различных источников, от 3 до 6 % [45, 214].

Необходимо установить, какие значения влажности приводятся в публикациях? Их величины: влажность после автоклавирования – 35 – 40% и значения равновесной влажности обычно отсчитываются от нормативной средней плотности бетона. Так, при марке по плотности ячеистого бетона D 500 и массе образца-куба с размерами граней 100 мм после автоклава, к примеру, 675 – 700 грамм, расчетная влажность образца, по формуле из ГОСТ 12730.2 действительно равно 35 – 40%:



$$W_m = \frac{m_b - m_c}{m_c} \times 100\% = \frac{675(700) - 500}{500} \times 100\% = 35 (40)\%$$

где  $m_b$  – масса образца бетона до сушки в г;

$m_c$  – масса образца бетона после сушки, г.

В результате проведенных исследований авторами установлено, что если расход сухих компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетона равен его средней плотности, например, 500 кг/м<sup>3</sup>, то при проведении испытаний стандартными методиками ГОСТ 7076 – 99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» [219] коэффициент теплопроводности материала становится намного выше требуемого по нормативу значения, в частности  $\lambda_{\text{факт}} > \lambda_{\text{тр}}$  (0,12 Вт/м<sup>°С</sup>). Этому способствует химически связанная вода, которой, по утверждениям многих авторов, содержится не менее 10% от массы бетона. Именно поэтому, устанавливаемые на предприятиях нормы расхода сухих компонентов бетона ниже нормируемой средней плотности бетона, в частности для марок по средней плотности: D 600 – 565 - 580 кг/м<sup>3</sup>; D 500 – 465 - 480 кг/м<sup>3</sup>; D400 – 370 - 380 кг/м<sup>3</sup>. Именно эти значения расхода материалов должны быть точкой отсчета для определения влажности ячеистого бетона. С учетом сказанного, фактическая влажность материала сразу после автоклавной обработки составляет более 50%.

Кроме того, отсутствие ограничения влажности изделий при отпуске потребителю приводит к снижению эффективности грузоперевозок из-за «недогруза» транспорта. Особенно это сказывается в периоды межсезонья, когда повсеместно ограничиваются массы перевозимых по автодорогам грузов. Это же касается железнодорожного транспорта.

Еще одно сомнительное утверждение о значении равновесной влажности ячеистого бетона в процессе эксплуатации... Во многих публикациях указываются ее значения от 3 до 6%, при этом не понятно, каким образом и в каких регионах можно получить такую низкую

равновесную влажность в наружных стенах зданий и много ли таких регионов в России? Результаты натуральных и лабораторных экспериментов показывают, что при расходе сухих веществ, например, 500 кг/м<sup>3</sup>, высушить стандартный образец размерами 100 × 100 × 100 мм можно только до 3 – 4 % влажности по массе, но так как ячеистый бетон гигроскопичен, он мгновенно набирает парциальную влагу, которой в образце становится намного больше 6%. Так откуда же появились значения равновесной влажности 3 – 6%?

При марке по плотности ячеистого бетона *D500* и влажности 3 – 6 % средняя плотность материала находится в диапазоне 515 – 530 кг/м<sup>3</sup>. Учитывая указанный ранее фактический расход сухих веществ на единицу объема для марки по средней плотности *D 500* при пересчете влажности образца по массе, получаем:

$$W_m = \frac{515 (530) - 465 (480)}{465 (480)} \times 100\% = 10,7 (9,3)\%$$

Полученные значения свидетельствуют о том, что фактическая равновесная влажность испытываемых образцов находится в диапазоне 8 – 12 %. Это соответствует принятым еще в СССР нормативам значений равновесной влажности в различных климатических районах по СНиП П–3–79\* «Строительная теплотехника» и не соответствует значениям, указанным в публикациях ряда авторов.

Таким образом,

– при значительном отличии установившихся значений расхода сухих веществ на единицу объема на разных предприятиях, многие результаты научных исследований, приводимые в публикациях, относятся к частным условиям производства и не могут быть без поправок использованы или обобщены для других технологий и производств;

– в научных публикациях значения влажности готовых изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения различных марок по плотности

необходимо указывать с учетом расхода сырьевых материалов на единицу объема в сухом состоянии;

– от влажности сырого массива ячеистого бетона во многом зависит качество готовой продукции, поэтому для обеспечения высокого качества изделий, необходимо ограничивать и контролировать влажность массива перед резкой;

– значения равновесной эксплуатационной влажности ячеистых бетонов автоклавного твердения должны быть тщательно проверены в отношении расхода сухих компонентов на единицу объема и установлены для каждого региона.

Необходимо проведение дальнейших исследований для определения зависимостей: плотность – состав – влажность сырого массива перед резкой – прочность – влажность готовых изделий – теплопроводность ячеистых бетонов автоклавного твердения с целью прогнозирования и обеспечения стабильности их эксплуатационных свойств.

При анализе влияния влажности на процессы, происходящие при производстве газосиликатных изделий (снижение прочности и повышение средней плотности изделий при охлаждении слипание изделий и т.п.) необходимо иметь в виду изложенные нами данные о фазовом составе гидросиликатной связки газобетонов и его изменении в процессе автоклавирования и после него.

Как установлено расчетами и подтверждено экспериментально, при автоклавировании фазовый состав гидросиликатов изменяется от  $C_2SH(A)$  в начале теаловой обработки до тоберморита и далее ксонотлита. Последний при охлаждении способен превращаться в тоберморит с присоединением значительного количества воды и ростом средней плотности. Эти процессы могут сопровождаться увеличением объема системы, это снижает трещиностойкость изделий. Процесс образования тоберморита из ксонотлита вызывает диспергирование частиц гидратной фазы, усиление ее клеящих свойств, что способствует слипанию изделий.

Важнейшим способом минимизации этих нежелательных процессов является снижение влажности газосиликата в период его формования.

#### **4.4 Теплопроводность и паропроницаемость силикатных ячеистых бетонов автоклавного твердения**

Ячеистые бетоны автоклавного твердения обладают улучшенными по сравнению другими бетонами теплоизоляционными свойствами и повышенной паропроницаемостью. Коэффициенты теплопроводности и паропроницаемости бетонов в зависимости от средней плотности указаны в нормативной (ГОСТ 31359 и справочной литературе (табл. 4.2).

В результате проведенных авторами многочисленных исследований установлено, что если фактическая средняя плотность бетона в сухом состоянии  $500 \text{ кг/м}^3$ , то при проведении испытаний по стандартным методикам ГОСТ 7076 – 99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» коэффициент теплопроводности материала получается намного выше требуемого по нормативу значения, т.е.  $>0,12 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$ , поэтому, для полного соответствия требованиям СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» [220] необходимо, чтобы средняя плотность бетона в сухом состоянии была ниже значения  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Стандартные методики определения коэффициента теплопроводности разработаны для различных состояний бетона:

- высушенного до постоянной массы (при этом влажность может колебаться в широких пределах от 0 до 4 %);
- во влажном состоянии;
- при влажности 4 и 5 % (данные показатели установлены ГОСТ 31360.

Таблица 4.2 – Стандартные зависимости коэффициентов теплопроводности и паропроницаемости от марки по средней плотности ячеистых бетонов

Марка ячеистого бетона по средней плотности	Коэффициент теплопроводности ячеистого бетона в сухом состоянии $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	Коэффициент паропроницаемости ячеистого бетона $\mu$ , мг/(м·ч·Па), не менее
D200	0,048	0,30
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	0,20
D600	0,14	0,16
D700	0,17	0,15
D800	0,19	0,14
D900	0,22	0,12
D 1000	0,24	0,11
D 1100	0,26	0,10
D 1200	0,28	0,09

По опыту производства и большого количества проведенных экспериментов установлено, что все испытания, в том числе определение средней плотности бетонов, для устранения разночтений, необходимо проводить только в сухом состоянии, так как получать стабильную фиксированную влажность в бетонах из-за многофакторности их качества невозможно.

По данным таблицы 4.2 были построены графики зависимости коэффициентов теплопроводности и паропроницаемости марки по средней плотности газобетона и выведены формулы для их расчета (рис. 4.8).

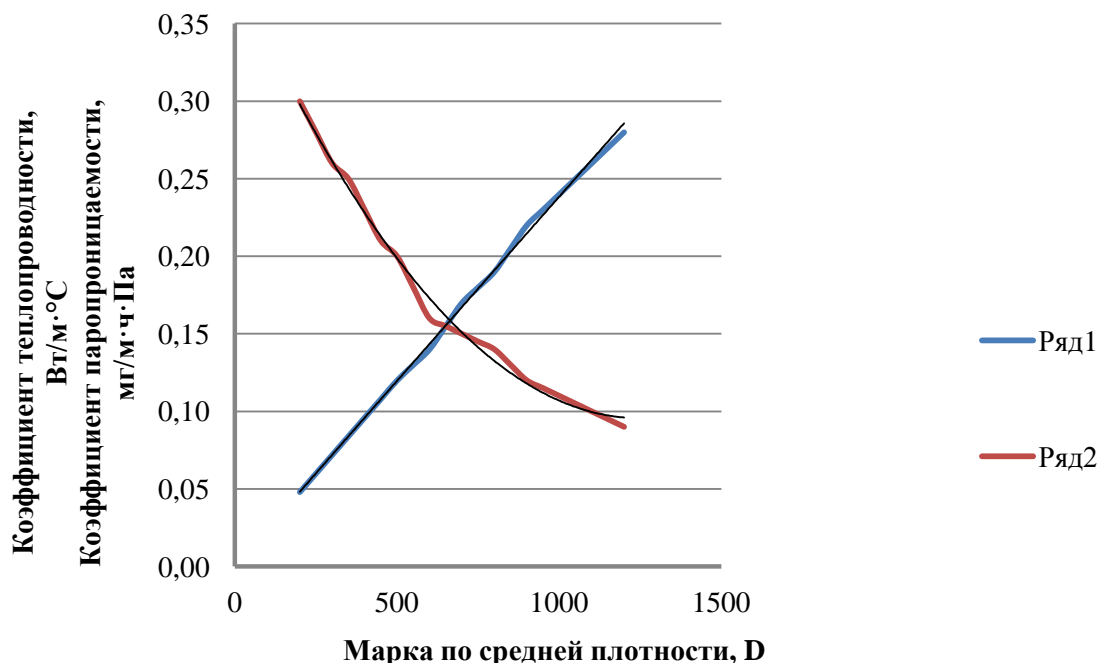


Рис. 4.8 – Зависимости коэффициентов теплопроводности и паропроницаемости от плотности газобетона (ось ординат: для ряда 1 – коэффициент теплопроводности Вт/м·°С; для ряда 2 – коэффициент паропроницаемости)

График зависимости коэффициента теплопроводности от средней плотности наиболее соответствует степенной функции:

$$y = 0,0002 x^{0,9943}$$

Величина достоверности аппроксимации графика –  $R^2=0,9995$ .

Зависимость коэффициента паропроницаемости от средней плотности соответствует полиномиальной зависимости следующего вида:

$$y = 2E-0,7 x^2 - 0,0005 x + 0,3826,$$

при этом величина достоверности аппроксимации –  $R^2=0,9945$ .

Как видно, наиболее достоверно выведенные формулы подходят для диапазона плотностей 200 – 500 кг/м³. Именно эти значения средней

плотности и являются наиболее актуальными для новых конструкционно-теплоизоляционных материалов.

Итак, по значениям коэффициентов теплопроводности и паропроницаемости, установленным ГОСТ 31359 выведены их математические зависимости от средней плотности автоклавного ячеистого бетона в сухом состоянии. Практическая проверка по результатам производственных испытаний показала полное соответствие данных зависимостей фактическим данным.

Зависимость «плотность – паропроницаемость» наиболее достоверна в пределах плотностей бетонов от 200 до 550 кг/м<sup>3</sup>, зависимость «плотность – теплопроводность» достоверна в пределах всего рассматриваемого интервала плотностей: 200 – 1200 кг/м<sup>3</sup>.

#### **4.5 Влияние аддитива на свойства силикатных газобетонов**

Аддитивом в настоящем исследовании назван продукт вторичной переработки газобетона, в том числе подрезной слой или подлежащая переработке некондиционная продукция. Поставщики технологических линий для производства газосиликата сразу предлагают технологическое оборудование для переработки газосиликата. Технологическая схема такой линии приведена на рис. Б-1 Приложения Б. Стоимость приобретения такой технологической линии достаточно высока: не менее 300000 евро. Нами разработана технологическая линия, состоящая из оборудования отечественного производства (рис. Б-2 Приложение Б). Стоимость такой технологической линии, включая стоимость монтажа – порядка 100000 евро.

Измельченный газобетон, используемый в качестве сырья для газобетонных смесей обладает позитивными свойствами: прочность, пористость, низкая плотность. Кроме того, этот материал в заливочной смеси играет роль стабилизатора структуры и дополнительных центров

кристаллизации, что ускоряет процесс набора пластической прочности «зеленого» массива.

Характеристики аддитива переработанного на указанной технологической линии приведены в табл. 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты ситового анализа аддитива

номер сита	частный остаток	полный остаток
2,5	0	0
1,25	0,1	0,1
0,63	10,2	10,3
0,315	36,7	46,9
0,16	15	61,9
Проход через сито 0,16	38	–

Таблица 4.4 – Характеристики переработанного газобетона

Наименование параметра, ед. изм.	Значение параметра
модуль крупности	1,19
насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	803,0
истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,55
S уд., см <sup>2</sup> /г после помола	6274,68
влажность, %	21,9

Для определения влияния количества добавляемого в заливочную смесь аддитива на технологические и прочностные свойства газосиликата на базе одного из предприятий были проведены исследования и получены следующие результаты.

Так как используемая технология производства газосиликата предполагает технологический отход 3,3 % подрезного слоя, в эксперименте не исследовалось влияние менее 4 % от массы сухих веществ аддитива. Кроме того, по результатам проверки CaO в готовом газобетоне установлено, что остаточный CaO составляет 0,5 %, соответственно в аддитиве его столько же, таким образом, считаем, что аддитив – инертная добавка.



Исходя из того, что частицы аддитива являются центрами кристаллизации, в результате эксперимента установлено, что добавление аддитива дает устойчивость и большую стабильность структуре газобетонной смеси.

Было проведено исследование влияния процентного содержания аддитива на конечную прочность изделий, в результате установлено, что по мере повышения количества добавки аддитива в смеси до 7 % прочность газосиликата возрастает. Повышение содержания до 8 % не дает прироста прочности, с дальнейшим повышением содержания аддитива (до 10%) прочностные свойства бетона падают. Таким образом, содержание аддитива в составе газосиликата выше 7 % – нецелесообразно.

#### **4.6 Влияние обратного шлама на свойства силикатных газобетонов**

В современных технологических линиях, как было указано в главе 2, залитые газосиликатные массивы разрезаются на изделия в сыром состоянии. Срезанный газобетон собирается в приемке линии резки, затворяется водой до определенной плотности и направляется для промежуточного хранения в шламбассейны обратного шлама. Как правило, весь обратный шлам в качестве повторно направляется в заливочную смесь. Обычно его содержание составляет в среднем 14 – 17 % от массы сухого вещества газобетона.

Нами было проверено влияние обратного шлама на прочностные свойства готовых изделий.

В результате проведенных лабораторных исследований установлено (способом обратного титрования по немецкой методике), что обратный шлам не является инертной добавкой, так как содержание в нем свободного СаО в среднем находится на уровне 26 – 28 %.

Обратный шлам благоприятно влияет на реологические свойства газобетонной заливочной смеси. Он повышает вязкость, седиментационную устойчивость и способствует ускорению созревания

массивов в зоне ферментации. Повышенное содержание обратного шлама улучшает пластические свойства газосиликата при его резке, снижая опасность появления трещин, что позволяет ускорить процесс разрезания созревшего массива на отдельные изделия.

В результате проведенных промышленных экспериментов установлено, что содержание обратного шлама до 20 % от массы сухого вещества повышает прочностные показатели газобетона. При дальнейшем увеличении содержания обратного шлама прочность начинает падать. Так, при увеличении обратного шлама до 35 % прочность может снизиться с класса В 2,5 до В 2.

#### **Выводы по 4 главе**

1. Резкое снижение химического сродства между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{SiO}_2$  при высоких температурах обусловлено тем, что при этом более чем на 30 ккал/моль уменьшается свободная энергия образования кремнекислоты (для иона  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ,  $\Delta G_{298}^0 = -283,7$  ккал/моль, а  $\Delta G_{473}^0 = -248$  ккал/моль). Свободная энергия реакции ионов кальция практически не меняется, а гидроксильных групп падает. В результате свободная энергия реакции  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2$  с выделением в жидкую фазу кремнекислородных анионов и гидроксильных групп смещается в положительную область на 20 – 40 ккал/моль, в зависимости от схемы расчета. Наблюдаемый в действительности резкий рост скорости этой реакции, по нашему мнению, обусловлен эффектом Хэдвалла.

По литературным данным установлено, что в данной системе, кварц претерпевает полиморфные превращения, переходя в  $\alpha$ -тридимит. Известно, что этот переход осуществляется при температуре 163 °С при отсутствии посторонних примесей. В присутствии щелочных и щелочноземельных оксидов –  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  – температура фазового превращения смещается на 10 – 20 °С вниз. При помоле содержание активной фазы диоксида кремния возрастает, особенно в поверхностных слоях частиц. Фазовый переход тридимита активизирует химические

реакции с его участием. В связи с изложенным в системе  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-SiO}_2$  это превращение происходит при температуре 150 – 160 °С, что совпадает с критической точкой, отмеченной Р. Айлером.

2. Низкоосновные гидросиликаты кальция являются основными носителями прочности газобетонного силикатного камня. Для их синтеза необходимо минимальное количество извести при максимальном расходе песка. Они идеально подходят для формирования прочности газобетонов, т.к. у них более пологая кривая зависимости прочности от пористости, а высокоосновные гидросиликаты лучше как носители прочности пресованных систем. Исходя из этого, дано теоретическое обоснование возможности получения из двухосновных гидросиликатов кальция группы гиллебрандита камня с высокими физико-механическими показателями, если при этом с помощью специальных ПАВ разрушить кластерную структуру заливочной смеси, что обеспечит высокоплотную упаковку частиц.

Изложенные теоретические соображения подтверждены экспериментальными исследованиями пластификатора, приведенными в работе. При этом получен цементный камень на гидросиликатной связке, с уникальными свойствами, основой которой являются  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и портландит.

3. Силикатные бетоны на ксонотлитовой связке отличаются более высокой атмосферостойкостью, чем на тоберморитовой [10, 95], однако их производство требует повышенных энергозатрат. При этом нет гарантии стабильности их фазового состава при нормальной температуре. В связи с этим рекомендуется производить сушку газосиликатных изделий сразу после их выгрузки из автоклава до остаточной влажности не выше 20%, что будет способствовать стабилизации их фазового состава и эксплуатационных характеристик.

4. Снижение влажности после автоклавной обработки бетонов предотвращает или ограничивает фазовые превращения тоберморит $\leftrightarrow$ ксонотлит. Это обеспечивает дополнительное преимущество

ударной технологии производства силикатных газобетонов перед литьевой.

5. В настоящее время для определения степени вызревания бетона перед резкой массива применяются индикационные приборы – пенетрометры. Установлено, что пластическая прочность является второстепенным фактором в этом процессе. Теоретически обоснован способ определения степени созревания массивов в зоне ферментации бетонов (перед резкой), по влажности и температуре смеси. Влажность можно определять более точно, в том числе методами нейтронографии, гигрометрии и др., которые быстро совершенствуются.

6. Разработан и апробирован прибор – термогигрометр, позволяющий быстро и качественно делать замеры при операционном контроле. По результатам замеров можно оперативно вмешиваться в процесс и регулировать необходимые технологические свойства заливочных смесей и твердеющих в отделении ферментации массивов.

7. Установлено, что обратный шлам оказывает благотворное влияние на реологические и технологические свойства заливочной смеси: придает вязкость и устойчивость, ускоряет созревание газосиликата. Однако, добавление в состав газобетонной заливочной смеси более 20 % обратного шлама не целесообразно, так как снижается средняя прочность при сжатии готовой газосиликатной продукции.

8. Установлено, что молотый газобетон является инертной добавкой. Его ввод в состав газобетонной смеси положительно сказывается на технологических свойствах заливочной смеси (устойчивость и скорость созревания массивов в зоне ферментации). Определено, что добавление более 7 % молотой добавки ухудшает прочностные свойства конечной продукции.

9. Разработана технологическая линия по переработке отходов газосиликата, более экономичная и эффективная по сравнению с немецким аналогом.

## **5. Обеспечение качества производства ячеистых бетонов автоклавного твердения**

### **5.1 Анализ существующих технологий производства автоклавного газобетонов**

Для производства изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения в настоящее время применяются в основном европейские технологии производства [221 – 227]. Наиболее известны фирмы – поставщики технологического оборудования: MASA-HENKE, HESS, WEHRHANN, и др., а в последнее время – Китай [228]. Научное сопровождение данных технологий является собственностью фирм-производителей газобетонов, поэтому для нас оно практически недоступно.

Рассмотрим проблемы технологии производства газобетона, в рамках настоящей работы, предлагается их научное объяснение и пути решения.

Все современные линии по производству газобетона имеют в основном одни и те же технологические переделы:

- прием и складирование сырьевых материалов;
- подготовка сырьевых материалов (помольное отделение);
- приготовление алюминиевой суспензии;
- приготовление (дозирование и смешивание компонентов) смеси и заливка в форму;
- вспучивание смеси (с применением или без применения вибрационных воздействий);
- выдержка до резки (набор пластической прочности);
- резка массива на изделия заданной номенклатуры;
- автоклавирование;
- разделение горизонтальных рядов массивов;
- упаковка и хранение изделий.

Требования, предъявляемые к сырьевым материалам, а также их основные характеристики (с учетом рекомендаций автора) представлены в главе 1.

Рассмотрим и обсудим более подробно принципиальные отличия различных технологий по технологическим переделам.

### **Прием и складирование сырьевых материалов**

Доставка сырьевых материалов на заводы осуществляется автомобильным или железнодорожным транспортом.

В качестве вяжущих материалов в производстве используются цемент и известь. При этом чаще всего используется комовая известь, из которой на заводах изготавливают известково-кремнеземистое вяжущее (ИКВ), получаемое путем совместного помола извести и кварцевого песка. Это обстоятельство накладывает определенные требования к условиям хранения извести, для которой должны быть предусмотрены специальные емкости в закрытых складах, предотвращающих влияние на нее атмосферных осадков.

Песок может храниться как в открытых, так и в закрытых складах.

Закрытые склады для кремнеземистого компонента на предприятиях России должны быть организованы обязательно. Объем склада рассчитывается из условия хранения песка не менее чем на 3 суток. Склад должен иметь специальную конструкцию пола, предусматривающую отвод из песка излишков воды, а так же, в случае необходимости, обеспечения возможности принудительного подсушивания песка, в том числе при работе в зимних условиях.

В некоторых случаях в технологиях предусмотрено применение гипса как добавки для регулирования сроков схватывания и набора пластической прочности газосиликата в зоне ферментации.

Цемент, молотая известь, гипс полуводный или двуводный (порошкообразные) доставляются в автоцементовозах, разгружаются с

помощью пневмотранспорта в силосы, оборудованные датчиками уровня и температуры.

Алюминиевая паста или пудра хранятся в специальных складах, с обеспечением эффективной вентиляции и постоянной температуры не выше 20 °С.

### **Подготовка сырьевых материалов**

Во всех технологических линиях, песок поступает в производство в виде песчаного шлама определенной плотности, а так же в виде известково-кремнеземистого вяжущего, в случае, если это предусмотрено конкретной технологией. Приготовление шлама и ИКВ обычно происходит в помольном отделении, которое, как правило, укомплектовано двумя шаровыми мельницами: мокрого (песчаный шлам) и сухого (ИКВ) помола (рис. 5.1).

Песок и известь попадают в приемные бункера, затем транспортирующими приспособлениями поднимаются в расходные бункера, из которых весовыми питателями подаются в мельницы.

Мельницы могут быть одно- и двухкамерными. Помол осуществляется с помощью мелющих тел различного диаметра (шары или цельпекс) при непрерывном вращении мельниц. Для повышения эффективности помола, применяемые мелющие тела должны быть разного диаметра: 40 – 20 мм.



Рис. 5.1 — Отделение помола материалов

Для приготовления песчаного шлама в мельницу мокрого помола подается песок, вода, часть которой иногда заменяют конденсатом (10 – 40 %). Конденсат, являясь щелочным материалом, может играть роль интенсификатора помола песка. Кроме того, применение конденсата в производстве решает проблемы энергосбережения и многие экологические проблемы предприятий [229].

При литьевых технологиях изготовления газобетонов в мельницу мокрого помола может добавляться гипсовый камень. Обычно соотношение песка и гипса составляет 10 : 1. На выходе мельницы мокрого помола через основное разгрузочное отверстие шлам попадает на сито, где отсеиваются грубые фракции материала и мелющие тела. Далее при помощи вмонтированных в шламопровод объемных весов выполняется контрольный замер плотности шлама. Готовый песчаный шлам, нормативная плотность которого должна составлять 1,68 – 1,72 тн/м<sup>3</sup> насосом по системе шламопроводов подается в шламбассейны (рис. 5.2), где производится его гомогенизация за счет непрерывно вращающейся вертикальной мешалки.



Рис. 5.2 – Шламбассейны прямого шлама

Основные параметры шлама, контролируемые при помоле:

– плотность;



– тонкость помола (удельная поверхность), колеблется от 300 до 220 м<sup>2</sup>/кг в зависимости от плотности изготавливаемого ячеистого бетона. Чем меньше средняя плотность выпускаемого газосиликата, тем тоньше необходим помол песчаного шлама. Но чрезмерный помол песка может нанести ущерб качеству газосиликата.

Технологические расчеты, проводимые с целью определения расхода песка в объеме размолотого песчаного шлама, должны выполняться по следующей формуле:

$$m_{\text{песка}} = \frac{\gamma_{\text{ист}} \cdot (\gamma_{\text{пш}} - 1)}{\gamma_{\text{ист}} - 1}$$

где:  $\gamma_{\text{ист}}$  – истинная плотность песка, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{\text{пш}}$  – плотность прямого шлама, кг/м<sup>3</sup>.

Исходя из того, что в 1 литре прямого шлама при разных плотностях находится различное количество в песка (кг), считая истинную плотность кварцевого песка 2,65 кг/м<sup>3</sup>, автором посчитаны и приведены в табл. 5.1 расходы сухого песка на 1 м<sup>3</sup> прямого шлама.

Таблица 5.1 – Расчетные данные массы песка и воды в м<sup>3</sup> прямого шлама

Плотность шлама, тн/м <sup>3</sup>	Количество песка, кг/м <sup>3</sup> шлама	Количество воды, кг/м <sup>3</sup> шлама	Плотность шлама, тн/м <sup>3</sup>	Количество песка, кг/м <sup>3</sup> шлама	Количество воды, кг/м <sup>3</sup> шлама
<b>1,55</b>	0,883	0,667	<b>1,68</b>	1,092	0,588
<b>1,56</b>	0,899	0,661	<b>1,69</b>	1,108	0,582
<b>1,57</b>	0,915	0,785	<b>1,7</b>	1,124	0,576
<b>1,58</b>	0,931	0,649	<b>1,71</b>	1,140	0,57
<b>1,59</b>	0,948	0,642	<b>1,72</b>	1,156	0,564
<b>1,6</b>	0,964	0,636	<b>1,73</b>	1,172	0,558
<b>1,61</b>	0,980	0,63	<b>1,74</b>	1,188	0,552
<b>1,62</b>	0,996	0,624	<b>1,75</b>	1,204	0,546
<b>1,63</b>	1,011	0,619	<b>1,76</b>	1,22	0,54
<b>1,64</b>	1,028	0,612	<b>1,77</b>	1,237	0,533
<b>1,65</b>	1,044	0,606	<b>1,78</b>	1,253	0,527
<b>1,66</b>	1,060	0,6	<b>1,79</b>	1,269	0,521
<b>1,67</b>	1,076	0,594	<b>1,8</b>	1,285	0,515

Помол комовой извести с песком для изготовления ИКВ чаще всего осуществляется в соотношениях 50 : 50 % или 60 : 40 %, при этом активность вяжущего (по содержанию активного СаО) должна находиться в пределах 48 – 52 % по СаО в зависимости от начальной активности извести и влажности песка. Движение материала в мельнице обеспечивается непрерывной подачей свежих компонентов через загрузочное отверстие. Размолотый материал насосом с помощью сжатого воздуха отправляется в гомогенизаторы или в расходные силосы.

На данном переделе остро встает вопрос интенсификации помола песка. В этом вопросе в настоящее время наблюдается определенный застой как у нас в стране, так и в передовых зарубежных фирмах. Стандартные интенсификаторы помола, к которым относятся С-3, СП-3, ЛСТМ и другие анионоактивные пластификаторы, неэффективны в данной системе. В работе автора [230] еще в 2000 году было установлено, что для разжижения смесей с высоким содержанием песка необходимо использовать неионогенные или катионоактивные добавки, которые хорошо на нем адсорбирующиеся. В дальнейших исследованиях автора [231] и других исследователей [232 – 234] это было проверено и подтверждено. Нами предложен ряд неионогенных добавок, повышающих интенсивность помола песка, однако эта информация представляет коммерческую ценность, поэтому в работе не приводится.

Весьма важным является вопрос обеспечения стабильности температур в технологическом процессе, в частности температуры прямого шлама, так как от этого зависит стабильность режимов заливки смесей. Обычно для хранения прямого шлама в технологических линиях применяют 2 шламбассейна, объемом по 250 м<sup>3</sup> каждый. Один из шламбассейнов является расходным, а второй – накопительным (в нем осуществляется гомогенизация и усреднение температуры свежемолотого шлама).

Сразу после наполнения шламбассейна песчаным шламом, его внутренняя температура обычно повышена и составляет 40 – 45 °С. С учетом температуры, которую дает известь при гашении в заливочной смеси, температура заливки при использовании свежемолотого шлама может достигать 45 – 48 °С, а по мере остывания шламбассейна, она падает до нормальных значений температуры заливки 38 – 40 °С. При переходе заливочной линии на работу со второго шламбассейна – картина повторяется. Такая нестабильность температурных режимов не может не сказаться на качестве газосиликата, особенно в летнее время, когда заливка производится без использования горячей воды.

Из сказанного видно, что вопрос обеспечения стабильной температуры прямого шлама в течение работы технологической линии весьма актуален. Для обеспечения выполнения этого условия, необходимо, чтобы шламбассейны заполнялись в кратчайшие сроки: не позднее, чем за 6 часов до включения их в заливочную линию. Некоторые предприятия для ускорения остывания прямого шлама устраивают циркуляционную рубашку для холодной воды вокруг стенок шламбассейна, другие производители газобетона добавляют в шламбассейны лед.

Максимальная производительность мельниц, устанавливаемых в современных технологических линиях – 25 т готового шлама. В пересчете на сухое вещество, получаем, что производительность мельницы при выдаче нормального шлама ( $1,68 \text{ кг/м}^3$ ) составляет порядка 16 т по сухому песку в час.

### **Приготовление и хранение обратного (возвратного) шлама**

При производстве газобетонных изделий по резательной технологии, при резке массивов на изделия образуются отходы газобетонной смеси, которые собираются в приямок линии резки, разбавляются водой и отправляются в шламохранилища (обычно это два шламбассейна емкостью по  $150 \text{ м}^3$ ). Так называемый обратный или возвратный шлам

возвращается в технологическую цепочку во время формирования газобетонных массивов, заменяя им песчаный шлак.

Обратный шлак не является инертным (пассивным) материалом. Он имеет активность по СаО от 20 до 30 %, поэтому в смесях с применением обратного шлама можно значительно экономить ИКВ или известь. Количество добавляемого обратного шлама обусловлено количеством срезаемого материала. В среднем это 15 % от массы сухого вещества газосиликата.

Наличие обратного шлама в смеси положительно влияет на качество газобетоносилкатов. При его использовании вероятность возникновения дефектов при резке массивов. Кроме того, повышается трещиностойкость готовых изделий. Это обусловлено тем, что при хранении в шламбассейне, он взаимодействует с  $\text{CO}_2$  воздуха и содержит значительно больше карбоната кальция (кальцита и арагонита), чем свежеприготовленный. В карбонизированных минералах содержится большое количество положительно заряженных активных центров, поэтому, частицы обратного шлама являются зародышами образования гидросиликатной связки, благодаря тому, что наноразмерные и субмикроскопические частицы карбоната кальция являются своеобразной сшивкой частиц Са в межпоровых перегородках.

### **Приготовление алюминиевой суспензии**

Приготовление алюминиевой суспензии осуществляется при помощи установки предварительного смешивания, которая, в целях обеспечения пожаро- и взрывобезопасности, обычно находится за пределами производственного цеха и располагаться в специально оборудованном помещении.

Смешивание алюминиевого компонента с заданным количеством воды происходит в промежуточных емкостях (рис. 5.3), оборудованных мешалками и циркуляционной системой, предотвращающей седиментацию частиц алюминия.



Рис. 5.3 – Отделение подготовки алюминиевой суспензии

Соотношение алюминий/вода варьируется от 1 : 10 до 1 : 20. Длительность перемешивания при приготовлении суспензии составляет от 20 до 60 минут. После приготовления смесь подается в расходные емкости.

В процессе выполнения диссертационного исследования, совместно с Никитиным П.А. [118], были проведены эксперименты по выявлению основного фактора, влияющего на скорость реакции алюминия в бетонной смеси. Определялся механизм действия поверхностно активных веществ (ПАВ), применяющихся для приготовления алюминиевой суспензии: сульфанол и Прогресс. Для этого необходимо было ответить на вопрос: являются ли они смачивающими добавками, позволяющими равномерно распределить алюминиевый компонент в газосиликатной смеси, или они смывают стеарин с поверхности алюминия, тем самым способствуя быстрой реакции газообразования в смесях. Для этого были проведены следующие эксперименты:

1. Пудра размешивалась в воде с ПАВ, в течение 60 мин;
2. Пудра в сухом виде затворялась щелочным раствором.

В результате проведенного эксперимента оказалось, что в обоих случаях начало газовыделения пудры началось совершенно одинаково – через 10 сек после добавления ее в щелочной раствор. Аналогичные опыты

были проведены с пудрами, имеющими различные толщины слоев стеарина. Результаты всех экспериментов показали, что начало газовыделения проб пудры одной партии зависит только от толщины стеариновой пленки на частицах алюминия. Таким образом, установлен механизм действия ПАВ, применяющихся на предприятиях по выпуску автоклавных газобетонов. ПАВ не отрывают и не растворяют, а смачивают стеариновую пленку на частичках алюминия, благодаря чему алюминиевый компонент равномерно распределяется в газобетонной смеси.

Рекомендовано подбор ПАВ, применяющихся для производства газобетонов, осуществлять по минимальной скорости смачивания алюминиевого порошка.

#### **Дозирование и смешивание бетонной смеси**

Подготовленные материалы подаются на весы, имеющие точность взвешивания  $\pm 2\%$ , в количестве, заданном в рецептуре. Смешивание производится в скоростных смесителях, обеспечивающих высокую гомогенизацию смеси. Обычный порядок загрузки материалов в смеситель следующий:

- песчаный и обратный шлам;
- вода;
- цемент;
- известково-кремнеземистое вяжущее;
- гипс (при наличии) или добавка (молотый газобетон);
- алюминиевая суспензия.

Перемешивание обычно происходит в 2 стадии: загрузка и гомогенизация всех компонентов смеси, затем, после подачи в смесь алюминиевой суспензии, минута отводится для перемешивания и гомогенизации смеси с алюминием, что обеспечивает качественное распределение алюминиевого компонента до начала реакции газовыделения.

Температура смеси на выгрузке, зависит от температуры исходных материалов, качества извести (низко- или высокотемпературная) и варьируется в пределах 37 – 45 °С. Температура заливки может регулироваться количеством горячей или холодной воды. При этом, низкие температуры заливки (38 –41 °С) предпочтительны при ударной технологии, высокие температуры (42 – 45 °С) – при литьевой и вибролитьевой технологиях. После каждого замеса смеситель промывается.

### **Вспучивание и выдержка смеси**

Пустая, предварительно собранная, смазанная вручную или механизированным способом (рис. 5.4) форма подается транспортировочным устройством под смеситель.



Рис. 5.4 – Установка для смазки форм

Приготовленная газобетонная смесь из смесителя подается в форму за счет давления воздуха при помощи специального распределительного устройства (рис. 5.5).



Рис. 5.5 – Распределительное устройство для заливки смеси в форму

Далее форма со смесью в зависимости от технологии: вибрационная, ударная или литевая, может подвергаться вибрационным воздействиям с помощью рамы с глубинными вибраторами (рис. 5.6), подается на ударный стол (рис. 5.7), или сразу перемещается – в камеры предварительной выдержки (зона ферментации) (рис. 5.8).



Рис. 5.6 – Виброрешетка для заливочной смеси



Рис. 5.7 – Ударный стол



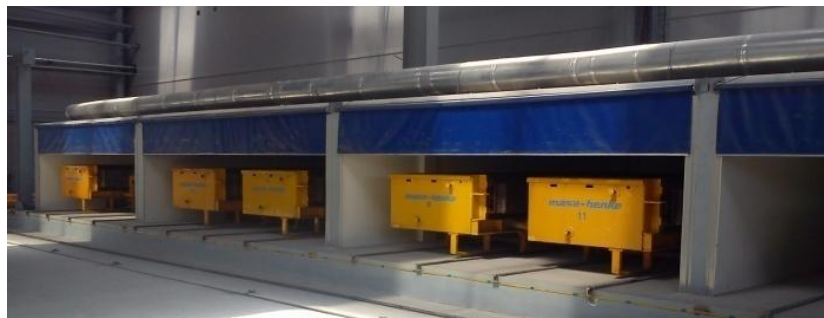


Рис. 5.8 – Камеры предварительной выдержки массивов

Транспортировка форм в зону выдержки осуществляется трансбордером (электропередаточным мостом) (рис. 5.9).



Рис. 5.9 – Трансбордер с формой

В зоне ферментации смесь вспучивается, загустевает и набирает пластическую прочность, необходимую для резки. При этом время предварительной выдержки для ударной технологии составляет обычно 120 – 150 минут и 180 – 240 минут при изготовлении газобетона по литьевой технологии.

#### **Резка массива на изделия**

Форма с вызревшим массивом (при заданной пластической прочности), отправляется на пост распалубки, где газосиликатный массив специальным кантующим устройством освобождается от формы и устанавливается на линию резки (рис. 5.10).



Рис. 5.10 – Кран-кантователь для распалубки и установки массивов на линию резки

После распалубки и установки массива на режательную тележку, массив с заданной скоростью проходит через станцию профилирования боковой поверхности, в том числе с возможностью вырезания на нейпазов и гребней (рис. 5.11), установки горизонтальной (рис. 5.12) и вертикальной резки массивов (рис. 5.13). Наиболее качественной является резка массива в вертикальном положении.



Рис. 5.11 – Установка боковой обрезки и профилировки массива

На станции боковой обрезки, состоящей из двух пар струн, осуществляется снятие «горбушки». Первая пара служит для предварительного срезания боковой поверхности массива. Вторая пара для

дополнительной резки, это означает, что снимается еще один тонкий слой и тем самым выравнивается поверхность.

Натяжение струны выполняется посредством пневматических цилиндров, специальной конструкции, компенсирующей различные длины струны.

**Станция боковой профилировки** состоит из поворотных стоек, но вместо струн на них прикреплены алюминиевые шины, на которых прикреплены стальные ножи (см. рис. 5.11). В соответствии с размерами блоков, при движении массива по линии резки ножи нарезают один или два паза и гребня на каждом блоке. Для каждой ширины блока требуется соответствующий комплект ножей. Благодаря поворотным стойкам можно быстро заменить ножи или перестроить на другой размер блока. Первая пара стоек образует предварительное профилирование. Здесь из гладких поверхностей массива вырезается паз или промежуточное пространство между гребнями. Для получения оптимальной поверхности, выполняется дополнительное профилирование с дополнительным формированием профиля в 1 – 3 мм.

Далее массив проходит под машиной горизонтальной резки. В одних технологиях струны горизонтальной резки неподвижны (рис. 5.12), в других конструкция их такова, что они совершают колебательные движения, при этом напряжения, возникающие в массивах, снимаются и резку массивов можно производить при более высоких пластических прочностях, что соответственно снижает количество получаемого при резке брака.



Рис. 5.12 — Машина горизонтальной резки массивов

**Поперечная пила** представляет собой распиловочную раму, которая в исходном положении находится над массивом (рис. 5.13). Резательная тележка с запорочным днищем и массивом центрируется в машине поперечной резки. Рама опускается с заданной скоростью, разрезая массив. Во время опускания рамы посредством вибрирующих струн формируются вертикальные разрезы, расстояния между которыми образуют высоту изделия. По окончании резки вакуумный колпак установки захватывает отрезанный продольной пилой верхний слой бетона массива и сбрасывает его в линию резки.

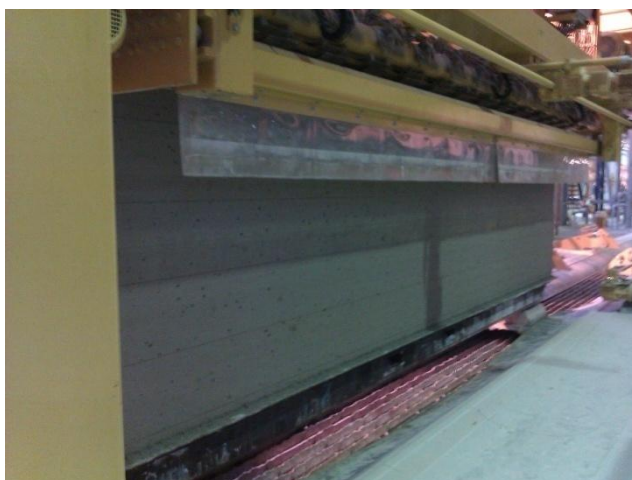


Рис. 5.13 – Установка вертикальной резки массивов

На этой же раме обычно устанавливаются фрезы для выборки в блоках захватов для рук.

### **Автоклавирование**

После вертикальной резки, массив манипулятором перемещается на автоклавные тележки, которые по мере комплектации, перемещаются на предавтоклавные пути, где происходит формирование автоклавного поезда.

В технологии фирмы HESS массивы в горизонтальном положении перед автоклавной обработкой проходят разделение горизонтальных слоев и затем устанавливаются на специальные автоклавные тележки (рис. 5.14).



Рис. 5.14 – Комплектование автоклавных тележек «горизонтальными» массивами

В зависимости от технологической линии и способа резки, массивы запариваются в горизонтальном, или вертикальном положении по 3 – 6 штук на тележке (рис. 5.14, 5.15).

Разрезанные массивы подаются в автоклавы на тепловую обработку, где последовательно проходят стадии вакуумирования, подъема температуры, изотермической выдержки и охлаждения. Автоклавы могут работать как непрерывно, так и циклично. Наиболее эффективна тепловая обработка, обеспечивающая непрерывный режим работы котла (парогенератора).





Рис. 5.15 – Вертикальная комплектация автоклавных тележек

В зависимости от компоновки оборудования и производительности линии, устанавливают тупиковые или проходные автоклавы различного диаметра (рис. 5.16).

В настоящее время, связи с отсутствием лабораторного автоклавного оборудования в исследовательских организациях и вузах, проведение научных исследований, касающихся автоклавной обработки газосиликатов затруднено. Поэтому научных статей с результатами таких экспериментов публикуется крайне мало [235 – 240].

Проведенные в рамках диссертационного исследования производственные эксперименты [241 – 243] несколько восполняют этот пробел.



Рис. 5.16— Автоклавы

Один цикл тепловой обработки изделий в автоклавах, включая загрузку и разгрузку, составляет 11,5 – 13 часов.

После закрытия крышек в автоклавах создается небольшой вакуум для равномерного распределения влаги и температуры внутри запариваемого массива, при этом абсолютное давление составляет до – 0,6 бар, из автоклавов удаляется воздух. Продолжительность вакуумирования 40 – 60 мин, после чего в автоклавы начинает медленно подаваться насыщенный пар. В течение  $\approx$  двух часов происходит контролируемое увеличение давления до 12 бар и подъем температуры до 171 – 190 °С. Затем наступает период изотермической выдержки, когда давление и температура поддерживаются на одном уровне в течение 6 – 8 часов, в зависимости от принятого графика автоклавирования. Температура массива в период изотермической выдержки составляет  $T_{\max} = 171 - 190$  °С. Затем в течение 1,5 – 2-х часов происходит ступенчатое понижение давления до уровня атмосферного внешнего давления. Непрерывный отвод конденсата из автоклавов осуществляется при помощи устройства для отвода конденсата.

### **Деление массивов**

После автоклавирования, манипулятор (рис. 5.17) или трансбордер переносит массивы на участок, где они проходят разделение на специальном устройстве — делителе (рис. 5.18).



Рис. 5.17 – Кран-манипулятор для перестановки массивов на линию деления

Делитель состоит из двух разделительных рам, на которых закреплены зажимные цилиндры с губками. Рама делителя опускается поочередно к каждому шву между блоками. Неподвижные зажимные губки с одной стороны массива выдвигаются до конечного положения и плотно прилегают к массиву. После этого выходят зажимные цилиндры на другой стороне делителя. Во время зажима поднимается необходимое давление, при этом давление на стороне гребня или регулируемой стороне настраивается несколько ниже. Затем верхняя рама (до 5 – 10 мм) поднимается вместе с массивом ячеистого бетона над стыком. После разделения слоя, массив опускается, зажимные цилиндры задвигаются в исходное положение и рама передвигается к следующему шву массива. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут разделены все швы.

В некоторых технологиях, например Wehrhahn, рама делителя остается на одном уровне, а массив перед делением поднимается вверх и опускается по мере разделения швов.



Рис. 5.18 – Делитель

Далее массив перемещается к крану перестановки (сортировки) готовой продукции (рис. 5.19), который посредством специального захвата



может целиком или частично снимать ряды готовых блоков с днища. Если массив из одной формы разрезается на блоки различной номенклатуры, устройство служит для сортировки и компоновки блоков для дальнейшей их упаковки.



Рис. 5.19 – Кран перестановки массивов на линию упаковки

Сформированные по размерам пакеты блоков устанавливаются на транспортные деревянные поддоны, после чего отправляются по конвейеру для дальнейшей обвязки лентой и упаковки в термоусадочную пленку (рис. 5.20).



Рис. 5.20 – Линия упаковки готовой продукции

Далее упакованная продукция подается на склад.

Для обеспечения правильного хранения продукции на предприятиях должны быть организованы закрытые и открытые склады.

Закрытые склады проектируют обычно для возможности выдерживания продукции до ее полного остывания и приобретения равновесной влажности. Это особенно важно в зимний период, когда перепады температуры между внутренней частью массива и наружной температурой воздуха могут достигать более 50 °С. На закрытых складах возможна сортировка продукции, и ее погрузка в транспортные средства.

Открытые склады, по опыту производства, необходимо проектировать исходя из вместимости не менее объема выпуска продукции четырех месяцев. Это актуально в связи с сезонностью спроса на продукцию и необходимостью длительного хранения продукции, выпускаемой в зимние месяцы. Кроме того, на складах, в зависимости от производительности предприятия, может быть организовано несколько площадок отгрузки изделий для ускорения обслуживания потребителей. Имеются примеры организации погрузочных работ даже в ночные часы.

Новые технологические линии позволяют вывести производство на новый уровень по производительности труда и качеству выпускаемой продукции. Так, при общей численности предприятия 150 – 170 чел, объем производимой продукции может быть 1300 – 1400 м<sup>3</sup> в сутки. В год – это составляет более 470000 м<sup>3</sup>. Количество бракованной продукции при этом не превышает 1%. Такой показатель качества недостижим даже для некоторых европейских предприятий.

Кроме того, в подавляющем большинстве предприятий по производству газобетона бракованная продукция полностью перерабатывается, в основном посредством ее тонкого измельчения и последующего использования в виде сухих ингредиентов в составе заливочных смесей.

Насколько быстро предприятия достигают таких результатов, зависит только от правильной организации производства и квалификации

персонала. Нами разработана эффективная система организации и управления производством, позволяющая в кратчайшие сроки выводить предприятия на проектную мощность при достижении высоких показателей качества.

## **5.2 Основные дефекты, возникающие при производстве газосиликата**

На основании многолетнего опыта автора [52, 211] и других исследователей [244, 245] изготовления по различным автоклавным технологиям изделий из ячеистых бетонов, наиболее часто встречающиеся дефекты можно классифицировать следующим образом:

- трещины, возникающие в процессе реакции вспучивания внутри массива (трещины роста);
- большие пустоты и линзы в структуре бетона;
- трещины, возникающие из-за включений смазки;
- трещины от усадки бетона;
- трещины, возникающие из-за армирования;
- трещины, образующиеся во время транспортировки «зеленого» массива;
- трещины, возникающие при резке массива;
- дефекты, возникающие при автоклавировании;
- дефекты, возникающие при делении массивов;
- дефекты, возникающие при упаковке и складировании;
- дефекты, возникающие при транспортировке.

Установлению причин появления и способам их устранения посвящен настоящий раздел.

Большая часть дефектов, наблюдаемых после окончания процесса изготовления изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения, получается еще в сыром состоянии.

Особенно часто образуются дефекты в виде трещин, являющихся следствием различных причин. В большинстве случаев они возникают в процессе «созревания» газобетона, но могут появиться и после зоны его ферментации: в процессе транспортировки и в результате обработки на других технологических переделах. Некоторые трещины имеют схожие признаки, поэтому выявление причин их возникновения затруднено.

### **5.2.1 Дефекты, возникающие в результате применения некачественных сырьевых материалах**

Для выпуска качественных изделий в производстве очень важно строгое соблюдение технологической дисциплины. В процессе производства неминуемо возникают дефекты изделий, имеющие различную природу и причины. Некоторые дефекты похожи между собой, поэтому выявление причин их возникновения затруднено.

#### **Слипание изделий между собой в горизонтальном и вертикальном направлениях.**

Большой удельный вес в общем количестве дефектов имеют слипания ячеистых блоков автоклавного твердения в горизонтальной плоскости (между собой и с металлическими поддонами). Авторами проведены исследования по определению причин возникновения этих дефектов.

Предварительный мониторинг позволил установить, что при прочих равных условиях, дефекты возникают при производстве бетонов на определенном виде известях, поэтому исследования проведены для двух одинаковых составах бетонов, изготовленных с применением двух различных видов извести: ООО «Фельс–известь» и известь Алексеевского производства, Ленинградской обл. Первая, при выполнении технологических режимов производства не дает заливаний, вторая – при полной аналогии в режимах технологических процессов практически не позволяет получать изделия ячеистых бетонов без дефектов нижнего ряда.

Для проведения экспериментов было отобрано три партии образцов:

- контрольная – из бездефектных бетонов;
- партия из массива бетона, имеющего слипания;
- непосредственно материал, прилипший к металлическому поддону.

Образцы были исследованы методом острогофокусированного ионного пучка на комплексе STRATA FIB 205, а так же проведен рентгенофазовый анализ всех отобранных партий образцов.

На рис. 5.21 представлены микрофотографии бездефектных (контрольных) образцов газобетона.

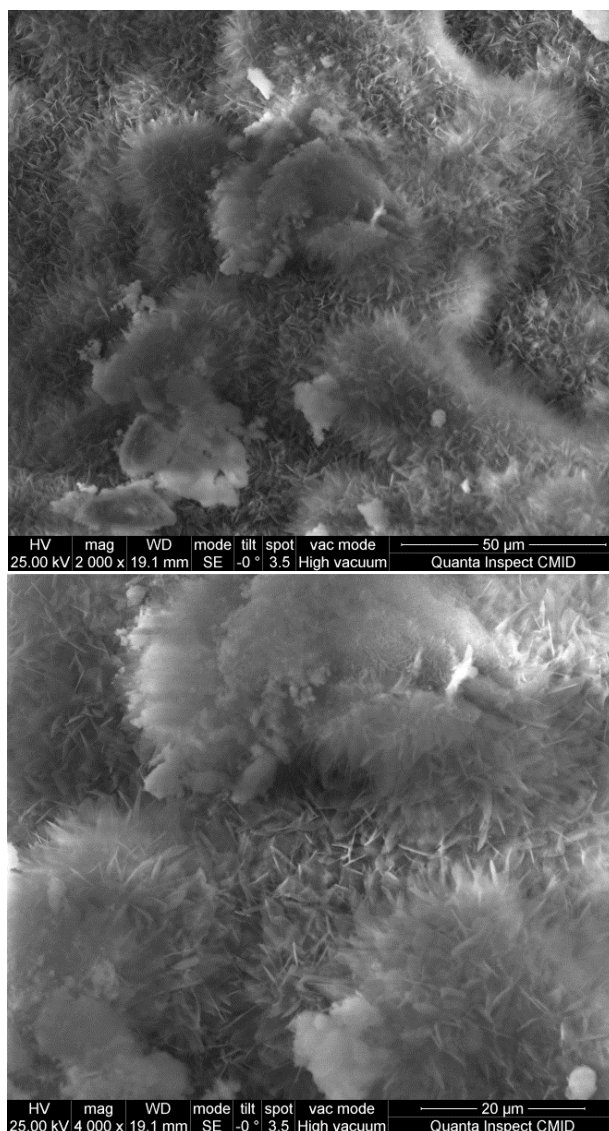


Рис. 5.21 – Микроструктура ячеистого автоклавного бетона с новообразованиями пластинчатой формы

Как видно из микрофотографий, морфология образовавшихся кристаллов, по размерам и форме соответствуют кристаллам тоберморита или риверсайдита. Кристаллы равномерно распределены по поверхности бетонного образца. Это свидетельствует о равномерной, хорошо сформированной структуре ячеистого бетона, не имеющего отдельных центров кристаллизации.

Второй и третий образцы значительно отличаются от контрольных. Их микрофотографии представлены на рис. 5.22 и 5.23.

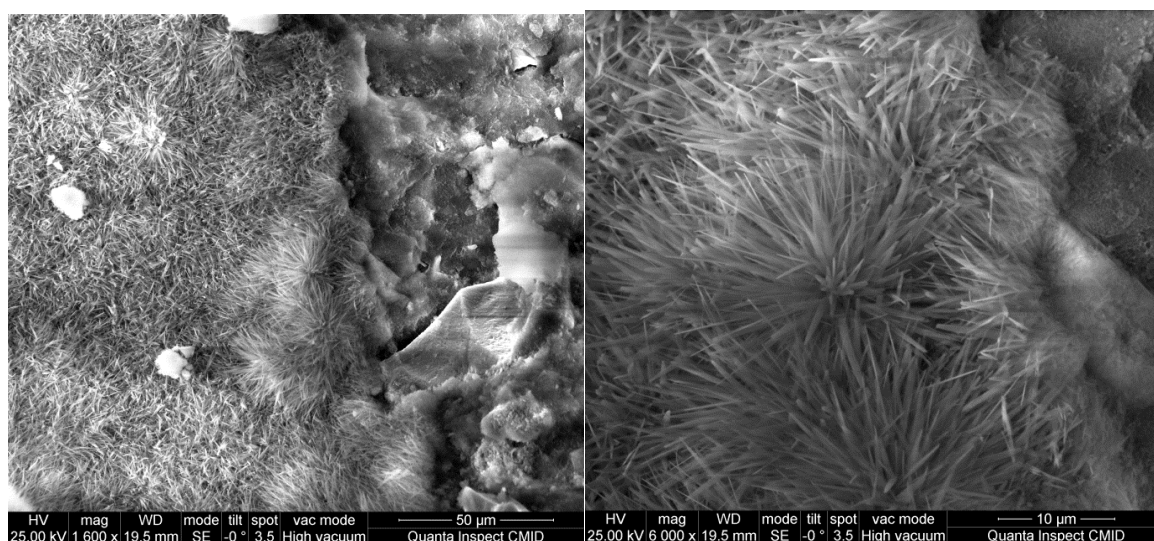


Рис. 5.22 – Микроструктура нижней части массива ячеистого автоклавного бетона с «залипаниями»

Аналогичные на вид новообразования получены на снимках третьей партии бетонов. Ниже представлены микрофотографии материала, прилипшего к днищам (рис. 5.23).

Представленные на рисунках кристаллы имеют игольчатую форму и образуют радиально-лучистые срастания. Длина игл кристаллов колеблется от 10 до 15  $\mu\text{m}$ .

При рассмотрении кристаллов, анализа их морфологии, формы и размеров, считаем, что наиболее близки к исследуемым, кристаллы ксонотлита [246] (рис. 5.24 и 5.25). Однако РФА показывает незначительное количество ксонотлита в бетоне – всего 2 – 3%.



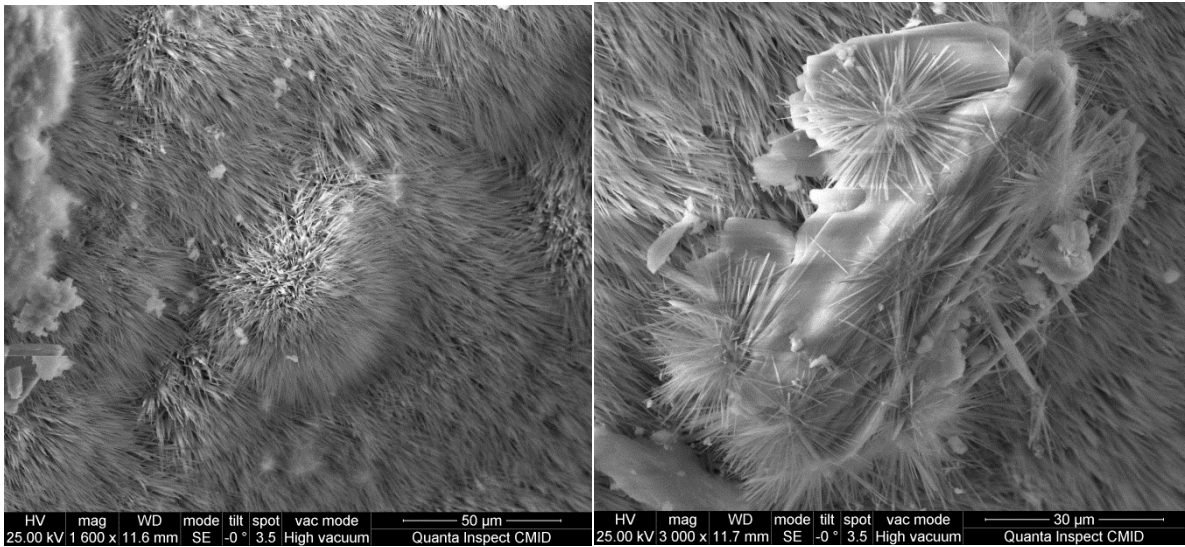


Рис. 5.23 – Микроструктура газобетона, прилипшего к металлической опалубке



Рис. 5.24 – Ксонотлит на кальците



Рис. 5.25 – Ксонотлит на инезите, ЮАР

Для определения причины повышенной адгезии ксонотлита к поверхностям металлической опалубки, был проведен поиск научных источников с исследованиями по данному вопросу. В диссертации Акатьевой Л.В. [238] имеются сведения о том, что ксонотлит и волластонит являются эффективными сорбентами целого ряда ионов металлов:  $Zr^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Sc^{3+}$ ,  $La^{3+}$ ,  $Pb^{2+}$ , Sn, Си, Cd, Zn, Ni, Co, Ba из их водных растворов. Возможно, именно это свойство лежит в основе

способности адгезии к металлическим поверхностям опалубки газобетона, на котором образовался ксонотлит.

Был проведен анализ причины возникновения и интенсивности «залипаний». Оказалось, что эти дефекты появляются при использовании в производстве одного и того же вида извести. Считаем, что необходимо проведение полномасштабных исследований (химических и технологических) извести данного месторождения с целью определения причин образования повышенного количества ксонотлита в автоклаве.

Таким образом, установлено, что после автоклавной обработки изделий на некоторых видах извести наряду с кристаллами тоберморитовой группы, образуется большое количество кристаллов игольчатой формы, образующих радиально-лучистые срастания (предположительно ксонотлит, имеющий формулу  $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ ).

Интенсивность залипаний бетона тем больше, чем больше кристаллов игольчатой морфологии образовалось после гидротермального синтеза газосиликатов.

Для предотвращения появления дефектов газобетона, связанных с повышенной адгезией к различным поверхностям, предлагается перед началом производства ячеистых бетонов, проводить исследования извести для определения вида и количества минералов, образующихся после автоклавной обработки изделий по режимам предприятия. Наиболее эффективен при этом метод острогофокусированного ионного пучка.

Считаем, что необходимо проведение более глубоких научных исследований в направлении проблемы, освещенной в данной главе. До установления причин возникновения дефектов ячеистых бетонов автоклавного твердения, предприятиям необходимо отказаться от применения такой извести в производстве.



### **Влияние гипса на качество газосиликатных изделий.**

Во многих технологиях производства газосиликата, (чаще при литье), один из компонентов смеси представлен гипсом. Применение гипса в газосиликатах известно достаточно давно – еще с начала прошлого века. Как говорилось ранее, имеется много публикаций о роли гипса в газосиликате [247 – 251], но сих пор нет единства мнений в этом вопросе.

Известно, что если в качестве порообразователя в газобетонных смесях используется алюминиевая пудра или паста, в них образуется комплексное химическое соединение – этtringит [252]. Этот минерал, который именуется также трехсульфатной формой гидросульфатоалюмината кальция, имеет сложный состав:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ .

Влияние этtringита на свойства строительных материалов и изделий неоднозначно и зависит как от состава последних, так и внешних условий. Так, если этtringит кристаллизуется в среде, насыщенной гидроксидом кальция, то он вызывает расширение материала, вплоть до его растрескивания. Если же концентрация гидроксида кальция в поровой жидкости строительного изделия ниже 0,5 г/л, то этtringит кристаллизуется без существенного расширения, армируя и упрочняя структуру его вяжущей части.

Этtringит неустойчив при повышенных температурах и при температуре более 80 – 90 °С превращается в моносulfатную форму  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

Имеется обширная литература о роли этtringита при твердении расширяющихся цементов и при сульфатной коррозии бетонов, в том числе [251 – 254]. Влияние же этого соединения на процессы производства силикатных изделий, в том числе газобетонных изделий автоклавного твердения, исследовано недостаточно. Данный раздел посвящен этому вопросу.

Рассмотрим механизм сульфатного расширения, обусловленного кристаллизацией этtringита. Известно [255], что величина

кристаллизационного давления  $\Delta P$ , создаваемого растущими кристаллами, в том числе частицами этtringита в порах строительного изделия, равна [256, 257]:

$$\Delta P = \frac{R \cdot T \cdot \ln \beta}{V}, \quad (5.1)$$

где  $R$  – газовая постоянная, равная 8,

$T$  – абсолютная температура среды, °К

$V$  – объем, занимаемый кристаллизующейся фазой, м<sup>3</sup>

$\beta$  – степень пересыщения среды.

При высокой концентрации гидроксида кальция в поровой жидкости растворимость гидроалюминатов кальция, особенно ионов алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , очень мала. Эти ионы локализуются в ограниченном объеме у поверхности гидроалюмината. При низкой концентрации гидроксида кальция, из-за большой конгруэнтной растворимости гидроалюмината, длина пробега ионов  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , в поровой жидкости резко возрастает и объем  $V$ , в котором выпадают частицы этtringита, увеличивается. Это ведет к снижению давления кристаллизации.

С точки зрения изложенных теоретических представлений рассмотрим некоторые переделы в технологии производства газобетонных изделий.

После поризации газобетонной смеси в которую добавлен гипс и температура изделий не превышает 80 – 90 °С образуется этtringит. При этом этtringит кристаллизуется в среде, пересыщенной свежесформованным гидроксидом кальция, когда объем  $V$  в уравнении (5.1) минимален, что создает условия для максимального давления кристаллизации. При этом, если содержание гипса превышает некое допустимое значение и наблюдается медленный подъем температуры в массиве, процессы образования этtringита в нем происходят достаточно интенсивно и долго, что может привести к увеличению объема изделий.

Такое явление наблюдалось автором на одном из предприятий по производству газобетонных изделий. При изготовлении газобетона использовалась низкотемпературная малоактивная известь (при ее испытании по методикам немецких стандартов DIN, температура гашения  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  достигалась за время более 20 мин.). Кроме того, изготовленные и порезанные массивы длительное время выдерживались в цехе перед автоклавом при температуре окружающей среды не выше  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За это время, массивы, едва набравшие температуру  $70 - 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  начали остывать. Падение температуры в массивах произошло до  $40 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Размеры по торцевой части массива при резке были  $1500\text{ мм} \times 625\text{ мм}$ . После снижения температуры массив из-за кристаллизации этtringита увеличился на  $3 - 5\text{ см}$  во всех направлениях (рис. 5.26). Избежать этих изменений помогли мероприятия по стабилизации температурных режимов и уменьшение количества вводимого в состав заливочной смеси гипса [209, 258].

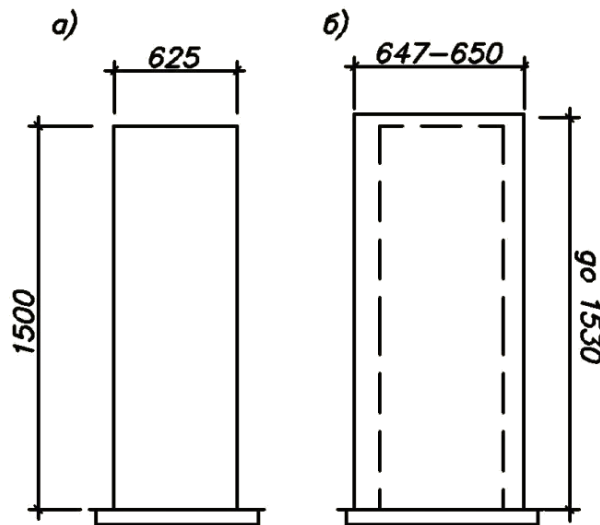


Рис. 5.26 – Изменение геометрических параметров массивов при образовании этtringита:

- а) массив нормальных размеров; б) массив, с изменением геометрических параметров в результате образования этtringита

Как минимизировать возможность возникновения внутренней коррозии автоклавного газобетона на начальной стадии его изготовления, т.е. до автоклавирования?

Для образования этtringита необходим источник активного глинозема либо гидроксида алюминия. Это, во-первых, алюминиевые порошок или паста, из одного грамма которых образуется 46,5 г. этtringита. Вторым источником алюминатов является портландцемент, который добавляется в бетон, и расход его порой превосходит расход известкового вяжущего. Если в портландцементе содержится до 10% трехкальциевого алюмината, а дозировка первого 10%, то образуется еще 4,7 г. этtringита, что на порядок меньше, чем в предыдущем случае.

Согласно требованиям фирмы-поставщика технологического оборудования Masa-Henke, для производства газобетонных изделий, в песке содержание  $Al_2O_3$  допускается в количестве 5 – 7%, а иногда и до 18% этого оксида. Из 1 г. глинозема образуется 12 г. этtringита. Однако глинозем в песке, в большинстве случаев, входит в состав либо полевых шпатов, либо глинистых минералов, которые реагируют с гидроксидом кальция лишь в автоклаве. В связи с этим обычно лишь небольшая часть оксида алюминия, входящая в состав кварцевого песка, как сырьевого компонента газобетонных материалов, может стать источником образования первичного этtringита. Тем не менее, предельное содержание  $Al_2O_3$  рекомендуем ограничить 7%, т.к. нередко в природе встречаются аморфные, активные по отношению к гидроксиду кальция водные алюмосиликаты, которые могут принимать участие в образовании этtringита.

В процессе автоклавной обработки весь этtringит и моносulfоалюминат, образовавшиеся на стадии приготовления сырца, разлагаются. После выгрузки изделий из автоклава и остывания массивов до 50 °С, в них возможно образование так называемого вторичного этtringита из продуктов разложения первичного.

Важнейшим фактором, влияющим на давление, создаваемое при кристаллизации этtringита, является концентрация гидроксида кальция в окружающей среде. Именно от нее зависит численное значение  $V$  в уравнении (5.1).

Основные гидросиликаты кальция – связующие газобетонных изделий – это тоберморит  $11 \text{ \AA}$  и ксонотлит. Их равновесная растворимость по гидроксиду кальция находится в пределах  $0,1 - 0,3 \text{ г/л}$  [131]. При такой концентрации  $\text{Ca(OH)}_2$  этtringит кристаллизуется рассредоточено, так как объем его образования  $V$  в уравнении (5.1) достаточно велик. При этом в структуре камня не возникают деструктивные внутренние напряжения. Необходимо отметить также, что этtringит, содержащий 32 молекулы воды, неустойчив при температуре выше  $80 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$ , так что при остывании изделий он не сразу может кристаллизоваться.

Изложенные соображения приводят к выводу, что кристаллизация вторичного этtringита вряд ли может привести к снижению качества газобетонных изделий, если он образуется в умеренных количествах. Это относится, прежде всего, к литьевой технологии производства газобетонных изделий, когда для улучшения структурно-механических свойств бетонной смеси в нее на стадии приготовления вводится гипс в количестве до 15%.

Необходимо отметить, что гипс, независимо от того вошел он в состав гидросульфоалюмината, или нет, в автоклаве превращается в ангидрит  $\text{CaSO}_4$ . При температуре  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  он гидратирует и переходит в полуводный сульфат кальция, а при  $120 - 130 \text{ }^\circ\text{C}$  – в гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Эти процессы сопровождаются локальным увеличением объема твердой фазы.

Не исключено, что именно эти факторы вызывают иногда деструктивные процессы, которые приписывают вторичному этtringиту.

В ходе производственных испытаний были проведены эксперименты, подтвердившие образование ангидрита при автоклавировании газобетонных изделий марки по средней плотности D 500.

В качестве контрольного был выбран состав газосиликата с добавлением 2,5% молотого двухводного гипса. Для сравнения с ним были изготовлены массивы с 12 % содержанием гипса.

Рентгенограммы полученных газосиликатных материалов приведены на рис. 5.27.

Из рентгенограмм видно, что при добавлении гипса в газосиликате образуется ангидрит (пик 3,5 Å) интенсивность пика которого тем больше, чем выше содержание гипса в газосиликатной смеси. Численные значения интенсивности пика при 12 % гипса составляет 10000 имп/сек, а при 2,5 % гипса – 5000 имп/сек. При этом с увеличением содержания гипса, снижается интенсивность пиков тоберморита (пик 11,3 Å) с 3750 до 2250 имп/сек, тоберморита с ксонотлитом (пик 3,08 Å) с 5750 до 4250 имп/сек и ксонотлита (пик 2,8 Å) с 3700 до 3000 имп/сек.

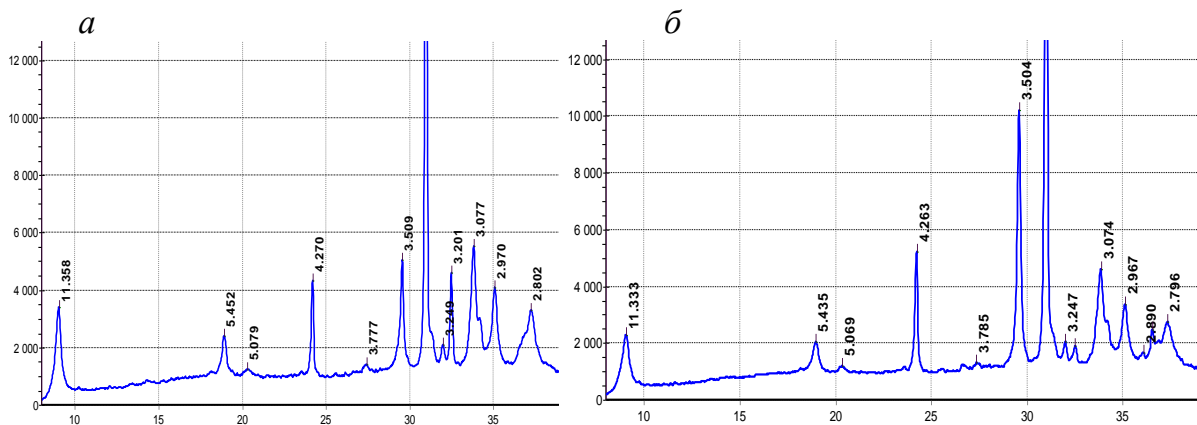


Рис. 5.27 – Рентгенограммы газосиликатных изделий:

а – с 2,5% гипса; б – 12% гипса

Таким образом, повышение содержания гипса в составе газосиликатной смеси ведет не только к увеличению получаемого в изделиях ангидрита, но подавляет кристаллизационную активность смеси по образованию основных, влияющих на прочность и долговечность минералов: тоберморита и ксонотлита, при этом, ксонотлит меньше подвержен влиянию гипса, чем тоберморит.

Для определения допустимого (безопасного) количества гипса в сырьевой смеси при ударной технологии производства газосиликатов были проведены производственные испытания.

В состав газобетонных смесей были добавлены различные количества двуводного молотого гипса: 1 %, 2 % и 2,5 %. Активность смесей по СаО в извести – 10 %, активность извести – 88 %. Время созревания массивов в зоне ферментации – 180 мин. Проведен рентгенофазовый анализ, результаты которого приведены на рис 5.28 и физико-механические испытания готовой продукции, приведенные в табл. 5.1.

Рентгенофазовый анализ показывает, что изменения кристаллической структуры газосиликатов при всех дозировках гипса незначительны. Так, интенсивность пика тоберморита  $11,3 \text{ \AA}$  находится на одной отметке – 3500 имп/сек. Пик  $3,074 \text{ \AA}$ , совместный для тоберморита и ксонотлита также неизменен и составляет 5500 имп/сек. Пик ксонотлита ( $2,796 \text{ \AA}$ ) – 3000 имп/сек.

Анализируя интенсивность пиков ангидрита, выявлено следующее. Уменьшение количества гипса в заливочной смеси от 2,5 до 2 % практически не повлияло на интенсивность пика ангидрита, значение которого – 6250 имп/сек. Снижение содержания гипса в заливочной смеси до 1 %, дало снижение интенсивности пика ангидрита до 4900 имп/сек.

Результаты РФА позволяют предположить, что содержание в составах заливочных смесей от 1 до 2,5% гипса незначительно влияет на прочностные характеристики газосиликатных изделий.

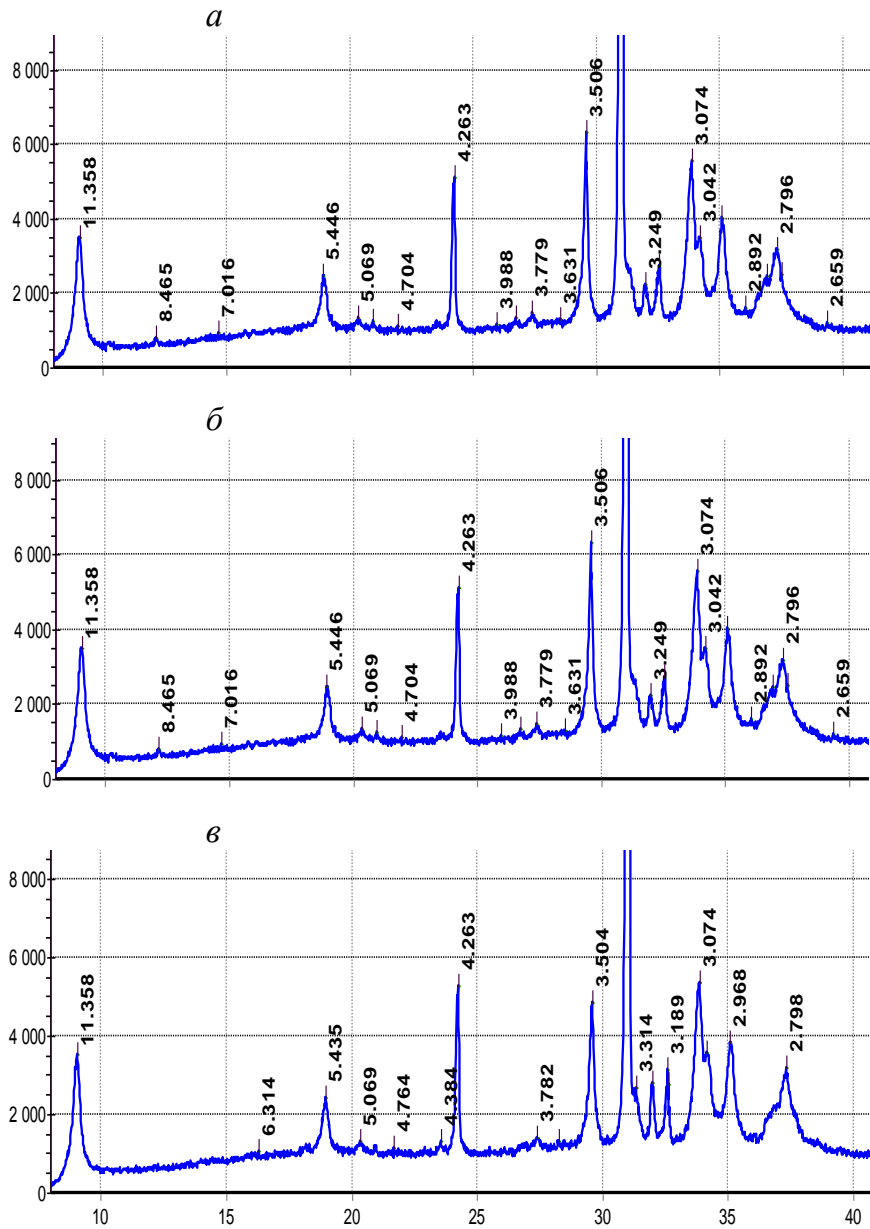


Рис. 5.28 – РФА газосиликатов с добавлением гипса: *a* – 2,5 %; *б* – 2 %; *в* – 1%

Табл. 5.3 – Результаты испытаний по прочности изделий с добавлением гипса

Масса твердых веществ, кг/м <sup>3</sup>	Масса основных составляющих газосиликатной смеси, кг/м <sup>3</sup>					В/Т	Расплав цилиндра, см	Температура заливки, °С	Прочность при сжатии, МПа
	известь	цемент	гипс	обратный шлам	аддитив				
495	56	84	12,4	90	45	0,438	17 – 17,8	36,2 – 36,5	3,6
	56	84	10	90	45				3,33
	56	84	5	90	45				3,05

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что добавление двухводного гипса в газосиликат в пределах от 1 до 2,5 %



улучшает прочностные характеристики готовых изделий. По-видимому, это связано с тем, что гипс, повышая концентрацию ионов кальция в жидкой фазе гидросиликатной связки, способствует образованию сетчатой структуры межпоровых перегородок, о чем было сказано в главе 4. Избыток гипса вызывает обратное действие, затрудняя синтез гидросиликатов кальция, благодаря снижению рН среды, уменьшению гидроксида кальция в растворе, а также коагулирующему действию в отношении ионов кремнекислоты в растворе. Данные о коагуляции кремнекислоты с образованием глобулярных частиц при автоклавной обработке смеси  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-SiO}_2$  приведены в работе В.В. Строковой [259, 260].

Изложенное приводит к следующим выводам:

1. Если для улучшения структурно-механических свойств сырцовый смеси в нее вводится гипс, то образование первичного этtringита в среде, пересыщенной гидроксидом кальция, может вызвать снижение качества изделий. Для предотвращения этого необходимо:

– максимально ограничить дозировку гипса, а так же содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в сырьевых материалах (песке, цементе и извести);

– сократить время созревания (в зоне ферментации) и предавтоклавной выдержки сырца, не допуская его охлаждения ниже  $70\text{ }^\circ\text{C}$  перед загрузкой в автоклав.

2. Вторичный этtringит кристаллизуется в условиях низкой концентрации гидроксида кальция в порах изделий, поэтому не может создавать больших внутренних напряжений в них.

3. Более вероятной причиной отрицательного влияния на качество газобетонных изделий является кристаллизация ангидрита.

4. Указанные явления в меньшей степени проявляются в ударной технологии производства газобетонных изделий, т.к. в ней исключается необходимость добавления гипса в сырьевую смесь.

5. Использование гипса, особенно полуводного сульфата кальция при ударном способе производства, может вызвать большие отрицательные последствия, чем при литьевом. Это связано с высокой прочностью и плотностью структуры материала.

Возможен и другой способ теоретического обоснования борьбы с этим явлением. Он основан на том, согласно формуле 5.1 кристаллизационное давление в процессе образования любого кристалла из раствора, в том числе, гипса, можно существенно уменьшить, снизив степень пересыщения растущих кристаллов по ионам, входящих в их состав. Так, например, очень высокой растворимостью в воде отличаются галогениды магния, в частности  $MgCl_2$ , а также сульфаты, например,  $MgSO_4$ . В связи с этим, ввод в сырьевую смесь, содержащую гипс, растворимых солей магния должен уменьшить кристаллизационное давление, вызванное запоздалой гидратацией оксида магния в уже схватившейся газобетонной сырьевой смеси, либо уменьшить кристаллизационное давление, обусловленное образованием гипса из растворимого ангидрита.

Из этой концепции следует вывод, что если ввести повышенное количество гипса в магнезиальную известь, будет происходить синергетическое взаимодействие этих компонентов, которое уменьшит отрицательное действие как примеси оксида магния, так и лишнего гипса в сырьевой смеси.

Дальнейшие экспериментальные исследования этого явления позволят частично снять ограничения по применению магнийсодержащих известей при производстве газобетоносилкатов и значительно расширить сырьевую базу силикатной промышленности.

**Выпуск бракованных ("недоросших", "просевших" или "упавших") массивов.**

Иногда, при отлаженном процессе производства, работая по оптимизированной рецептуре, может произойти процесс нестандартного

газовыделения, приводящий, в конечном итоге, к браку массива, или выпуску несоответствующей продукции (рис. 5.27) [115, 261 – 263].

Такие же дефекты по внешним признакам происходят при смене сырья или изменении его качества.

Основными причинами появления указанного брака при отлаженном производстве могут являться:

- резкое изменение параметров газообразователя: значительное повышение или понижение активности пасты (пудры);
- использование некачественного газообразователя;
- изменение концентрации алюминия в суспензии;
- агрегирование частиц газообразователя.

*а)*



*б)*



Рис. 5.27 – Брак массивов

*а)* – "упавший" массив; *б)* – бракованные газобетонные блоки

При инструментальном исследовании алюминиевой пигментной пудры иногда можно заметить наличие комков, состоящих из сваренных между собой алюминиевых частиц. В процессе приготовления алюминиевой суспензии подобные частицы не отделяются друг от друга, и вводимое поверхностно-активное вещество обволакивает не отдельные частицы, а укрупненный агломерат в целом. Полное превращение агломерата в гидроалюминат кальция происходит значительно медленнее аналогичной реакции с участием свободной частицы, часто вызывая

бурную конечную стадию газовыделения, сопровождающуюся значительной просадкой массива или полным его падением.

При смене или изменении качества сырья, следующие факторы могут привести к вышеуказанным дефектам:

- снижение активности и температуры гашения извести;
- снижение активности или увеличение сроков схватывания цементов;
- повышение удельной поверхности сырьевых компонентов;
- снижение активности, или ухудшение качества обратного шлама;
- нарушение температурных режимов изготовления бетонов.

Первым шагом для быстрого устранения указанных дефектов, обычно является анализ изменившихся к настоящему моменту технологических параметров и их нормализация.

Немного дольше, но также достаточно эффективно можно устранить, регулируя главные факторы, влияющие на устойчивость массива: производится проверка свойств извести, исследование параметров алюминиевой суспензии.

При получении брака от слишком тонкого помола сырья, необходимо произвести уменьшение удельной поверхности размолотых материалов до нормативных значений. Этот вопрос легче всего решается увеличением загрузки мельницы, т.е. увеличением ее производительности. При невозможности выполнения такой операции следует остановить мельницу и, после ее остывания до приемлемой температуры, выгрузить часть мелющих тел. После запуска мельницы следует уменьшить массу подаваемых в мельницу мелющих тел и выполнить проверку тонкости помола сырья.

Устранения вышеуказанных дефектов можно добиться повышением вязкости смеси посредством добавления в смесь гипса, снижения В/Т или увеличения количества обратного шлама.

Решение о выполнении каждого последующего шага принимается после всестороннего анализа предыдущих действий.

### 5.2.2 Возникновение дефектов в газобетоне до автоклавной обработки

Опыт авторов по производству изделий из газобетонов позволяет классифицировать дефекты роста и твердения массивов следующим образом:

- трещины, возникающие в процессе реакции вспучивания массива (трещины роста);
- бракованные («недоросшие» и «упавшие») массивы;
- большие пустоты и линзы в структуре бетона;
- трещины, обусловленные усадочными процессами в свежем массиве;
- повреждения поверхности бетона из-за арматуры;
- дефекты, возникающие при резке массивов.

Проведем анализ существа этих дефектов, причин их возникновения и способов устранения более подробно:

#### **Трещины, возникающие в процессе реакции вспучивания массива.**

Исследования показывают, что большое количество трещин и разрывов тела бетона возникает из-за несогласованности процесса вспучивания и твердения массивов (рис. 5.28), их возникновению способствуют следующие факторы:

- несоответствие скоростей роста объема массива и твердения (процесс схватывания бетона достигает стадии, при которой пластические деформации структуры уже чрезвычайно затруднены);
- чрезмерное давление водорода и водяного пара внутри массива при повышенной вязкости смеси.

Образованию разрывов и трещин способствует высокая скорость процесс роста объема при повышенной скорости набора прочности бетона.



Рис. 5.28 – Трещины, возникшие из-за несоответствия скоростей роста объема массива и его твердения

Процессу дефектообразования благоприятствует быстрое твердение массива из-за:

- высокой активности смеси по СаО (повышенное содержание в смеси извести, цемента и обратного шлама);
- использования слишком тонкодисперсной или чрезмерно активной алюминиевой пудры;
- использования слабообожжённой извести;
- высокой температуры заливки смеси;
- использования тонкомолотого сырья;
- чрезмерно низкого водотвердого отношения (В/Т) смеси;
- использования цемента с добавками.

Существует тесное взаимовлияние процессов вспучивания и твердения массивов, поэтому для устранения вышеуказанных дефектов очень важно провести оптимизацию скорости набора прочности, газообразования и газовыделения. При замедлении этих процессов явно уменьшается количество трещин в массиве.

Для снижения числа трещин, обусловленных быстрым ростом массива, рекомендуется:

- уменьшение количества основных вяжущих;

- использование сильнообожженной извести;
- снижение температуры заливки ( $< 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- увеличение в смеси количества гипса или ангидрита;
- проверка цемента и замена его на чистоклинкерный портландцемент;
- увеличение пластичности заливочной смеси (расплав цилиндра).

Для замедления процесса вспучивания массива рекомендуется:

- использование более крупнозернистой алюминиевой пудры ( $> 50\text{ }\mu\text{m}$ );
- то же, алюминиевой пудры с высокой насыпной плотностью;
- снижение количества газообразователя.

Для снижения внутреннего давления в газобетонной массе допускается использование механических вспомогательных средств, в частности, – протыкание, кратковременная вибрация массива или встряхивание его в процессе роста.

### **Раковины, линзы и крупные поры.**

Возникновение линз и пустот может быть обусловлено разницей температур между внутренней частью массива и стенками форм. Образование этих повреждений (рис. 5.29) объясняется следующим образом.



Рис. 5.29 – Крупные пустоты и линзы в ячеистом бетоне

После заливки в форму газообразование в бетонной смеси происходит одновременно по всему объёму. На поверхности массива всегда имеется тонкая водяная пленка. Из-за трения бетона о стенки формы, особенно, если форма не качественно почищена и смазана, происходит замедление скорости подъема бетона у стенок, а вспучивающаяся масса центральной части массива ее перерастает. Так появляются «завалы» бетона от центра к краю массива. Вода стекает вниз по образовавшемуся уклону, а после ее испарения в массиве остаются линзы.

Во многих протестированных массивах, выпускаемых литьевым способом, основной причиной образования указанных дефектов была высокая температура заливки и повышенная вязкость смеси.

При ударном способе производства, включения крупных пор в структуре бетона встречаются гораздо чаще, и причиной этого является недостаток воды затворения, т.е. низкое (В/Т) заливки.

Увеличенные поры могут быть вызваны также повышенной вязкостью ячеистобетонной смеси, не подходящим гранулометрическим составом газообразователя и высокими температурами внутри газобетонной смеси во время ферментации.

Мероприятия, рекомендуемые для минимизации образования линз и крупных пор:

- корректировка состава бетонной смеси по активности и начальной вязкости;
- снижение температуры заливки до + 38 °С;
- использование качественного газообразователя;
- снижение температуры форм и днищ;
- качественная очистка днищ;
- применение качественной смазки форм;
- увеличение В/Т до оптимального значения.



### Дефекты от масляных включений.

Такие дефекты могут появляться из-за толстого слоя смазки в форме (рис. 5.30 *а*) или при не отлаженном сливе массы пористой смеси в форму (слишком сильный напор бетонной смеси при ее сливе в форму – отсутствие или неисправность сдерживающей пластины в заливочном рукаве). Заливочная масса может смыть масляную плёнку с поверхности формы, в результате чего смазка собирается на поверхности массива (рис. 5.30 *б*).

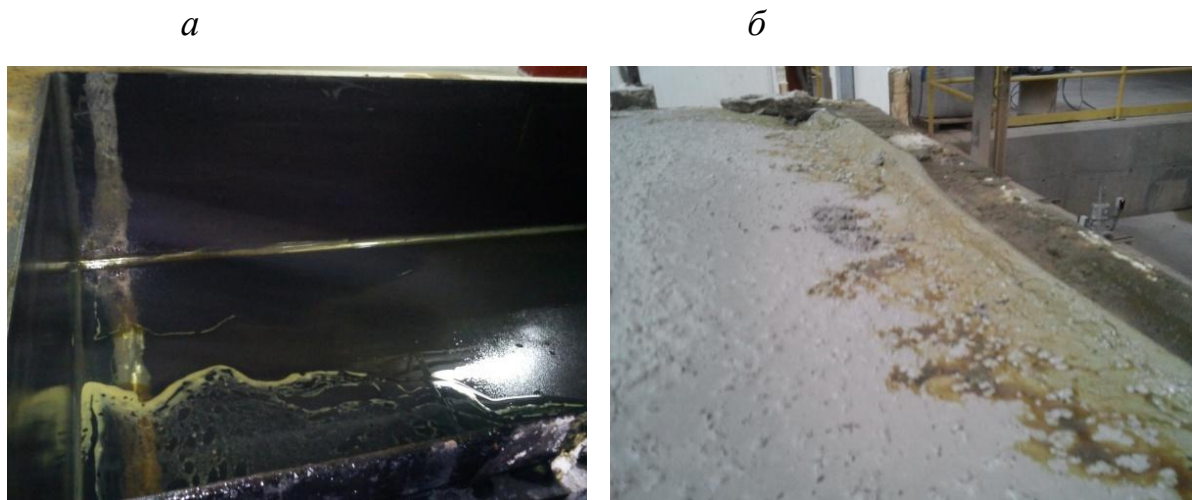


Рис. 5.30 – Смазочное масло на металлоформе и газобетоне

При вспучивании бетонной смеси массива кривизна его горизонтальной поверхности способствует тому, что смазка, собираясь в углах и у краев форм, затем внедряется в тело бетона, повреждая его структуру.

Основные причины этих дефектов:

- использование некачественной смазки;
- нанесение избыточного количества смазки на форму;
- слишком большая скорость выливания смеси из бетоносмесителя;
- слишком высокая температура заливки.

Для предотвращения этих дефектов рекомендуется:

- проверить и настроить смазочную машину;

- проверить и улучшить качество смазки;
- снизить скорость слива ячеистой смеси из бетоносмесителя в форму;
- уменьшить температуру заливки.

Иногда после резки массива на блоки могут проявляться дефекты, связанные с глубоким проникновением смазки в слои, соприкасающиеся с формой (рис. 5.31).

Не стоит недооценивать значимость этого дефекта, так как он заключается не только в изменении цвета поверхности. При детальном рассмотрении поврежденных блоков выявлено, что слой бетона, пропитанный маслом, не прочен и рассыпается, отделяясь от массива даже от прикосновения. Такие изделия на строительной площадке чаще повреждаются. Так как описываемый дефект располагается на торце блока, вертикальные швы стеновой кладки с применением таких блоков будут требовать повышенного расхода растворной смеси.



Рис. 5.31 – Масляные пятна на готовой продукции

Причин образования подобных масляных пятен может быть несколько:

1. Не качественная (с переливом) смазка форм;
2. Установка массива на режущей каретке таким образом, что струна боковой профилировки не срезает слой бетона должной толщины. Это может происходить, в свою очередь по нескольким причинам:

- разбалансирована (не горизонтальна) режущая каретка;
- использовано поврежденное днище;
- на резку отправляются недозревшие массивы, которые деформируются при кантовании формы и установке массива с днищем на каретку;
- разболтаны прижимные рычаги формы, которые при кантовании изделия позволяют днищу сильно отклоняться от горизонтали, при этом массив, как и в предыдущем случае, деформируется и устанавливается на каретку уже с отклонением от вертикали, т.е. не параллельно струнам боковой профилировки.

Рекомендуемые способы устранения:

1. Регулировка машины смазки форм;
2. Регулировка положения массива на каретке так, чтобы толщина срезки обеспечивала удаление масла.
3. Настройка работы машины вертикальной профилировки массивов.

При этом начать необходимо с проверки вертикальности установки массивов на днищах и струн на машине боковой профилировки. Затем, осуществляется проверка горизонтальности отметок опорных точек днищ на резательной каретке. Исключив все эти факторы, в случае, если дефект продолжает появляться, можно приступить к более сложным манипуляциям.

Необходимо повести наблюдения и замеры величины срезаемого слоя и, если это позволяет настройка технологического оборудования на других переделах, таких как машина вертикальной резки, делитель, кран на линии упаковки и др., можно очень осторожно, не более чем на один миллиметр в сутки, менять расположение струн машины боковой профилировки относительно массива. Как правило, такую регулировку делать более чем на два миллиметра не приходится.

Если даже после указанных манипуляций, дефекты все же появляются, следует тщательно проверить и отремонтировать днища, на которых это происходит.

**Трещины, обусловленные усадочными процессами в свежем массиве.**

Обычно усадочные трещины видны после затвердевания и резки массива тогда, когда они залегают глубже, чем верхний срезаемый слой – «шапочка» бетона (рис. 5.32). Увеличение толщины верхнего подрезного слоя – как простейшее решение проблемы не всегда выполнимо, эффективно и, кроме того, не приемлемо из экономических соображений.

Возможными причинами возникновения этих трещин могут быть следующие:

- интенсивное высыхание верхнего слоя массива при использовании цементов с высокой водопотребностью или несоответствующим временем схватывания;
- слишком низкое В/Т при высокой тонкости помола в комбинации с цементами, обладающими повышенной водопотребностью или несбалансированностью в их составе карбонатных пород;
- пониженная температура поверхности массива из-за низкого содержания сильно обожжённой извести;
- низкая температура заливки или холодные формы;
- нарушение температурных режимов в цехе и сквозняки;
- несбалансированность состава смеси (слишком много тонкодисперсного вяжущего и мало кремнеземистого компонента);
- сочетание нескольких факторов.

Рекомендации по устранению:

- использование цементов с подходящими параметрами;
- применение тёплых камер с высокой влажностью воздуха перед автоклавами;
- повышение В/Т смеси и более грубый помол компонентов;

- изменение соотношения известь/цемент;
- использование для заливок подогретых форм;
- увеличение количества обратного шлама в составе смеси;
- нормализация температурных режимов в цехе.



Рис. 5.32 – Усадочные трещины в теле ячеистого бетона

### **5.2.3 Дефекты, возникающие во время резки массивов**

Анализ дефектов показал, что они могут быть скрытыми и явными. Самыми распространенными явными дефектами являются трещины, возникающие в процессе резки.

Скрытые дефекты могут быть не видны перед резкой массива и проявляются только после ее окончания. Причины их появления могут быть совершенно различными, и проявляться в виде крупных пор и линз, отслоений, трещин, околлов и др. В настоящем разделе рассмотрим самые распространенные из скрытых дефектов – крупные поры, линзы и отслоения.

Рассмотрим их более подробно.

На нижеприведенных рисунках представлены дефекты, открывающиеся после фрезерования (срезания «верхушки») боковых сторон массива (в случае резки массива в вертикальном положении). Они

могут быть представлены в виде большого количества крупных пор и линз (рис. 5.33 *а*) и в виде отслоений поверхности бетона (рис. 5.33 *б*).

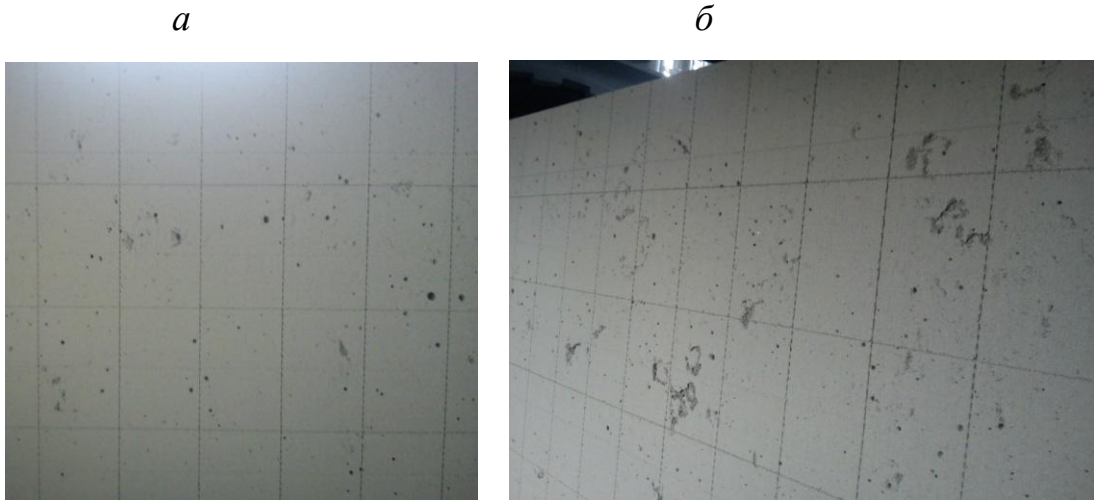


Рис. 5.33 – Крупные поры и отслоения поверхностных слоев бетона

Основные причины их возникновения рассмотрены в разделе 3.2, но следует добавить, что таких дефектов всегда больше в верхней части залитого массива (относительно направления его роста) и, в общем случае, это:

- низкие В/Т и высокие температуры заливки;
- сильное расслоение плотности массива по высоте;
- недоросший массив, срезание чрезмерно тонкого слоя бетона;
- резка пересушенного массива;
- нарушение температурных режимов производства.

Значительно уменьшить количество названных дефектов поможет увеличение высоты подъема массива.

Наиболее значимым фактором в появлении этих дефектов является активность смеси по СаО, температура и количество воды в смеси. Поэтому уменьшение количества вяжущих веществ (а особенно извести) в бетоне, а так же повышение водотвердого отношения поможет быстро устранить эти дефекты. Однако надо иметь в виду, что в результате таких операций увеличатся сроки выдерживания массивов до набора необходимой пластической прочности в зоне ферментации.

Уменьшение количества гипса и обратного шлама поможет смеси немного снизить ее вязкость и увеличить высоту подъема, но при этом несколько замедлится набор пластической прочности бетона.

Самой распространенной причиной расслоения бетонной смеси по высоте может явиться некачественное перемешивание ее в смесителе, высокая скорость слива смеси в форму при высокой температуре и повышенной вязкости.

Некачественное перемешивание как правило происходит из-за выхода из строя мешалки в бетоносмесителе, поэтому необходимо постоянно следить за исправностью мешалки и вовремя производить ее ремонт и замену.

Еще одним способом устранения рассматриваемых дефектов является увеличение количества газообразователя в составе бетонной смеси для обеспечения большей высоты массива при его подъеме и, соответственно, срезания более толстого слоя бетона с нарушенной структурой.

Явным дефектом резки могут явиться различного рода некачественный резы массивов: дугообразный шов между блоками и косой рез (рис. 5.34).

Дугообразные швы получаются, как правило, в результате резки перезревших массивов, или при использовании некачественных (длинных или вытянувшихся) струн. Эти дефекты лучше предупреждать, чем предотвращать, так как резка перезревших массивов приводит не только к изменению геометрических параметров, но и к возникновению других внутренних и внешних повреждений изделий.



Рис. 5.34 – Косой рез массива, в результате неправильно установленных струн

Предотвратить появление таких дефектов помогают организационные мероприятия: обязательная проверка геометрических размеров блоков после замены струн или при изменении номенклатуры резки.

Некоторые дефекты резки массивов могут проявляться в виде механических повреждений. Основные виды механических повреждений массивов и блоков рассматриваются в следующем разделе.

#### **5.2.4 Дефекты, возникающие при автоклавировании газосиликатных изделий**

Процесс автоклавирования газобетонов достаточно сложен. Длится он в среднем 11,5 – 12 часов и вмешаться в процесс во время автоклавной обработки массивов без веских на это причин нельзя. Однако иногда может произойти резкое изменение режима (сбой), в результате которого появляется брак продукции. Особенно опасны для продукции резкие изменения давления внутри автоклава при подъеме температуры и давления, когда массивы не имеют достаточной прочности (рис. 5.35).





Рис. 5.35 – Дефекты изделий в результате резкого изменения режима автоклавной обработки (из [264])

Причинами сбоев режимов автоклавирования могут быть только нарушения в работе паровых котлов в результате отключения подачи электроэнергии или выхода из строя самого котла.

Для предотвращения этих дефектов необходимо:

- предусмотреть обеспечение предприятие качественным гарантированным и бесперебойным электропитанием;
- предусмотреть возможность переключения автоклава на запасной котел.

Еще один весьма распространенный дефект изделий при автоклавировании – появление темных пятен на изделиях (рис. 5.36). При проверке прочности на сжатие образцов, вырезанных из блоков, имеющих этот дефект, установлено, что образцы-кубы из темного бетона показывают значительно меньшие прочности, чем кубики, вырезанные из более светлых участков.

Основной причиной появления указанного дефекта является неправильно подобранный состав газосиликата, повлекший снижение проницаемости материала и как следствие – некачественное вакуумирование массивов в автоклаве.



Рис. 5.36 – Темные пятна на изделиях после автоклавной обработки

Для его устранения необходимо откорректировать гранулометрический состав газобетонной смеси и подобрать правильный, оптимальный для него режим (длительность и глубину вакуума) вакуумирования.

### **5.2.5 Механические повреждения газосиликатных изделий**

Механические повреждения массивов и газосиликатных изделий, проявляющиеся в виде трещин, сколов и отбитостей, появляются при:

- транспортировании «зеленых» и прошедших автоклавную обработку массивов от поста к посту;
- резке массивов;
- делении массивов на делителе;
- перемещении изделий при сборке их в пакеты;
- транспортировании упакованных изделий на склад;
- во время их хранения.

Основными причинами их возникновения являются:

- нарушение температурных режимов производства;
- недостаточная жёсткость форм;
- разница высотных отметок транспортных путей (не выдержаны вертикальные отметки при монтаже рельсов и ролльбанов);

- местные дефекты поверхности транспортных путей по направлению следования форм и массивов;
- дефекты переходов с трансбордеров на стационарные пути;
- проблемы при кантовании и распалубке форм;
- нарушение технологической дисциплины;
- причины механического характера и др.

Рассмотрим этот вопрос более подробно.

**Дефекты транспортирования «зеленых» и прошедших автоклавную обработку массивов от поста к посту.**

Для устранения этих дефектов необходимо:

- проверить высотные отметки всех транспортных путей и передаточных механизмов, и, если необходимо, заново провести их нивелировку;
- отрегулировать трансбордеры и манипуляторы.

Часто можно наблюдать трещины на созревших массивах, появившиеся при их резке. Основными причинами их появления являются следующие:

- резка «перезревших» массивов (с повышенной пластической прочностью) (рис. 5.37);
- несоответствие скорости резки пластической прочности массива и количеству резов по вертикали;
- неправильная расстановка резательных струн на машине горизонтальной резки.

Другие дефекты непосредственно в процессе резки могут оставаться незаметными и проявляться только после автоклавирования (рис. 5.38).

Эти трещины обычно наводятся в местах наибольших концентраций напряжений массива: в угловых частях пазов или гребней. Причинами названных дефектов могут быть следующие:

- не правильно выставленные по горизонтали и вертикали ножи для вырезания пазов и гребней;

- дефекты на поверхностях ножей;
- некачественно изготовленные ножи (неплоскостность пластин ножей);
- дефекты рельсовых путей под резательной машиной.



Рис. 5.37 – Механические повреждения массива при резке

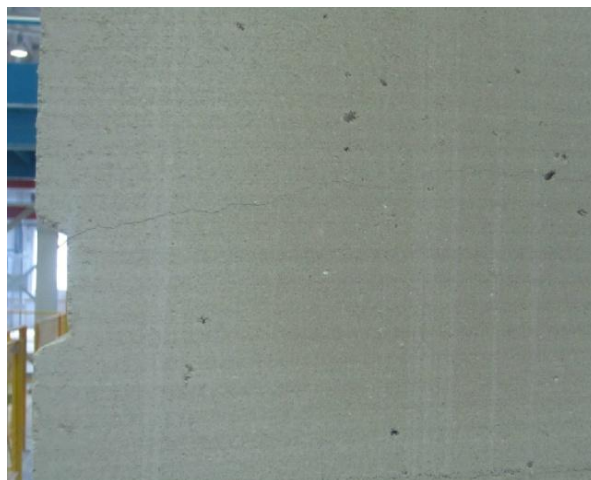


Рис. 5.38 – Трещины, возникающие при неправильной резке

Следующий вид дефектов механического характера – трещины, возникающие при кантовании массивов (рис. 5.39).

Устранение причин появления трещин при резке, кроме случаев перестоя в зоне ферментации, достаточно трудоемкий и кропотливый процесс. Очень важно сбалансировать пластическую прочность массива,

скорость его резки и номенклатуры (количества устанавливаемых струн по высоте массива).

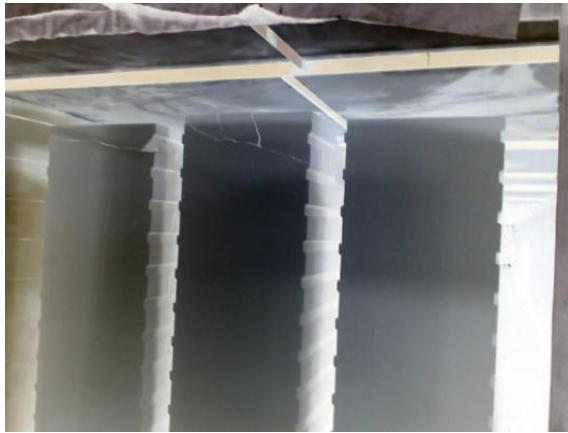


Рис. 5.39 – Трещины, возникающие при кантовании массивов на кране распалубки

Рассмотрим еще несколько механических дефектов, возникающих при делении массива после автоклавирования.

На рис 5.40 представлена фотография распространенного дефекта, проявляющегося в виде сколов бетона массива, трещин и разрушений.

Причинами его появления могут быть:

- низкая пластическая прочность массива перед резкой;
- нарушение температурных режимов в цехе;
- дефекты транспортных путей на линии резки;
- неисправность делителя;
- разбалансированность транспортера под делителем;
- использование в технологии поврежденных днищ;
- неправильно подобранный состав сырьевой смеси.

Резка массивов с пониженной пластической прочностью (недозревшие массивы) совершенно недопустима, особенно в тех случаях, когда при производстве изделий используется технология автоклавирования массивов вместе с подрезным слоем. Поэтому, очень важным на этапе выдержки массивов в отделении ферментации является

контроль прочности и недопущение выхода на линию резки массивов, не набравших необходимую пластическую прочность массивов.



Рис. 5.40 – Механические повреждения массивов на делителе

Недобор прочности бетона в процессе производства может наблюдаться при замедлении скорости твердения массивов. Основным фактором, влияющим на это является изменение активности и температуры гашения извести. Вторым по значимости фактором является изменение свойств цемента, например, активности и сроков его схватывания. Далее, в порядке уменьшения влияния можно назвать: снижение температуры заливки; воздуха в отделении ферментации и низкая температура форм, подаваемых под заливку массивов.

Однако даже при достаточно высокой пластической прочности может наблюдаться повышение влажности среды внутри массива. Это происходит при нарушении температурных режимов на производственной линии, например, при большой разнице внутренней и наружной температуры массива. В этом случае, при выходе формы с массивом из отделения ферментации, поверхность бетона начинает постепенно остывать, и внутри него после распалубки происходит интенсивное конденсатообразование. Затем, сконденсированная вода стекает вниз, к

днищу, на котором массив перемещается, что приводит к залипанию подрезного слоя и, в дальнейшем, повреждению изделий делителем.

Другой причиной появления дефектов на делителе, как сказано выше, может являться неправильная резка массива вследствие: неправильной установки (с перекосом) струн на машине горизонтальной резки массивов; разницы отметок рельсового пути тележки на линии резки; использования поврежденного (неплоскостного) днища для резки массивов.

Трещины могут появиться и у качественно порезанных массивов при их делении (рис. 5.41). Причинами этого могут быть:

- неисправности делителя, такие как: перекос рамы; механические повреждения и деформации губок; не правильная работа гидравлической системы делителя;
- дефекты технологической линии под делителем: разбалансированность (разность высотных отметок) транспортера;
- неправильная позиция установки массива (несовпадение вертикальных швов с губками делителя);
- комплекс причин, например, смещение оси транспортера относительно делителя, при этом, неподвижные губки делителя не достают до массива, а подвижные его наклоняют и деление горизонтального ряда изделий происходит не по плоскости реза.

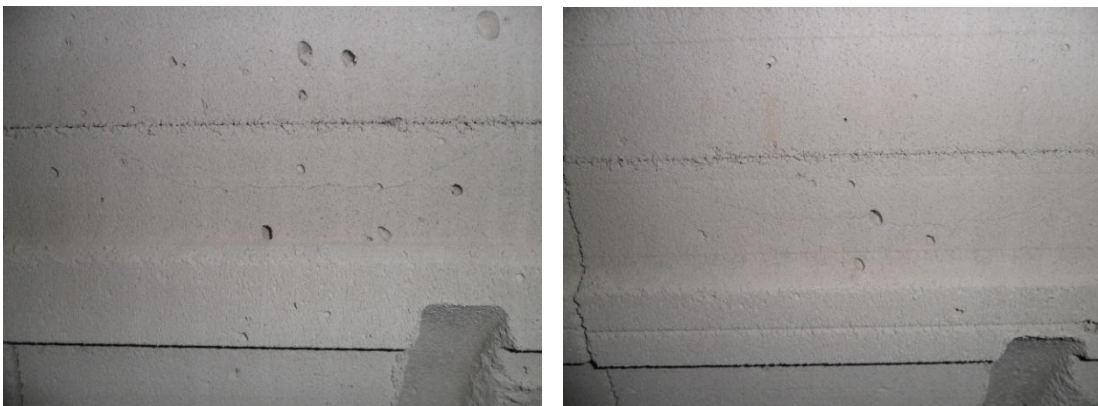


Рис. 5.41 – Механические повреждения массивов на делителе



Для устранения таких повреждений готовой продукции рекомендуется:

- повысить прочность и снизить влажность массивов перед резкой;
- провести проверку и регулировку транспортных путей линии резки и делителя;
- отрегулировать датчики остановки массива под делителем;
- отрегулировать температурные режимы в цехе;
- проверить и отрегулировать состав заливочной смеси.

В некоторых технологиях производства блоков из газобетона подрезной слой после резки «зеленого» массива остается, а его отделение производится на делителе после автоклавной обработки.

В этих технологиях весьма распространенным является такой дефект изделий, как не отделившийся подрезной слой (рис. 5.42).

Возможные причины дефекта:

- недостаточная пластическая прочность перед резкой массива и слишком высокая влажность бетона;
- маленький диаметр режущей струны на установке горизонтальной резки;
- не достаточно глубокий и длительный вакуум при автоклавировании массивов;
- изменение качества и тонкости помола сырья.



Рис. 5.42 – Изделия, с не отделившимся подрезным слоем



Для устранения дефектов можно предпринять следующие шаги:

- повысить пластическую прочность массивов перед резкой (увеличить время выдержки в отделении ферментации);
- проверить и заменить или увеличить диаметр нижней струны;
- изменить режим вакуумирования;
- отрегулировать состав смеси.

Еще одним, наиболее распространенным дефектом (рис. 5.43)



Рис. 5.43 – Внешний вид массива, разделенный неисправным делителем

На линии упаковки изделий часто можно наблюдать дефекты в виде околов боковых граней. Большой частью они получаются на уплотнительной установке (рис. 5.44). Причины появления этих дефектов могут быть самыми разными:

- некорректный состав бетона, способствующий его повышенной хрупкости;
- внутренние дефекты изделий, проявляющиеся при движении изделий по конвейеру;
- сверхнормативная масса изделий и повышенная их влажность;
- некачественно изготовленные деревянные поддоны, используемые для упаковки блоков;

- несоответствие конструкции деревянные поддонов размерам цепных транспортеров, в результате чего поддоны могут деформироваться;
- неисправность цепных транспортеров (чрезмерные динамические нагрузки при движении поддонов с блоками);
- разбалансированность вертикальных отметок стыков различных участков транспортеров.



Рис. 5.44 – Околы бетона, полученные на уплотнителе

Основные причины появления таких дефектов не требуют больших усилий при их устранении. Достаточно проверить и отрегулировать работу транспортеров и высотные отметки стыков, а так же выполнить проверку соответствия проекту качества деревянных поддонов.

Сложнее обстоит дело, в случае, если причиной все-таки является несоответствующий состав заливочной смеси и ее повышенная влажность после автоклавирования. С устранением этих причин технологам необходимо внимательно и тщательно разбираться, поочередно устраняя все причины, влияющие на появление данных дефектов. В частности, повышенная хрупкость бетонов может быть из-за чрезмерного количества гипса в составе бетона или высокой активности заливочной смеси по СаО.

В причинах высокой плотности, а соответственно большой массы бетонов необходимо разбираться в каждом конкретном случае.

Рассмотренные выше дефекты не исчерпывают их виды. На отдельных предприятиях в массивах могут появляться трещины, или другие повреждения типичные только для данного предприятия или технологии. Сложность определения и решения вопросов по устранению их причин состоит в том, что дефекты, возникающие во время роста массива, можно отчетливо видеть только после автоклавирования изделий, а непосредственное вмешательство в процесс после заливки массива невозможно.

Мероприятия по устранению причин, ведущих к образованию дефектов выполнять сложно, так как на их появление часто влияют одновременно несколько факторов. При этом необходимо помнить, что регулирование технологических параметров не должно ухудшать уже достигнутые характеристики качества производимых изделий. Поэтому после каждого шага должна производиться всесторонняя проверка всех технических характеристик готовой продукции. Это весьма длительный и трудоемкий процесс.

### **5.3 Организационно-технические мероприятия для повышения эффективности производства газосиликатов**

Многие навыки и знания персонала, полученные до и в период запуска производства (приработки) бессистемны, технологические закономерности не установлены и поэтому нет полного понимания о последствиях, к которым может привести то или иное действие, или бездействие операторов и технологов, работающих на технологической линии. Это же касается линейного обслуживающего персонала и управленческого инженерного состава.

Таким образом, задача консультанта в этот период состоит в разъяснении важности снижения энергоемкости производства, оперативного решения технологических и технических вопросов

производства, вооружении персонала методиками правильного и своевременного решения задач на местах.

Все решения, принимаемые для совершенствования и повышения эффективности производства должны приниматься с учетом максимального снижения энергоемкости технологических процессов производства газосиликатов. Повышению экологичности и снижению энергоемкости посвящено немало научно-исследовательских работ, как в России [265 – 270], так и за рубежом [271, 272], в том числе – работ автора [183, 273, 274].

Основные пути энергосбережения – это сохранение и вторичное использование тепла автоклавов, использование отходящих газов котельной для высушивания газосиликатных изделий с одновременным снижением температуры газов; использование высокотемпературных агентов для подсушивания песка и подогрева помещений предприятия; использование тепла конденсата для подогрева воды в технологии (через теплообменники); применение конденсата для интенсификации помола, а в зимнее время для подогрева и оттаивания песков и др.

Крайне важным в организации производства является обеспечение взаимодействия всех постов на технологически переделах, а также оперативность и правильность принятия решений.

Для этого рекомендуется все производственные посты обеспечить односторонней телефонной связью с центральным постом. Оператор центрального пульта должен владеть информацией о состоянии дел на каждом технологическом переделе, в том числе о наличии сырьевых материалов, поддонов для упаковки и др., чтобы незамедлительно реагировать и сообщать об отказах оборудования или других вопросах специалистам соответствующего профиля.

Только оператор центрального пульта совместно с мастером или технологом принимает решение об остановке производства в случае необходимости.

## **Рекомендации по технологическим переделам, для обеспечения эффективной работы производства.**

### 1. Отделение подготовки сырьевых компонентов.

– рекомендуемые автором требования к цементам, извести, песку приведены в главе 1. Из опыта производства можно сказать, что цементы с 5 % добавки шлака больше чистоклинкерных цементов подходят для производства ячеистых бетонов автоклавного твердения.

– нормальная плотность прямого шлама 1,68 – 1,72 т/м<sup>3</sup>;

– удельная поверхность песка в шламе для газобетона: D 600 – 2200 – 2500 см<sup>2</sup>/кг; D 500 – 2500 – 2800 см<sup>2</sup>/кг; D 400 – 2800 – 3200 см<sup>2</sup>/кг.

Для интенсификации процесса помола кварцевых песков и снижения нагрузки на окружающую среду, часть воды, подаваемой в мельницу мокрого помола, может быть замещена конденсатом, образующимся в автоклавах. Обычно, конденсат, собирается в сборную емкость, проходя до этого несколько этапов очистки от механических загрязнений, остывает, усредняется в емкости и подается в мельницу помола песчаного шлама в количестве 5 – 40 % от общего объема потребляемой воды.

Необходим быстрый намол прямого шлама в количестве 80 – 85% объема шламбассейна по крайней мере за 12 часов до начала применения, для возможности его гомогенизации и остывания. Температура прямого шлама при использовании в производстве должна быть не выше 35 °С.

– Рабочая плотность обратного шлама может быть принята 1,38 – 1,42 т/м<sup>3</sup>, температура 25 – 33 °С.

### 2. Работа отделения приготовления алюминиевой суспензии

– алюминиевая суспензия может готовиться из пудры и пасты. Общепринятое на современных технологических линиях рабочее соотношение алюминия к воде 1 : 20. При приготовлении суспензии из пудры время перемешивания должно быть не менее 60 мин.

Рабочая температура суспензии – 18 ± 2 °С.

С целью экономии средств возможно рассмотрение следующего предложения: на пудре ПАП-1 можно изготавливать классы бетонов по плотности D 600 и D 500; на пудре ПАП-2 – D 400.

При приготовлении суспензии из паст, в связи с небольшим объемом емкости в отделении приготовления, концентрацию суспензии можно увеличить на 1 : 15 и 1 : 10, но делать это необходимо постепенно, корректируя при этом все остальные параметры. Время перемешивания суспензии из пасты может быть несколько меньше, например, на пасте ЭККАРТ можно довести его до 20 – 35 мин. Эти действия, так же как и в других случаях, необходимо проводить постепенно.

### 3. Пост заливки газобетонной смеси:

Для уточнения активности и состава бетонной смеси, отбирать пробы вяжущих материалов необходимо на второй заливке (данное требование связано с тем, что в первой заливке может находиться известь от предыдущей партии).

– приглашать сотрудника лаборатории для отбора извести на посту заливки следует на 12 , 13 массивах заливаемого автоклава с целью возможности получения данных для корректировки к следующему автоклаву.

Средний такт заливки автоклава может быть минимальным – 5 мин, но после каждого автоклава необходимо делать паузу не менее 15 мин. от времени последней заливки для возможности выполнения корректировок составов смесей и на случай задержки резки массивов.

Для бетонов марки по средней плотности D 400 при минимальном такте заливки (5 – 6,5 мин), перерыв 15 мин можно делать после двух залитых автоклавов.

### 4. Ударные столы (при наличии).

Для выполнения обработки растущих массивов на ударных столах рекомендуется придерживаться следующих установок:

амплитуда удара при обработке:

D 600 – 1,2 мм;

D 500 – 1,5 мм;

D 400 – 1,8 мм.

Частота для всех плотностей может быть одинакова: 60 – 65 ударов/мин.

#### 5. Работа трансбордера (передаточной тележки)

Не менее чем 1 раз в неделю необходимо проводить обслуживание трансбордера зоны ферментации с целью выравнивания его диагоналей, проверки узлов и высотных отметок. Для этих работ необходимо использовать только время технологических перерывов, указанных технологами.

Каждому оператору, совместно с технологом, определиться при какой прочности выпускать массивы на линию резки, при этом, вызревшими считаются массивы, имеющие показатель пластической прочности по пенетрометру перед машиной горизонтальной резки не менее 3,4 единицы для всех плотностей.

В случае вынужденного перерыва производства, все формы должны находиться в закрытых стойлах.

#### 6. Отделение ферментации (созревания).

Не менее чем за 8 часов до начала запуска производства, в отсеках с формами должен включиться обогрев. Формы под смазку и заливку подаются с температурой не менее 35 °С.

На всех постах созревания массивов должны быть обеспечены условия для качественного контроля хода созревания массивов: возможность доступа специалиста контрольных служб и операторов, достаточное освещение во всех точках массива. С целью экономии энергоресурсов, в стойлах должны быть установлены датчики, регулирующие температурно-влажностный режимы и освещенность рабочего места.

#### 7. Линия резки.

Пенетрометр для замеров пластической прочности должен находиться у оператора крана распалубки форм, так как особо важно обеспечение постоянной пластической прочности перед машиной горизонтальной резки. Оператор крана допускает установку массивов на линию резки с прочностью бетона не менее 3,4 единицы по пенетрометру.

Для правильной организации производства при резке массивов на машинах вертикальной и горизонтальной резки классов по плотности D 600 и D 500 должны использоваться специальные струны круглого сечения 0,8 мм; для класса по плотности D 400, на машине горизонтальной резки лучше установить струны 0,6 мм.

Струны, устанавливаемые на машине боковой профилировки должны быть размером 1 мм.

Замену всего комплекта струн на машине горизонтальной резки необходимо производить не реже 1 раза в неделю во время технологических перерывов. Весь комплект струн на машине вертикальной резки меняется при переходе на другую номенклатуру резки по высоте блоков, но не менее 1 раза в неделю без специальной остановки технологического процесса.

Скорость резки массивов необходимо регулировать следующим образом: для класса по плотности D 600 – возможно увеличение скорости до 35 %; при резке класса по плотности D 500 – скорость может быть 30 %; для класса D 400 – 20 %.

Скорости резки могут быть увеличены или уменьшены в зависимости от номенклатуры резки. Чем меньше швов на массиве, тем больше допустимая скорость резки. Изменение скоростей, в зависимости от условий, сложившихся на производстве в данный момент, возможно только с разрешения технолога.

Перед началом смены у операторов линии резки должны быть приготовлены струны в количестве не менее одного машино-комплекта –



это неснижаемый остаток струн на каждой смене. За наличием, качеством и количеством струн должен следить мастер смены.

Резка массивов должна осуществляться с тем же тактом, что и заливка.

При резке массивов повышенных плотностей, особенно важно, чтобы у оператора установки вертикальной резки (особенно при использовании не достаточно качественных струн) был помощник, для быстрой замены струн (не более 12 сек. на одну струну).

При изменении номенклатуры резки, первый порезанный массив должен быть проверен по геометрическим параметрам изделий. Для этого, после резки массива, оператор машины вертикальной резки обязан выполнить проверочный обмер массива.

По окончании резки массив должен быть подписан (порядок и вид маркировки обычно устанавливается требованиями предприятия). Однако, во избежание возникновения брака при делении массива, предлагается, при изменении плотности бетонов или номенклатуры резки, на первой тележке с новыми изделиями выполнять маркировку массива с двух сторон, для акцентирования внимания на этих изменениях оператора делителя.

#### 8. Предавтоклавные пути.

Время комплектации массивов на предавтоклавных путях должно быть максимально коротким, не более 2 часов. По окончании комплектации автолавного поезда, весь состав в течение 10 – 15 мин должен быть отправлен в автоклав для обработки, во избежание остывания массивов.

Температура на предавтоклавных путях должна быть не ниже 35 °С. Сквозняки – недопустимы.

Хранение "зеленых" массивов в местах коденсатообразования, равно как попадание конденсата на бетон – недопустимо.

#### 9. Автоклавирование.

Во время вакуумирования производится выравнивание по объему влажности и температуры массива. Из-за небольшого содержания влаги внутри массива, процесс вакуумирования бетона при ударной технологии можно значительно сократить, например – до 45 минут. Глубина вакуума при этом может быть - 0,5 Бар. Таким образом, график вакуумирования будет следующим: снижение давления до 0,5 Бар – 7 мин; выдержка при вакууме – 30 мин; выход из вакуума до 0 Бар – 7 мин.

Подъем давления и температуры рекомендуется выполнять в два этапа:

Подъем давления от 0 до 3 атмосфер в течение 60 мин, а до максимального давления – 90 мин.

При ударной технологии производства это процесс можно сделать более жестким: первый подъем – 45 мин., второй – от 3 до 11,5 атм. – 60 мин.

Изотермическая выдержка при температуре 175 – 180 °С может продолжаться 6 – 8 часов.

Наиболее рациональными режимами можно считать следующие: пониженные плотности D 400 и D500, имеющие повышенную проницаемость можно обрабатывать по укороченным режимам – 360 мин. Бетон D 600, а так же массивы с плотностью D 500, при крупной номенклатуре резки: более 300 мм (горизонтальная резка) рекомендуется обрабатывать по 8-часовому графику.

Обычное время снижения давления до нормального (атмосферного) и температуры 80 – 70 °С осуществляется в течение двух часов.

При маловодной технологии этот график так же может быть изменен в сторону уменьшения. При этом снижение давления и температуры можно осуществлять за 90 мин.

#### 10. Участок деления массивов.

Деление массивов необходимо производить максимально быстро после автоклавирования. Это особенно важно при использовании маловодных технологий изготовления изделий.

Установлено, что массивы лучше делятся, когда температура внутри них не ниже 80 °С.

#### 11. Упаковка изделий.

Максимальная производительность технологической линии может быть достигнута только тогда, когда это позволяет сделать линия упаковки, поэтому, обеспечение максимальной пропускной способности линии упаковки является основной задачей технологов. Такт упаковки должен быть таким же как такт заливки.

Для обеспечения высокой скорости упаковки рекомендуется в обязательном порядке выполнять следующие условия:

1. Обеспечить высокое качество изготавливаемых изделий;
2. Максимально унифицировать номенклатуру резки. На одном массиве может быть не более двух типоразмеров изделий.
3. Обеспечение максимального качества деревянных поддонов, используемых при упаковке, при этом геометрические параметры поддонов должны быть обеспечены с точностью  $\pm 1$  мм, в любом измерении.

12. Участок приемки готовой продукции на склад и отгрузки ее потребителю.

Одним из важных условий обеспечения качественной приемки и хранения продукции на складе готовой продукции является наличие хороших дорог и качественно изготовленной площадки для хранения продукции.

Упакованная и замаркированная продукция с линии упаковки обычно снимается и перевозится к месту складирования погрузчиком с вилочным захватом. Для обеспечения должной производительности технологической

линии необходимо, чтобы количество погрузчиков обеспечивало такт разгрузки продукции соответствующий такту заливки.

Такие же требования предъявляются к количеству отгружаемой продукции. Таким образом, для эффективной работы предприятий, выпускающих газосиликатные изделия, необходимо, чтобы работа всех технологических переделов имела пропускную способность, соответствующую максимальной производительности предприятия.

Выполнение мероприятий, предложенных автором, поможет предприятиям избежать многих ошибок в организации и технологии производства газосиликатов. В дальнейшем, предприятия могут самостоятельно эффективно решать другие, менее глобальные, но не менее значимые задачи.

#### **Рекомендации по улучшению организации производства автоклавных газосиликатов.**

Согласно многочисленным исследованиям [275], производительность труда персонала российских предприятий составляет менее 50% от потенциально возможного уровня и это без учета производительности оборудования. Поэтому актуальна проблема улучшения организации производства на предприятиях по выпуску ячеистых бетонов автоклавного твердения.

Основоположником научной организации труда и менеджмента считается Ф. Тейлор [276]. Он вывел три основных направления управления: нормирование труда; систематический отбор и обучение персонала; денежные стимулы, как вознаграждение за конечный результат.

Причину низкой производительности труда Ф.Тейлор описал следующим образом: «Когда работник приходит на работу, то он сознательно стремится работать так мало, как только может, делая не более одной трети или половины надлежащей дневной выработки... И если бы он всеми силами стремился к возможному повышению своей

выработки, то за это его товарищи-рабочие отнеслись бы к нему крайне недружелюбно...».

То есть коллектив рабочих, стремясь не допустить повышения плана (выработки), не позволяет ни одному члену коллектива начать работать лучше. Если коллектив не настроен на эффективную работу, то, используя методы коллективного давления, он будет всячески препятствовать любому сотруднику организации работать продуктивно. Поэтому бесполезно пытаться мотивировать каждого работника в отдельности, пока коллектив не желает продуктивно работать [277, 278]. И эта проблема существует не только на уровне рабочих, она является общей для любых структур и организаций.

Таким образом, высокий уровень производительности труда на предприятиях и в организациях возможен лишь тогда, когда весь коллектив начинает мыслить в одном направлении, когда коллективное мышление становится нацеленным на рост эффективности организации производства.

Эта деятельность похожа на деятельность по внедрению систем управления качеством, таких как в России – КС УКП (Комплексная система управления качеством продукции) [279 – 281], как система ISO 9000, внедряемая сегодня практически повсеместно и др.

Особенности коллективного мышления напрямую связаны с особенностями менталитета, который определяет модель мышления и поведения жителей той или иной страны. У каждой нации свой уникальный менталитет и, как следствие, уникальное коллективное мышление.

Есть страны, которые развиваются медленно и с трудом. В этих странах другие особенности менталитета, коллективное мышление нерационально (коллектив не заинтересован в эффективной работе организации). Дисциплина и исполнительность на низком уровне. Управлять организациями очень сложно, производительность труда и

эффективность организаций остаются крайне низкими. К странам, в которых из-за особенностей национальных менталитетов коллективное мышление нерационально, относятся почти все бывшие республики СССР, включая Россию.

В России, важна не столько мотивация, сколько понимание каждого члена трудового коллектива, насколько важна его (персональная) роль в достижении общей цели.

Так, нерациональное коллективное мышление порождает неорганизованность и неповоротливость любой структуры – коллектив медленно и с неохотой осваивает любые технологии, новое оборудование, новые методы, системы и стандарты управления. В результате затраты на производство или модернизацию окупаются с трудом и очень медленно. Ничего не работает так, как надо. Именно так происходит практически на всех современных предприятиях по выпуску ячеистых бетонов автоклавного твердения.

И действительно, почти все инициативы собственников и руководителей российских компаний, направленные на модернизацию и повышение эффективности своих организаций, заканчиваются отсутствием результата. Практика приглашения западных топ-менеджеров также не оправдывает себя.

Ничего невозможно изменить на отечественных предприятиях, пока коллективное мышление остается нерациональным. Поэтому для успеха любых реформ, любых положительных изменений в организациях необходимо вначале изменить коллективное мышление.

Транснациональные компании (Toyota, Ford, Honda, Sony, Coca-Cola, McDonalds и др.), создавая филиалы в других странах, в том числе в России, сталкиваются с аналогичной проблемой. И они научились эту проблему решать [282, 283]. Более полувека в своих зарубежных филиалах успешно внедряется рациональная организационная культура, рациональное коллективное мышление. Для этого работники иностранных

филиалов не менее трех месяцев проходят стажировку в головной компании, где они профессионально обучаются, но главное – перенимают новую модель.

Стажеры вливаются в коллектив головной компании, сотрудники которой дисциплинированы, исполнительны, работают качественно и высокопроизводительно. Чтобы не противопоставлять себя новому коллективу, стажер вынужден копировать модель поведения остальных работников, то есть действовать так же эффективно. В течение нескольких месяцев новая модель поведения начинает входить в привычку. Возвращаясь в свой филиал, коллектив стажеров «везет» с собой рациональную организационную культуру, рациональное коллективное мышление. В конечном счете, сотрудники иностранных филиалов начинают работать так же эффективно, как сотрудники головной компании.

Но у данного метода есть ограничения, колоссальные затраты на временный переезд всего персонала предприятия в другую страну, его проживание, заработную плату и обучение в течение нескольких месяцев. Во-вторых, ни одна транснациональная корпорация не возьмется за продолжительную стажировку персонала сторонней иностранной организации. Здесь требуется принципиально другое решение.

Быстрое развитие многих азиатских стран, таких как Япония, Южная Корея, Сингапур, Китай называют Азиатским экономическим чудом. Оно вызвано ничем иным, как особенностями азиатских менталитетов, связанных с рациональным коллективным мышлением (когда весь коллектив мыслит интересами организации). Благодаря такому уникальному типу мышления происходит существенное упрощение процесса управления, повышение эффективности организаций. Происходит быстрый и мощный рост компаний и национальных экономик [284].

Многие особенности менталитета народов юго-восточной Азии, обеспечивающие высокие показатели их трудовой этики, совпадают с достижениями современной социальной психологии малых групп. Возможно, даже что связь между ними обратная....

Важнейшим элементом менталитета народов западной Европы и Америки является дух состязательности, стремление все ранжировать, широкое применение различных рейтингов. В особенно иррациональной форме это практиковалось в СССР, где в каждом трудовом коллективе красовались доски «Почета», «Лучшие люди», а нередко и доски «Позора», что наносило непоправимый ущерб психологическому климату в коллективе и качеству труда в нем. Современная Россия медленно и подчас недостаточно последовательно избавляется от этих «пережитков прошлого».

Менталитет народов юго-восточной Азии категорически запрещает противопоставление членов трудового коллектива. Руководство стремится реализовывать принципы «Все за всех» и «Все за одного».

Социальная психология малых групп осуждает публичные разносы провинившихся работников, а ведь это излюбленный стиль руководителей авторитарного типа. Практика показывает, что при этом исправляется только 10% плохих работников. Если же руководитель проводит с таким работником индивидуальную разъяснительную беседу в уважительном стиле, то положительный результат достигается в 80 – 90 % случаев. Впрочем, если провинившийся работник – это воинствующий бездельник и неумеха с претензиями на лидерство и повышенной экспрессией, обладающий даром убеждения, его необходимо срочно уволить.

Серьезное отставание западного менталитета от восточного в области психологии управления в настоящее время несколько сгладилось. Это происходит благодаря широкой автоматизации и роботизации современного производства, однако эта проблема вряд ли будет снята в ближайшее десятилетие. Более того, в крупных высокопроизводительных



производствах, выпускающих дорогостоящую и сложную продукцию, роль человеческого фактора возрастает. Об этом свидетельствуют участвовавшие случаи отзыва крупными автомобилестроительными и авиастроительными компаниями своей продукции для исправления вкравшихся в их изделия дефектов.

Производство газобетонных изделий на современных высокопроизводительных полуавтоматических технологических линиях не является исключением. Чтобы коллектив такого предприятия стал эффективно и производительно работать, необходимо преобразовать нерациональное коллективное мышление и сделать его рациональным.

Автором разработана модель управления коллективным мышлением предприятия, которая апробирована на нескольких производствах, выпускающих газобетонные изделия. При этом основные усилия при внедрении данной модели направлены на изменение образа мышления инженерного и линейного персонала с целью осознания ими своей значимости и, соответственно ответственности перед коллективом. Это позволяет существенно повысить эффективность управления.

При внедрении рациональной модели трудовых отношений на предприятии формируется новое коллективное мышление и новая модель поведения. Повышается дисциплина и исполнительность всего персонала, приказы и распоряжения руководителей начинают выполняться, процесс управления персоналом многократно упрощается. Выполняя несложные процедуры, предусмотренные в системе, руководитель получает автоматическое решение проблем управления в рамках всей организации. Это происходит потому, что коллективное мышление в сущности своей становится таким же, как в западных и азиатских компаниях. И это очень важно, так как рациональное коллективное мышление первично, с него начинается повышение производительности любой организации в любой стране мира.

Ниже приведены основные рекомендации автора для правильной и эффективной работы предприятий по выпуску газобетоносиликатов на современных технологических линиях.

1. Производится критический анализ существующей системы управления и организации производства. Проверяется квалификационный состав сотрудников предприятия.

Важнейшим условием организации стабильного выпуска качественной продукции является квалификационный состав производственного персонала. При этом самым лучшим вариантом являлось бы требование, чтобы у всех работающих на производственной линии было строительско-технологическое или общестроительное образование. Но, как правило, это требование выполняется далеко не на всех производствах. Однако имеются ключевые посты на технологической линии, где наличие специального образования просто обязательно. Это пост, где производится изготовление смеси и формование массивов. От работников этого поста, как правило – полностью зависит качество выпускаемой продукции.

2. На основании существующей структуры управления, составляется матрица ответственности, в которой обязательным условием является единоличная ответственность за каждый вопрос.

3. Определяется главное звено в цепочке ответственности производственного персонала по каждому переделу и виду отказов.

4. Организовывается система оперативного оповещения об отказах в технологии производства. Для правильной организации работы технологической линии необходимо обеспечение ритмичной работы всех технологических переделов. Так, при сбое ритма на линии упаковки готовой продукции, возникают сбои на посту заливки бетонов и т.п.

В связи с этим, все организационные решения при работе технологической линии должен принимать один человек – ответственный за работу смены. Именно этот специалист осуществляет постоянный

контроль деятельности всех постов технологической цепочки и от него зависит оперативность реагирования на создающуюся ситуацию. Таким образом, вся оперативная информация с постов технологических переделов стекается в одну точку.

При этом все посты должны быть обеспечены линией многоканальной телефонной связи. Как показывает практика, беспроводная связь на таких предприятиях неэффективна.

5. Разрабатывается оперативная система оповещения внутри служб.

6. Проводится обучение и оптимизация кадров производственного персонала. Налаживается система повышения квалификации предприятия.

7. Разрабатывается система контроля состояния, технического обслуживания и ремонтов оборудования технологической линии.

7. Разрабатывается и внедряется система организации поставки и хранения сырья стабильного качества и в необходимом количестве.

8. Организация работы отделения подготовки полуфабрикатов (прямого, обратного шламов, ИКВ). Основные рекомендации при этом следующие:

- с целью обеспечения качества обеспечения нормальных температурных режимов, усреднения и гомогенизации песчаного шлама, шламбассейн должен быть заполнен не позднее, чем за 6 часов до его включения в работу;

- температура обратного шлама в шламбассейнах также должна быть стабильной. Для этого, технолог и оператор должны вовремя переключаться с одного шламбассейна на другой (в соответствии с технологическими рекомендациями, приведенными в следующем разделе.)

- необходимо обеспечить стабильность свойств и качества ИКВ, для этого: помол ИКВ должен осуществляться в гомогенизаторы, а затем, подаваться в расходные бункера; в случае отсутствия гомогенизаторов, для усреднения ИКВ можно использовать способ перегрузок, для чего намол ИКВ осуществляется в накопительный силос, а затем, перекачивается в

расходную емкость. В случае отсутствия накопительных емкостей, очень сложно обеспечить должное качество размолотого материала. Единственным способом для возможности оперативного регулирования свойств заливочных смесей является правильная организация оперативного лабораторного контроля ИКВ (в основном определение активности, времени и температуры гашения) на посту формования. Для этого должен быть регламентирован учащенный лабораторный контроль указанных параметров.

– Обеспечение температурных режимов вяжущих (цемента, молотой извести, гипса), используемых для изготовления бетонных смесей так же зависит от правильной и своевременной организации доставки и хранения их на предприятии.

9. Для повышения эффективности работы операторов и производства в целом, все процессы, особенно те, которые не были предусмотрены в технологической линии стандартной комплектации, осуществляющиеся по инициативе предприятия должны быть автоматизированы и управляться с автоматически с пультов управления.

10. Организация работы всей технологической линии – самое важное условие стабильной работы всего предприятия. Основным требованием к организации работ по заливке бетонных смесей является кратность всех действий количеству массивов вмещаемых автоклавом.

Выполнение технологических корректировок внутри заливок одного автоклава недопустимо, это можно производить исключительно в случае возникновения обстоятельств непреодолимой силы. Особенно это касается корректировок, связанных с изменением активности заливочной смеси. Если готовится переход на другой вид вяжущего, его необходимо проверить заранее и запроектировать состав смеси.

11. Организация системы контроля качества комплектующих, сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, а также система оперативного оповещения ответственных лиц о его результатах.

Следующим этапом является вооружение персонала техническими и технологическими знаниями производств. Эти знания передаются консультантами-технологами в процессе производства.

С целью снижения себестоимости продукции из газосиликата, а также повышения экологической безопасности среды многие ученые работают над вводом в его состав различных отходов производств [92, 204, 285 – 295], однако, необходимо иметь в виду, что отходы производств как правило, нестабильны по составу и свойствам. Поэтому, прежде чем давать рекомендации по внедрению, необходимо стабилизировать их основные технические свойства. Для решения данной проблемы необходимо тесное взаимодействие с предприятиями – поставщиками отходов, для организации на их базе или отдельных перерабатывающих производств. Применение в производстве газосиликатов нестабильных материалов неминуемо ведет к снижению качества выпускаемой продукции.

### **Выводы по главе 5**

1. Выполнен критический анализ существующих технологий производства изделий из автоклавных ячеистых бетонов.

2. Показано, что существующая система складирования сырьевых материалов на большинстве предприятий нерациональна и расточительна по энергопотреблению ввиду отсутствия закрытых обогреваемых складов для песков и комовой извести. Так, например, комовая известь подвергается быстрой карбонизации на открытом воздухе и в значительной степени теряет качество, поэтому недопустима система ее хранения и накопления в холодных полузакрытых складах. То же относится и к песку. Рекомендуем: для песка устраивать навесы с гладким бетонным полом, имеющий уклон с устроенной системой удаления воды (ливневой канализации) и обогреваемые склады, как для песка, так и для комовой извести, емкостью не менее трехдневного запаса компонентов.

Выполнение этих рекомендаций не требует больших капитальных вложений, но дает значительное снижение энергозатрат на помол сырьевых материалов, при этом стабилизируется качество сырья, снижается себестоимость продукции, повышается ее качество и долговечность.

3. С целью стабилизации состава и свойств сырьевой смеси рекомендуется использовать формулу, учитывающую содержание СаО во всех компонентах бетона: извести, цементе и обратном шламе. Это позволяет стабилизировать параметры заливочных смесей при любой вариации содержания этих материалов.

4. Для стабилизации качества изделий с применением гипса рекомендуется минимизировать количество гипса в смесях. Исходя из теоретических соображений, целесообразна частичная замена гипса сульфатом натрия, который затрудняет кристаллизацию первичного этtringита в бетонной смеси. Для реализации этого предположения необходимы дополнительные исследования.

5. Теоретически обоснован способ определения степени созревания массивов в зоне ферментации бетонов (перед резкой), по влажности и температуре вместо пенетрометрии. Влажность можно определять более точно, в том числе методами нейтронографии, гигрометрии и др., тем более что этот показатель является первичным в данном процессе. Дано обоснование численного значения влажности в «зеленых» массивах ячеистых бетонов различных плотностей. Превышение этого значения вызывает слипание горизонтальных рядов массивов и приводит к браку продукции. Низкое значение влажности приводит к значительной потере прочностных параметров выпускаемых бетонов.

Для стабилизации процесса ферментации рекомендуется осуществлять подбор влажности разрезаемого массива, а затем обеспечивать постоянство этого показателя по расплыву цилиндра (прибор Суттарда) и начальной температуры заливочной смеси.

6. Произведена градация дефектов газобетонных изделий, возникающих в процессе производства, установлены причины их возникновения и разработаны рекомендации по способам их предотвращения и ликвидации. Реализация предложений автора позволяет значительно снизить энергоемкость и себестоимость производства и повысить качество выпускаемой продукции.

7. Образование первичного этtringита при литьевой технологии производства газобетонных изделий, когда в сырьевую смесь вводится ПСК либо гипс, может вызвать в сырце деструктивные напряжения и деформации, особенно при длительном выдерживании его перед автоклавированием. Повышенное содержание сульфатов не желательно также с точки зрения образования при автоклавной обработке  $\alpha$ -растворимого ангидрита, которые при охлаждении изделий способен быстро гидратироваться с локальным увеличением объема материала межпоровых перегородок газосиликата.

Образование вторичного этtringита при охлаждении газобетонных изделий не опасно, так как он кристаллизуется в среде с концентрацией извести не более 0,2 – 0,3 г/л, когда кристаллы этого минерала образуются и выпадают в порах изделий через «жидкую фазу». Исходя из изложенного, дозировку гипса при литьевой технологии производства газобетонов рекомендуется ограничить 5 – 7%, а в ударной – 2,5%.

8. Произведены внедрения разработок автора на предприятиях по производству изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения, сумма экономического эффекта при этом составляет более 120 млн. руб.

## Основные выводы и итоги работы

1. Произведено ранжирование примесей в природном кварцевом песке по степени их активности взаимодействия с гидроксидом кальция. На основе этого разработаны требования по содержанию в кварцевом песке примесей полевых шпатов, оксидов железа, слюд.

2. Существующие требования по модулю крупности кварцевого песка как сырьевого материала для производства газобетонов ( $M_k \geq 1,1$ ) является необоснованными и относится лишь к силикатным изделиям плотной структуры. Для автоклавных поробетонов предлагается ввести требования к модулю крупности в следующем интервале:  $0,3 \leq M_k \leq 0,7$ .

3. Показано, что скорость гашения известкового компонента газосиликатных материалов может регулироваться в широких пределах с помощью дешевых и доступных добавок электролитов. На этой основе рекомендовано регулировать скорость гашения извести, что позволит корректировать технологию производства с использованием слишком быстро или медленно гасящейся извести, что решает проблему применения в технологии газосиликатных материалов и силикатных бетонах быстрогасящейся извести.

4. Образование вторичного этtringита при охлаждении газобетонных изделий не опасно, так как он кристаллизуется в среде с концентрацией извести не более 0,2 – 0,3 г/л, когда кристаллы этого минерала образуются и выпадают в порах изделий через «жидкую фазу». Исходя из изложенного, дозировку гипса при литьевой технологии производства газобетонов рекомендуется ограничить 5 – 7%.

5. Расчет реакции образования тоберморита и ксонотлита из  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и кварца при температуре 180°C показал, что энтальпия первого равна 92 кДж/кг, а второго – 45 кДж/кг. Теплота реакции синтеза тоберморита может повышать температуру внутри изделий на 23°C, а ксонотлита на 12 °C.



Анализ заводских диаграмм изменения давления водяного пара в автоклавах показал, что при запарке изделий марок по средней плотности D 400 и D 500 наблюдается превышение этого показателя на 0,25 – 0,3 Бар над заданным значением (1,1 МПа абсолютное), поэтому система автоматического регулирования каждые 25 – 30 минут производит сброс давления пара. При плотности изделий 600 кг/м<sup>3</sup>, а также при использовании песков с повышенным содержанием полевых шпатов такие сбросы встречаются редко, а иногда полностью отсутствуют.

Эти данные подтверждают результаты термодинамических расчетов и показывают возможность экономии пара при производстве изделий, особенно с маркой по средней плотности D 400 и D 500 за счет использования тепла химических реакций при образовании тоберморита и ксонотлита.

6. Согласно результатам РФА и ДТА с ДТГ, в газосиликатных изделиях заводского производства с марками по средней плотности D 400 – D 600, изготовленных по ударной технологии и запаренных при 180°C, обнаружены и тоберморит, и ксонотлит. Количественное содержание последнего резко падает при росте средней плотности от 400 до 600 кг/м<sup>3</sup>. Это объясняется тем, что в этом же направлении снижается основность и активность гидросиликатной связки изделий.

Результаты фазового анализа изделий заводского изготовления различных марок по средней плотности (D 400 – D 600), согласуются с данными, полученными путем теоретических расчетов.

7. Согласно литературным данным и теоретическим соображениям, ксонотлитовые изделия отличаются более высокой морозостойкостью и атмосферостойкостью, однако их производство более энергоемко. Из изложенных в п. 6 данных, следует что используя тепловыделение при синтезе гидросиликатной связки, ксонотлитовые изделия можно

производить при температуре 180°C, увеличив дозировку извести на 2 – 3 %.

8. Установлена причина того, что литературные данные о влиянии температуры и продолжительности гидротермальной обработки на образование тоберморита  $11, 3 \text{ \AA}$  и ксонотлита крайне противоречивы. Хотя большинство специалистов считает, что ксонотлит образуется при более высокой температуре, чем тоберморит, последний находят даже в образцах, запаренных при 340 °С.

Это объясняется тем, что тоберморит при нагревании до 200°C превращается в ксонотлит, а при охлаждении цементно-песчаного вяжущего (1:1) последнее переходит в тоберморит. Более 10 – 15 таких переходов вызывают полное разрушение цементного камня.

9. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что поровая структура ячеистых бетонов, изготовленных по ударной и литьевой технологиям, коренным образом отличается друг от друга.

При ударной технологии наблюдается полимодальное распределение пор по размерам: сравнительно крупные поры бетона в них окружены толстыми межпоровыми перегородками, имеющими собственную микропористую структуру. Выдвинута гипотеза о механизме формирования поровой структуры газосиликатных смесей с пониженным В/Т.

10. Установлены закономерности изменения внутреннего и внешнего диаметров межпоровых перегородок поробетонов в зависимости от их усадки, которая зависит от В/Т смеси и геометрических характеристик. Полученные результаты позволяют понять причины высоких физико-механических показателей газосиликатных материалов, производимых по ударной технологии в сравнении с литьевой, где усадки больше, а пластическая прочность связующего ниже.

11. Предложена классификация факторов, влияющих на качество автоклавного газобетона, обоснованы методы регулирования свойств газобетонов.

12. Установлено, что существующие стандартные методы лабораторных испытаний сырья и газобетонов зачастую не учитывают специфику производства и не позволяют адекватно оценить их качество. Разработаны и предложены методики проведения входного, операционного и приемочного видов контроля автоклавных газобетонов.

13. Проведено ранжирование дефектов, возникающих в газобетонных изделиях при их изготовлении, разработаны рекомендации по определению причин, их вызывающих, предложены методы устранения.

14. Разработаны предложения для модернизации существующих технологических линий с целью повышения качества производимых на них газобетонных изделий.

15. Практическая значимость разработок подтверждена патентом и тремя актами о внедрении разработок диссертанта на предприятиях по производству ячеистых бетонов автоклавного твердения: ЗАО "Саянскгазобетон" г. Саянск Иркутской обл, завод стеновых материалов "Поревит", г. Ялуторовск Тюменской обл., ООО «Егорьевский завод строительных материалов», г. Егорьевск, Московской обл. Экономический эффект от внедрения составил 73 млн. руб.

Материалы диссертации используются в учебном процессе в виде авторского курса для строительных специальностей. Автором работы проводятся курсы обучения производственно-управленческого персонала предприятий, занимающихся выпуском автоклавных газобетонов.

### Библиографический список

1. *Левченко В.Н.* НААГ: 5 лет поступательного развития. НПК "Современный автоклавный газобетон" // Краснодар, май 2013, С. 4 – 8.
2. *Левченко В.Н.* Производство автоклавного газобетона в России. История, современность, перспективы. Сб. тр. Научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» / В.Н. Левченко, Г.И. Гринфельд // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 5 – 9.
3. *Рыбьев И.А.* Общая теория единая классификация строительных материалов на основе вяжущих веществ // Строительные материалы №5. – 1950. – С. 29 – 31.
4. *Боженков П.И.* Технология автоклавных материалов // Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1978. – 368 с.
5. *Леонтьев Е.Н.* Роль цементирующего вещества в создании прочности плотного (тяжелого) силикатного бетона: сб. Автоклавные бетоны и изделия на их основе // Л.: ВНИИСТРОМ, 1972. – С. 33 – 45.
6. *Michaelis W.* Verfahren zur Erzergeren von Kunstsandstein. Patentschrift № 14195. Ausgegeben den 2 June 1881.
7. *Виноградов, Б.Н.* Сырье для производства автоклавных силикатных бетонов // М.: Стройиздат, 1966. – 278 с.
8. *Pfeifer J.* Verfahren zur Herstellung von Kunstlichen Sundstein. Patentschrift № 82785. Ausgegeben den 14 Aug. 1895.
9. *Kleber P.* Verfahren zur Kalksandziegel Herzustellen. Patentschrift № 103777. Ausgegeben den 25 Apr. 1899.
10. *Гвоздарев, И.И.* Производство силикатного кирпича / И.П. Гвоздарев // М.: Промиздат, 1951. – 147 с.
11. *Бутт, Ю.М.* Долговечность автоклавных силикатных бетонов / Ю.М. Бутт, К.К. Куатбаев // М.: Стройиздат, 1966. – 266 с.
12. *Кинд В.А.* Строительные материалы, их получение, свойства и применение. / В.А. Кинд, С.Д. Окорочков, под общ. ред. проф. В.А.Кинда //

Л.– М.: НКТП СССР, Государственное научно-техническое изд-во строительной индустрии и судостроения Госстройиздат, 1934. – 684 с.

13. **Саталкин А.В. Высокопрочные автоклавные материалы на основе известково-кремнеземистых вяжущих / А.В. Саталкин, П.Г. Комохов // М.: Стройиздат, 1966. – 237 с.**

14. *Бородянская М.В.* Влияние минералогического состава сырья на физико-механические свойства автоклавных бетонов. Сб. Автоклавные бетоны и изделия на их основе / М.В. Бородянская, П.М. Зильберфарб // Л.: ВНИИСТРОМ, 1972. – С. 20 – 25.

15. *Боженев П.И.* Нефелиновые шламы / П.И. Боженев, В.И. Кавалерова // Л.–М.: Стройиздат, 1966. – 242 с.

16. *Корнилович Ю.Е.* Связующие свойства цементов // Киев, 1952.

17. *Thorwaldson T.* Journ. Amer. Concrete Inst., v. 27, № 7, 1956.

18. *Штейерт Н.П.* Роль заполнителей в формировании прочности автоклавного цементного бетона // Цемент, 1952, №1 – С. 6 – 8.

19. *Аллик А.Р.* О взаимодействии цементного теста и заполнителей / А. Р. Аллик, Т.В. Кузнецова // Сб. трудов ЛИСИ, № 56, 1969.

20. *Куатбаев К.К.* Силикатные бетоны из побочных продуктов промышленности // М.: Стройиздат, 1981. – 246 с.

21. *Ребиндер П.А.* Физико-химические основы производства пенобетонов // Изв. АН СССР. 1937. – ОТН № 4. – С. 362 – 370.

22. *Брюшков А.А.* Пенобетон ПБ ячеистый бетон. Всесоюзное общество рационализаторов строительства: тез. докл. // М.: 1932. – С.14 – 18.

23. *Кауфман Б.Н.* Производство и применение пенобетона в строительстве // М.: Госстройиздат, 1940. – 129 с.

24. *Гензлер М.Н.* Пенобетонщик / М.Н. Гензлер, С.А. Линдеберг // Москва, 1936. – 157с.

25. *Кауфман Б.Н.* Теплопроводность строительных материалов // М.: Стройиздат, 1955. – 160 с.

26. *Кауфман П.Б.* Пенобетон. Подбор состава и основные свойства / П.Б. Кауфман // М.: Госстройиздат, 1951. – 38 с.
27. *Кудряшев И.Т.* Автоклавные ячеистые бетоны и их применение в строительстве / И.Т. Кудряшев // М.: Госстройиздат. – 1940. – 63 с.
28. *Кудряшев И.Т.* Технология автоклавного армопенобетона для покрытий промзданий / И.Т. Кудряшев // Д.: Госстройиздат, 1940. - 108 с.
29. *Кудряшев И.Т.* Заводы по производству изделий из ячеистого бетона / И.Т. Кудряшев, Б.Н. Кауфман, М.Я. Кривицкий, Л.М. Розенфельд // М.: Госстройиздат, 1951. – 29 с.
30. *Кудряшев И.Т.* Ячеистые бетоны / И.Т. Кудряшев, В.П. Куприянов // Госстройиздат, 1959. – 181 с.
31. *Кивисельг Ф.П.* Исследования технологии и свойств сланцезольного пенобетона: автореф. дис. . канд. техн. наук // Таллин, 1958. – 16 с.
32. *Бужевич Г.А.* Лёгкие бетоны на пористых заполнителях // М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
33. *Бужевич Г.А.* Технология и свойства новых видов бетонов на пористых заполнителях. Сб. статей под ред. Бужевича Г.А.; НИИбетона и железобетона // М.: Стройиздат, 1971. – 207 с.
34. *Горайнов К.Э.* Технологии минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов / К.Э. Горайнов, К.Н. Дубеницкий, С.Г. Васильков // М.: Стройиздат, 1976. – 536 с.
35. *Федынин Н.И.* Роль частиц несгоревшего топлива в формировании свойств ячеистого золобетона / Н. И. Федынин // Строительные материалы. – М., 1998. – №9. – С. 21 – 23.
36. *Иванов И.А.* Производство и применение газозолобетонных панелей из шлакопортландцемента и зол электростанций Кузбасса. Материалы 2-й научно-технической конф. по вопросам химии и технологии ячеистых бетонов / И.А. Иванов, Н.И. Федынин // Саратов, 1965. – С.136 – 149.
37. *Кевеш П.Д.* Газобетон на пергидроле / П.Д. Кевеш, Э.Я. Эршлер // М.: Госстройиздат, 1961. – 116 с.

38. *Розенфельд Л.М.* Автоклавный пеношлакобетон / Л.М. Розенфельд // М.: Госстройиздат, 1958. – 96 с.
39. *Кривицкий М.Я.* Заводское изготовление изделий из пенобетона и пеносиликата / М.Я. Кривицкий, Н.С. Волосов // М.: Стройиздат, 1958. – 160 с.
40. *Крашенинников А.Н.* Автоклавный термоизоляционный пенобетон / А.Н. Крашенинников // М.: Госэнергоиздат, 1959. – 236 с.
41. *Жодзинский И.Л.* Крупнопанельные покрытия из ячеистых бетонов / И.Л. Жодзинский, В.В. Макаричев // М.: Стройиздат, 1967. – 144 с.
42. *Силаенков Е.С.* Долговечность изделий из ячеистых бетонов / Е.С. Силаенков // М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.
43. *Фокин К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин // М.: Стройиздат, 1953. – 320 с.
44. *Чудновский А.Ф.* Теплотехнические характеристики дисперсных материалов / А.Ф. Чудновский // М.: Стройиздат, 1962. – 456 с.
45. *Сажнев Н.П.* Производство, свойства и применение ячеистого бетона автоклавного твердения / Н. Сажнев, Н. Шелег // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С. 2 – 6.
46. Малоэтажные дома из ячеистых бетонов. Каталог / Госкомархитектуры. ЛенЗНИИЭП. Л. – 1989. – 67 с.
47. *Семченков А.С.* О корректировке равновесной влажности и теплопроводности ячеистого бетона / А.С. Семченков, Т.А. Ухова, Г.П. Сахаров // Строительные материалы. 2006. №6. – С. 7 – 12.
48. *Чернышев Е.М.* Физико-химическая природа взаимосвязи свойств строительных материалов с их влажностным состоянием. / Е.М. Чернышев, Славчева Г.С. // Academia. Архитектура и строительство. 2008. № 1. – С. 87 – 92.
49. *Ухова Т.А.* Разработка межгосударственных стандартов взамен ГОСТ 21520-89 и ГОСТ25485-89 в части ячеистых бетонов автоклавного

- твердения / Т.А. Ухова, Я.М. Паплавскис, Г.И. Гринфельд, А.А. Вишнеvский // Строительные материалы. 2007. № 4. – С. 2 – 4.
50. Гринфельд Г. Нормативные ограничения, накладываемые на продукцию из ячеистых бетонов, в свете закона «О техническом регулировании» // Популярное бетоноведение. 2007. №2 (16). – С. 19–20.
51. Национальная Ассоциация производителей автоклавного газобетона. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.gazo-beton.org/node/3>. (Дата обращения: 11.2011).
52. Маличенко Г. Возникновение дефектов в газобетоне до его автоклавной обработки. Сб. тр. Научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» / Г. Маличенко, М.В. Кафтаева // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 40 – 46.
53. Фискинд Е.С. Автоклавный ячеистый бетон – экономичный и эффективный материал для строительства любой этажности / Е.С. Фискинд, Т.А. Ухова // Строительные материалы. 2007. №7. – С. 8 – 9.
54. Жуков А.Д. Моделирование и оптимизация технологии газобетона / А.Д. Жуков, А.В. Чугунков, П.К. Гудков // Вестник МГСУ. 2012. №4. – С.155 – 157.
55. Пинскер В.А. Ячеистый бетон как испытанный временем материал для капитального строительства. / В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин // Строительные материалы. 2004. №3. – С. 44 – 45.
56. Магдеев У.Х. Современные технологии производства ячеистого бетона / У.Х. Магдеев, М.Н. Гиндин // Строительные материалы. 2001. – №2. – С. 2 – 5.
57. Чернышев Е.М. Газосиликат – современная гибкая технология материала и изделий / Е.М. Чернышев, А.А. Федин, Н.Д. Потамошнева, Ю.А. Кухтин // Строительные материалы. 2007. №4. – С. 4 – 9.
58. Славчева Г.С. Оценка деформативных свойств поризованных бетонов при длительном действии нагрузки / Г.С. Славчева, М.В. Новиков, Е.М.



- Чернышов // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 3 – 15. – С. 136 – 141.
59. *Славчева Г.С.* Влажностное состояние цементных и силикатных бетонов в связи с их структурой // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 4. – С. 119 – 131.
60. *Попов В.А.* Условия управления кинетическими параметрами синтеза цементирующих веществ силикатных автоклавных материалов / Автореф. дис. канд. техн. наук. – Воронеж, 1994. – 22 с.
61. *Сватовская Л.Б.* Автоклавный золопенобетон / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, Е.В. Русанова, А.В. Хитров, Т.С. Титова, В.Д. Мартынова, В.А. Чернаков // патент на изобретение RUS 2256632. 24.03.2004.
62. *Ботвиньева И. П.* Получение газобетона с высокими эксплуатационными свойствами / И.П. Ботвиньева, Е.В. Умнова, А.Р. Низамутдинов, М.А. Елесин // Вестник гражданских инженеров. 2013. №2. – С 141 – 146.
63. *Демьянова В.С.* Активизация процессов твердения известково-кремнеземистой смеси с цементом и добавками ускорителями / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, В.Н. Вернигорова, Н.М. Дубошина // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1998. – № 1. – С. 35.
64. *Завадский В.Ф.* Новые виды наполнителей для получения ячеистых бетонов // Строительные материалы. 2005. – № 7. – С. 56 – 59.
65. *Коломацкий А.С.* Теплоизоляционный пенобетон / А.С. Коломацкий, С.А. Коломацкий // Строительные материалы. 2002. – № 5. – С. 18 – 19.
66. *Коновалов В.М.* Энергетические затраты при производстве ячеистых бетонов // Строительные материалы. – 2003. – №6. – С.6 – 7.
67. *Володченко А. Н.* Повышение эффективности производства автоклавных материалов / А.Н. Володченко, В.С. Лесовик // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №9. – С. 10 – 16.

68. *Gladkov D.I.* STRENGTH AS AN INTEGRAL CHARACTERISTIC OF CONCRETE / В сборнике: Proceedings of the International Conference on Cement Combinations for Durable Concrete 2005 International Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities. Сер. "Cement Combinations for Durable Concrete - Proceedings of the International Conference" sponsors: Institution of Civil Engineers, American Concrete Institute, Japan Society of Civil Engineers, University of Dundee, UK; editors: Dhir R.K., Harrison T.A., Newlands M.D., University of Dundee, Concrete Technology Unit. Dundee / D.I. Gladkov, L.A. Suleimanova, A.P. Nesterov // Scotland, 2005. p. 701-707.
69. *Паплавскис Я.Н.* Производство ячеисто-бетонных изделий по технологии AEROC // Строительные материалы. 2004. №3. – С. 12 – 13.
70. *Мартыненко В.А.* Производство изделий из автоклавного газобетона на Украине // Строительные материалы. 2008. – №1. – С. 12 – 13.
71. *Большаков В.И.* Увеличение объемов производства с использованием автоклавного газобетона – стратегический курс Украины в строительстве. В сб. науч. трудов «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве» вып. 2. / В.И. Большаков, В.А. Мартыненко // Днепропетровск: ПГАСА, 2005. – С. 13 – 27.
72. *Якимечко Я.Б.* Некоторые особенности использования негашеной извести в ячеистых бетонах // Строительные материалы. 2006. – №6. – С. 26 – 27.
73. *Рахимов Р.А.* Влияние химико-технологических факторов на структурообразование силикатной массы на основе лесса // Строительные материалы. 2008. – №2. – С. 52 – 54.
74. *Kotzan Olaf.* Bildung und reaktion sulfathaltiger fhasen bei der herstel" lung von porenbeton mit zusats von calciumsulfaten // Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg. 1995.
75. *Walk-Lauffer B.* Untersuchung des enflusses von sulfaten auf dassystem  $\text{CaO-SiO}_2\text{-AL}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$  mittels warmeflusskalorimetrie und in-

situneutronenbeugung unter hydrothermalen bedingungen. // Dissertation, Universität Siegen. 2002.

76. *Georg Schober*. Die chemischen Umsetzungen bei der Herstellung von Porenbeton: Aus Zement, Kalk, Gips und Quarzsand wird Porenbeton // Zement-Kalk-Gips International. 2005. – № 7. – P. 63 – 70.

77. *Антипина С.А.* Составы и технология термостойких материалов на основе композиций волластонита с известково-кремнеземистым вяжущим: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Белгород, 2005. – 18 с.

78. *Фомина Е. В.* Особенности твердения композиционных вяжущих в технологии автоклавных ячеистых материалов Автореф. дис. канд. техн. наук. – Белгород, 2005. – 18 с.

79. *Алфимов С.И.* Автоклавные ячеистые бетоны на основе попутно-добываемых песчано-глинистых пород: дис...канд. техн. наук: 05.23.05. – БГТУ, 2007. – 213 с.

80. *Славчева Г.С.* Структура высокотехнологичных бетонов и закономерности проявления их свойств при эксплуатационных влажностных воздействиях. Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Воронеж, 2009. – 40 с.

81. *Подгорный И.И.* Ячеистые композиты автоклавного твердения с использованием наноструктурированного модификатора. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Белгород, 2005. – 18 с.

82. *Охота Б.Г.* Роль НИПСиликатобетона в развитии резательной технологии производства газобетонных изделий автоклавного твердения в СССР 1961 – 1991 гг. В сб. науч. трудов «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве» вып. 2. // Днепропетровск: ПГАСА, 2005. – С. 78 – 81.

83. *Филатов А.Н.* Вопросы производства и применения изделий из ячеистого бетона пониженной плотности. В сб. науч. трудов «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве»

вып. 2. / А.Н. Филатов, Т.И. Вудауд, В.А. Иваненко, В.В. Хомяков, Т.Д. Приходько // Днепропетровск: ПГАСА, 2005. – С. 81 – 89.

84. *Ястребцов В.В.* Вопросы теории резания газобетонов струной методом продавливания. В сб. науч. трудов «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве» вып. 2. // Днепропетровск: ПГАСА, 2005. – С. 96 – 101.

85. *Пинскер В.А.* Российские нормы по проектированию ячеистобетонных конструкций жилых и общественных зданий / *В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин* // сб. статей и докладов на IV Международной конференции «Ячеистые бетоны в современном строительстве», 2007г. Электронный ресурс <http://www.gazo-beton.org/node/95>.

86. *Гринфельд Г.И.* Значимость автоклавного газобетона для рынка стеновых материалов Санкт-Петербурга и области. Роль завода «Аэрок СПб» в удовлетворении и формировании спроса / сб. статей и докладов на IV Международной конференции «Ячеистые бетоны в современном строительстве», 2007г. Электронный ресурс <http://gazo-beton.org/node/93>.

87. *Запоточна Г.* Автоклавный ячеистый бетон в Польше - строительный материал сегодняшнего и завтрашнего дня / сб. статей и докладов на V Международной конференции «Ячеистые бетоны в современном строительстве», Санкт-Петербург, 2008г. Электронный ресурс <http://www.gazo-beton.org/node/97>.

88. *Паплавскис Я. М.* Задачи по совершенствованию нормативов для ячеистого автоклавного бетона нового поколения / сб. статей и докладов на V Международной конференции «Ячеистые бетоны в современном строительстве», Санкт-Петербург, 2008. Электронный ресурс <http://www.gazo-beton.org/node/100>.

89. *Вылегжанин В.П.* Пути повышения прочности и трещиностойкости блоков из автоклавного газобетона, изготавливаемых по разательной технологии / *В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер* // сб. статей и докладов на V

Международной конференции «Ячеистые бетоны в современном строительстве», Санкт-Петербург, 2009. Электронный ресурс <http://gazo-beton.org/node/83>.

90. *Левченко В.Н.* Основные направления деятельности Национальной Ассоциации Производителей Автоклавного Газобетона / Конференция. "Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения", Минск, 26-28 мая 2010. Электронный ресурс <http://gazo-beton.org/node/126>.

91. *Вишневский А.А.* Оптимизация свойств автоклавного газозолобетона пониженной плотности / сб. докл. IV научно-практического семинара. Екатеринбург. 5 декабря 2012 г. // Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 13 – 17.

92. *Шаманов В.А.* Получение автоклавного газобетона из сырья низкого качества / В.А. Шаманов, В.А. Голубев, С.Н. Зомарева, К.В. Полищук / в сб. научных трудов НПК «Современный автоклавный газобетон» // Краснодар, май 2013 – С. 99 – 103.

93. <http://www.74rif.ru/gaz-beton15.html> Академия Конъюнктуры Промышленных Рынков.

94. <http://www.sts54.ru/penobeton/gazobeton.php> *Галкин, С.Л.* зав. отделом ограждающих конструкций УП «Институт БелНИИС» (Республика Беларусь).

95. *Боженков П.И.* Обработка строительных материалов паром высокого давления / П.И. Боженков, Г.Ф. Суворова // Л., 1961. – 79 с.

96. *Галкин С.Л.* Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика / С.Л. Галкин, Н.П. Сажнев // Мн.: Стринко, 2006. – 448 с.

97. *Пинскер В.А.* Пути экономии цемента при производстве ячеистых бетонов / В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин // Строительные материалы, 2008. – №1. – С. 43.

98. ГОСТ 9179 –77 Известь строительная. Технические условия. – М.: Госстандарт. 1981. – 4 с.

99. СН 277–80 Инструкция по изготовлению ячеистого бетона Госстрой СССР, 1980.
100. *Котельников Ю.В.* Состояние и перспективы развития производства извести // *Строительные материалы*, 2001. – №5. – С. 38 – 39.
101. *Кройчук Л.А.* Типы известеобжигательных печей, используемых в странах Европейского союза // *Строительные материалы*. 2009. – № 9. – С.25 – 29.
102. *Бондаренко В.П.* Модернизация одношахтных печей большого диаметра // *Строительные материалы*. 2009. – № 9. – С.32 – 35.
103. *Монастырев А.В.* Магнезиальная и доломитовая известь, ее свойства, получение и применение // *Строительные материалы*. 2009. – № 9. – С.36 – 38.
104. *Липилин А.Б.* Ударный помол как действенное средство снижения себестоимости производства негашеной извести / А.Б. Липилин, М.В. Векслер, Н.В. Коренюгина // *Строительные материалы*. 2009. – № 9. – С.39 – 41.
105. ГОСТ 4013–82 Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия. – М.: Госстандарт. 1981. – 4 с.
106. ГОСТ 125–79 Вяжущие гипсовые. Технические условия. – М.: Госстандарт. 1980. – 6 с.
107. *Куатбаев К.К.* Ячеистые бетоны на малокварцевом сырье / К.К. Куатбаев, П.А. Ройзман // М.: Стройиздат. 1972. – 871 с.
108. *Соболев В.С.* Введение в минералогию силикатов // Львов: ЛГУ, 1949 – 330с.
109. *Аваков В.А.* Сравнительная растворимость некоторых модификаций кремнезема // *Строительные материалы* № 11. – 1972. – С. 35 – 36.
110. *Рамачандран В.* Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн // Стройиздат, 1986. – 278 с.

111. *Бородянская М.В.* Влияние минералогического состава сырья на физико-механические свойства автоклавных бетонов. Сб.: «Автоклавные бетоны и изделия на их основе» / М.В. Бородянская, П.М. Зильберфарб // М., 1972. – С. 56 – 61.
112. ГОСТ 8736–93 Песок для строительных работ. Технические условия. – М.: Госстандарт. 1995. – 20 с.
113. Labormethoden für das Porenbeton-Betriebslabor. // MASA-Henke Maschinenfabrik. 2010. – 82 с.
114. ГОСТ 31360–2007 Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия. МНТКС, 2008. – 9 с.
115. *Хинт И.А.* Основы производства силикальцитных изделий // Госстройиздат // 1962. – 642 с.
116. *Наумов Г.В.* Справочник термодинамических величин / Г.В. Наумов, В.Н. Рыженко, И.Л. Ходаковский // М.: Атомиздат, 1971. – 238 с.
117. *Маракушев Л.А.* Термодинамика метаморфической гидратации / Л.А. Маракушев // М.: Наука, 1968. – 200 с.
118. *Змановский С.В.* Производство современных гидрофильных алюминиевых пудр и паст для газобетона. В сб. тр. Научно-практической конференции «Современный автоклавный газобетон»/ С.В. Змановский, П.Н. Никитин // Краснодар, май 2013. – С. 132 – 139.
119. ГОСТ 5494– 95 Пудра алюминиевая. Технические условия. – М.: Изд-во Стандартов. 1997. – 16 с.
120. *Штикер Г.* Свойства алюминиевых пигментов и их влияние на производство ячеистых бетонов. В сб. тр. Научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 10 – 21.
121. *Стемпень К.* Применение добавок при производстве ячеистого бетона / Сб. тр. Научно-практической конференции «Современный автоклавный газобетон» // Краснодар, май 2013. – С. 119 – 124.

122. ГОСТ 31359–2007 Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия. МНТКС, 2008. – 9 с.
123. ГОСТ 24211–2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. ФГУП ЦПП, 2008. – 19 с.
124. ГОСТ 3476–74 Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов. МНТКС, 1975. – 5 с.
125. ГОСТ 8433–81 Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия. М.: Госстандарт, 1981. – 12 с.
126. ГОСТ 23732–2001 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М. Изд-во Стандартов, 2012. – 20 с.
127. ГОСТ 310.1–76 Цементы. Методы испытаний. Общие положения. – М. Изд-во Стандартов, 1978. – 2 с.
128. ГОСТ 310.2–76 Цементы. Методы определения тонкости помола. – М. Изд-во Стандартов, 1978. – 3 с.
129. ГОСТ 310.3–76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – М. Изд-во Стандартов, 1978. – 8 с.
130. ГОСТ 310.4–81 Цементы. Методы определения предела прочности при сжатии. – М. Изд-во Стандартов, 1983. – 12 с.
131. ГОСТ 22688–77 Известь строительная. Методы испытаний. – М. ИПК Изд-во Стандартов, 1997. – 17 с.
132. ГОСТ 8735–88 Песок для строительных работ. Методы испытаний. – М. Стандартиформ, 2006. – 26 с.
133. ГОСТ 10180–90 Бетоны. Метод определения прочности по контрольным образцам. – М. Стандартиформ, 2006. – 30 с.
134. *Бутт Ю.М.* Твердение вяжущих при повышенных температурах / Ю.М. Бутт, Л.М. Рашкович // М.: Стройиздат, 1965. – 244 с.
135. *Горшков В.С.* Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашов, В.Г. Савельев // М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.



136. *Бабушкин В.И.* Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов – Петросян // М.: Стройиздат, 1986. – 406 с.
137. *Химия цементов* / Под ред. Х. Ф. У. Тейлора. М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 501 с.
138. *Coldrey J. M. and Purton M. J. J. Appl. Chem.* 18, 353 (1968).
139. *Бесси, Дж. Е.* Изделия на основе негидравлических вяжущих, содержащих гидросиликаты кальция / Дж. Е. Беси // *Химия цементов.* – М.: Изд-во Лит-ры по строительству, 1969. – С. 375 – 402.
140. *Пауэрс Т.К.* Физические свойства цементного теста и камня // *Химия цементов.* – М.: Стройиздат, 1969. – С. 300 – 319.
141. *Tagungsband zur Fachtagung am 13 und 14 Oktober 1999 zum Thema Autoklavierung herausgegeben von YTONG Holding AG Entwicklungszentrum Sandhof 6 D-86529 Schrobenhausen* – p. 191.
142. *Маракушев А.А.* Термодинамика метаморфической гидратации минералов // М.: Недра, 1968. – 200 с.
143. *Равдель А.А.* Краткий справочник физико-химических величин / А.А. Равдель, А.М. Пономарева // Л.: Химия, 1983. – 232 с.
144. *Абрамов С.А.* Разработка тампонажного материала для крепления скважин, эксплуатирующихся в условиях циклического теплового воздействия: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Краснодар, 1988. – 26 с.
145. *Эйтель В.* Физическая химия силикатов // М.: Изд-во Иностранной литературы, 1962. – 1056 с.
146. *Кафтаева М.В.* Исследование фазового состава автоклавных ячеистых бетонов / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев, Е.А. Поспелова // *Современные проблемы науки и образования.* 2013. № 5. URL: [www.science-education.ru/111-10053](http://www.science-education.ru/111-10053) (дата опубликования: 10.09.2013).
147. *Сажнев, Н. П.* Производство ячеистобетонных изделий: теория и практика / Н.П. Сажнев [и др.]. – 3-е изд., доп. и перераб. // Минск: Стринко, 2010. – 464 с.

148. *Сажнев, Н.П.* Производство изделий из ячеистых бетонов с применением ударной площадки / Н.П. Сажнев, А.В. Домбровский // Техническая информация ВНИИЭСМ "Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих материалов". – М., 1979. – Вып. 11. – С. 16 – 19.
149. *Рудченко Д.Г.* Технологии энергосбережения и экономии сырьевых материалов в производстве изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения на заводах АЕРОС / Д.Г. Рудченко // Будівельні матеріалі, виробі та санітарна техніка. Наук. – тех. збір. Випуск 32. – 2009 – С. 97 – 102.
150. *Захарченко, П.В.* Конструкционно-теплоизоляционный ячеистый бетон автоклавного твердения плотностью  $300 \text{ кг/м}^3$  / П.В. Захарченко, Н.А. Дюжилова, Д.Г. Рудченко // Будівельні матеріалі, виробі та санітарна техніка. Наук. – тех. збір. Випуск 40. – 2011 – С. 116 – 121.
151. *Захарченко, П.В.* Газобетон автоклавного твердения, модифицированный двуводным гипсом / П.В. Захарченко, Н.О. Щербина, Д.Г. Рудченко, Т.Д. Приходько // Технология бетонов, № 1 – 2. – 2011 – С. 32 – 36.
152. *Рахимбаев Ш.М.* О влиянии формы цементного кольца на его собственные деформации и напряжения / Ш.М. Рахимбаев, М.В. Кафтаева // Строительные материалы № 8. – 2009. – С. 58 – 59.
153. *Итинский В.И.* Пластбетон в гидротехнических сооружениях. / В.И. Итинский, Н.Н. Остер-Волков, И.В. Каменский // Пластическме массы, № 9. – 1962. – С. 66 – 68.
154. *Смирнов Н.Н.* Петрографические исследования в Подмосковном Карбоне. (Центральный район). Труды института минералогии, петрографии и кристаллографии. Вып. 9. // М.: Изд-во Ассоциации НИИ при физ.-мат. факультете МГУ. 1930. – 240 с.
155. *Пономарев И.Ф.* Химия кремния // Техничко-эконом. вести., 1926, т. 6, № 10. – С. 640 – 647.

156. Будников П.П. Химия и технология силикатов // К. 1964. – 610 с.
157. Болквадзе Л.С. Бетоны автоклавного синтеза из новых сырьевых материалов // М. Стройиздат, 1981. – 137 с.
158. Волженский А. В. Водотермическая обработка строительных материалов в автоклавах // Изд. Академии Архитектуры СССР, 1944.
159. Воробьев Х.С. Вяжущие материалы для автоклавных изделий // М.: Стройиздат. 1972.
160. Горяйнов К. Э. Технология минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов / К. Э. Горяйнов, К.Н. Дубенецкий, С.Г. Васильков, Л.Н. Попов // М.: Стройиздат, 1966. – 431 с.
161. Книгина Г.И. Обоснование выбора и применение добавок при производстве силикатных материалов. / Г.И. Книгина, Л.С. Огнетова, В.Г. Гуляев // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. 1986. – №11.– С. 56 – 58.
162. Книгина Г.И. Экспериментальная проверка в заводских условиях влияния тонкости помола песка на свойства газобетона / Г.И. Книгина, Ю.В.Тимаков // Изв. вузов. Архитектура и строительство – 1977. – №12. – С. 61 – 65.
163. Кржеминский С.А. Автоклавная обработка силикатных изделий / С.А. Кржеминский, Н.К. Судина, В.П. Варламов // М.: Стройиздат, 1974. - 256 с.
164. Кривицкий М.Я. Ячеистые бетоны (технология, свойства и конструкции) / М.Я. Кривицкий, Н.У. Левин, В.В. Макаричев // М.: 1972. – 131 с.
165. Ломунов К.Ф. В кН. Методика исследования деформации и кинетики нарастания прочности различных бетонов в процессе тепловой обработки // М. 1961.
166. Миронов С. А. Бетоны автоклавного твердения. / С.А. Миронов, М.Я. Кривицкий, Л.А. Малинина и др. // М.: Стройиздат, 1968. – 279 с.
167. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов. Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко // М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.

168. *Сегалова Е.Е.* Современное физико-химическое представление о процессах твердения минеральных вяжущих веществ / Е.Е. Сегалова, П.А. Ребиндер // *Строительные материалы.* – 1960. – № 1. — С. 21-26.
169. *Саснаускас К.И.* Теплоизоляционные материалы и изделия (плотностью до 200 кг/м<sup>3</sup>) на основе гидросиликатов кальция / К.И. Саснаускас, Р.В. Шяучунас, А.В. Волженский // *Строительные материалы.* – 1987. №8. – С. 23 – 26.
170. *Сегалова Е.Е.* Современное физико-химическое представление о процессах твердения минеральных вяжущих веществ / Е.Е. Сегалова, П.А. Ребиндер // *Строительные материалы.* – 1960. — № 6. — С. 24-30.
171. *Сегалова Е.Е.* Возникновение кристаллизационных структур твердения в условиях развития их прочности / Е.Е. Сегалова, П.А. Ребиндер // *Новое в химии и технологии цемента* // М.: Госстройиздат, 1962. – С. 131 – 137.
172. *Силаенков Е.С.* Долговечность изделий из ячеистых бетонов // М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.
173. *Хавкин Л.М.* Технология силикатного кирпича / Л.М. Хавкин. – М.: Стройиздат, 1982. – 384 с.
174. *Мамонтов С.Д.* А. с. СССР № 311880 Способ производства силикатного кирпича / С.Д. Мамонтов, М.С. Шварцзайд. Бюллетень изобретений № 25. – 19.08.1971.
175. *Le Chatelier H.* Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'academie des sciences, de l'institut de France. 96. – 1883. – p. 1056.
176. *Michaelis W.* The Hardening Process of the Colcoreous Hydraulic Binding Materials. *Kolloid // Zeitschrift.* Dresden. 5. 1909. pp. 9 – 22.
177. *Ambrohn H.* *Tonindustrie – Zeitung.* 33. 1909. pp. 270 – 292.
178. *Rodt V.* *Zement.* 31. – 1942. pp. 8 – 11.
179. *Химия цементов* / Под ред. Х. Ф. У. Тейлора // М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 501 с.

180. *Bogue R.H.* The Chemistry of Portland Cement. // N.Y., Reinhold, 1955, 793 pp., see pp. 137 – 138.
181. *Калоушек Дж.* Реакция гидратации цемента при повышенных температурах / 3-й Международный конгресс по химии цемента // М., 1958. – С. 238 – 266.
182. *Kalousek G.L.* and Adams M. Journal of- the Am. Concr. // Inst. 23, 1953. № 1, p. 77 – 90.
183. *Калоушек Д.Л.* Гидротермальная обработка бетона при высоком давлении. – В кн.: Пятый международный конгресс по химии цемента // М.: Стройиздат, 1973. – С. 48 – 53.
184. *Айлер Р.* Химия кремнезема. Пер. с англ. // М.: Мир, 1982. Ч. 1. – 416 с.
185. *Hedvall J.A.* Zeitschrift fur Elektrochemie und angewandte Physikalische Chemie / *J.A. Hedvall, L. Wikdahl* // 46. 1940. pp. 455 – 458.
186. *Кафтаева М.В.* К вопросу о рациональном применении тепловой обработки бетонов в среде продуктов сгорания природного газа / М.В. Кафтаева, Т.Г. Калачук // Известия ОрелГТУ. Серия Строительство и транспорт. 2007. № 3-15.– С. 123 – 126.
187. *Ахвердов И.Н.* Основы физики бетона // М.: Стройиздат. – 1981. – 465 с.
188. *Елманов Г.Н.* Физическое материаловедение. / Г.Н. Елманов, А.Г. Залужный, В.И. Скрытный, Е.А. Смирнов, В.Н. Яльцев под общ. ред. Б.А. Калина // М.: Изд-во Тровант. – Т.1. – 2007. – 636 с.
- 189.
190. *Чернов А. Н.* О коэффициенте качества ячеистого бетона / А. Н. Чернов // Строительные материалы. — 2005. № 12. – С. 48 – 49.
191. *Feret R.* Технология строительных вяжущих материалов: пер. с фр. под ред. Н.Н. Лямина / R. Feret // СПб.: издание Щепанского, 1902 . – VIII, – 265 с.

192. Powers T.C. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste / T.C. Powers, T.L. Brownyard // J Am Conc Inst 43 (1947) 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993.
193. Powers T.C. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste / T.C. Powers, T.L. Brownyard // PCA Bulletin 22, Portland Cement Association p. 22.
194. Полак А.Ф. Вопросы твердения минеральных вяжущих веществ. / А.Ф. Полак, В.В. Бабков, Е.П. Андреева // Уфа: УГНТУ, 1990. – 122 с.
195. Левин Н.И. Механические свойства блоков из ячеистых бетонов // Н.И. Левин // М.: Госстройиздат, 1960.
196. Технология заполнителей бетона / С. М. Ицкович, Л. Д. Чумаков, Ю. М. Баженов // М.: Высш. шк. 1991. – 271 с.
197. Voznesenskiy V.A. Statisticheskiye resheniya v tekhnologicheskikh zadachakh [Statistical solutions in process tasks] // Kishinev: Kartia Moldoveniaske. 1969. – 232 p.
198. Долотова Р.Г. Определение составов ячеистых бетонов различной плотности при использовании полевошпатово-кварцевых песков методом математического планирования / Р.Г. Долотова, В.И. Верещагин, В.Н. Смиренская // Строительные материалы 2012. – № 12. – С 16 – 19.
199. Бедарев А.А. Возможности компьютерного анализа макроструктуры ячеистого бетона и его практическая реализация // Научно-технический вестник Поволжья. 2010. № 2. – С. 39 – 44.
200. Бедарев А.А. Улучшение свойств газосиликата за счет оптимизации структуры межпоровых перегородок // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. № 3. – С. 75 – 85.
201. Резанов А.А. Вопросы управления процессом порообразования в технологии газосиликата / А.А. Резанов, А.А. Бедарев // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. – № 10. – С. 21 – 28.

202. *Бедарев А.А.* Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона / А.А. Бедаев, Е.И. Шмитько, А.А. Резанов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3 (38). – С. 15 – 23.
203. *Дьяченко Е. И.* Структурные факторы управления вязкостью разрушения и прочностью силикатных автоклавных материалов: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.05. Воронеж: ВГАСА, 1995. – 21 с.
204. *Потамошнева Н.Д.* Гидротермальный синтез цементирующих веществ и технология ячеистобетонных изделий на основе хвостов обогащения железистых кварцитов: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.05. Воронеж: ВГАСА, 1999. – 21 с.
205. *Чернышов Е.М.* Формирование ячеистой пористости строительных материалов как управляемый процесс расширения газового пузырька в вязкой среде с переменными параметрами состояния // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 2-14. – С. 203 – 206.
206. *Золотарева Н.Л.* Устойчивость газовой фазы и структура поризованного бетона / Н.Л. Золотарева, Е.И. Шмитько, Т.Н. Пояркова // Строительные материалы. 2007. – № 4. – С. 20 – 22.
207. *Славчева Г.С.* Управление интенсивностью взаимодействия структур строительных материалов с водяным паром и водой / Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов // Academia. Архитектура и строительство. 2008. № 2. – С. 77 – 83.
208. *Славчева Г.С.* Влажностное состояние цементных и силикатных бетонов в связи с их структурой // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 4. – С. 119 – 131.
209. *Вишневский А.А.* Производство автоклавного газозолобетона пониженной плотности: Современный автоклавный газобетон: сборник докладов науч.-практ. конференции. Краснодар, 15 – 17 мая 2013 г. // Под

редакцией научно - технического совета Национальной Ассоциации Производителей Автоклавного Газобетона. 2013. – С. 106 – 109.

210. *Штрототте О.* Производство минерального теплоизоляционного строительного материала низкой плотности. Современный автоклавный газобетон: сборник докладов науч.-практ. конференции. Краснодар, 15 – 17 мая 2013 г. / О. Штрототте, М. Кларе, А.К. Иванов // Под редакцией научно-технического совета Национальной Ассоциации Производителей Автоклавного Газобетона. 2013. – С. 140 – 146.

211. *Кафтаева М.В.* Теория и практика ячеистых бетонов автоклавного твердения / М.В. Кафтаева, Г. Маличенко, О.А. Скороходова // Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – 192 с.

212. *Eviel E.* Влияние сульфатов на твердение силикатных материалов // *Cemento*, 1993, 90. – р. 101 – 111.

213. *Волженский А.В.* Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А.В. Волженский, И.А. Иванов, Б.Н. Виноградов // М.: Стройиздат, 1984. – 255.

214. *Гринфельд Г. И.* Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации / Г.И. Гринфельд, С.А. Морозов, И.А. Согомоян, П.С. Зырянов // Инженерно – строительный журнал . 2011. № 2 (20). – С . 33 – 38.

215. *Крайнов Д. В.* Влияние влагосодержания на теплозащитные свойства ограждающей конструкции из ячеистого бетона / Д.В. Крайнов, Р.А. Садыков // Вестник МГСУ . 2011. № 3. Т.1. – С. 404 – 410.

216. *Ватин Н.И.* Влажностный режим стеновой ограждающей конструкции, выполненной из газобетонных блоков автоклавного твердения с облицовочным слоем из лицевого силикатного кирпича. Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции / под науч. ред. Н.И. Ватина. / Н.И.



Ватин, А.С. Горшков, Г.И. Гринфельд, И.И. Пестряков // СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – С. 56 – 70.

217. СНиП II–3–79\* Строительная теплотехника.

218. ГОСТ 12730.2–78 Бетоны. Методы определения влажности.

219. ГОСТ 7076 – 99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.

220. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.

221. HESS AAC SYSTEMS Оборудование и заводы по производству автоклавного газобетона // Изд-во Hess AAC Systems, 2010. – 32 с.

222. *Иванов А.К.* Опыт фирмы «Маза-Хенке Maschinenfabrik ГмбХ» в производстве газобетонных блоков, а также армированных элементов и панелей / Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Минск, 26-28 мая 2010 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. // Мн.: Стринко, 2010. — С. 11 – 15.

223. *Бонеманн Клаус.* Домостроительные комбинаты Wehrhahn: производство блоков и модульных элементов из газобетона, а также фиброцементных листов для возведения современных энергосберегающих зданий / Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Минск, 26-28 мая 2010 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. // Мн.: Стринко, 2010. — С. 15 – 20.

224. *Антонов А.* Модернизация и реконструкция линии по производству автоклавного газобетона типа Nebel и Универсал / Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Минск, 26-28 мая 2010 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. // Мн.: Стринко, 2010. — С. 21 – 25.

225. *Поликарпов С.К.* Автоклавы Luoyang Longhua Heat Transfer Technology Co., LTD / Сб. тр. научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 165 – 173.
226. WENRHAN: высокотехнологичные линии для производства строительных материалов. Сб. тр. научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 159 – 162.
227. Надежное оборудование WKB – высокое качество вашей продукции / Сб. тр. Научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Краснодар, май 2013. – С. 125 – 131.
228. CHINA YIANBIAN KANGRUN ECONOMIC & TRADE CO., LTD – JIANGSU TEEYER (SHANGHAI) CO.LTD / Сб. тр. научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 145 – 147.
229. *Вишневский А. А.* Использование конденсата, образующегося при автоклавировании ячеистого бетона. Сб. тр. Научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» / А. А. Вишневский, А.Ю. Лялин // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 26 – 29.
230. *Кафтаева М.В.* Регулирование свойств мелкозернистых бетонов с пониженным содержанием воды: автореф. дисс. канд. техн. наук. Белгород: БелГТАСМ, 2000. – 16 с.
231. *Кафтаева М.В.* Мелкозернистые бетоны. Способы регулирования свойств [монография] // Федеральное агентство по образованию, Белгородский гос. технологический ун-т им. В. Г. Шухова. Белгород, 2007. – 160 с.
232. *Сахаров, Г.П.* К вопросу о стабильности качества продукции заводов автоклавного ячеистого бетона / Г.П. Сахаров, С.Д. Лаповская, Т.Н. Волошина // Технологии бетонов. – 2011. – № 3 – 4 (56 – 57). – С.20 – 21.

233. *Долотова Р.Г.* Неавтоклавные ячеистые бетоны с использованием природного и техногенного низкокремнеземистого сырья: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.11 – Томск. 2006. – 20 с.
234. *Алтынник Н.И.* Газобетон автоклавного твердения с использованием наноструктурированного модификатора: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.05. – Белгород: БГТУ, 2013. – 18 с.
235. *Захарченко П.В.* Адаптация литьевой технологии производства газобетона к возможностям сырьевой базы Украины / П.В. Захарченко, Н.А. Щербина, Д.Г. Рудченко, Н.А. Пивень, М.С. Сеница, Г.В. Сеземан / Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Минск, 26 – 28 мая 2010 // Мн.: Стринко, 2010. – С. 37 – 46.
236. *Морозова Н.В.* Теоретические предпосылки предварительной выдержки газобетонного массива перед автоклавной обработкой / Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Минск, 26 – 28 мая 2010 // Мн.: Стринко, 2010. – С.46 – 51.
237. *Huang X.* Novel hydrothermal synthesis of tobermorite fibers using Ca(II)-EDTA complex precursor / X. Huang, D. Jiang, S. Tan // Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, no. 1, 2003. – pp. 123 – 126.
238. *Акатьева Л.В.* Синтез и физико-химические свойства ксонотлита и волластонита: диссертация ... канд. техн. наук: 02.00.01 – 2003. – 238 с.
239. *Овчаренко Г.И.* Фазовый состав и прочность силикатного камня из известково-зольных масс на основе кислой золы ТЭЦ. / Г.И. Овчаренко, Д.И. Гильмияров // Ползуновский вестник №1/2. – 2012. – С. 83 – 88.
240. *Вольф А.В.* Влияние фазового состава цементирующей связки на свойства автоклавного газозолобетона: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.17.11. – Томск, 2008. – 20 с.

241. *Кафтаева М.В.* Влияние температуры и добавок на состав связующих и свойства силикатных материалов. / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев // *Фундаментальные исследования.* № 10 (2). – 2013. – С. 266 – 269.
242. *Кафтаева М.В.* К вопросу о фазовом составе гидросиликатного связующего автоклавного газобетона. / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* № 10 (3). – 2013. – С. 370 – 372.
243. *Кафтаева М.В.* Термодинамический расчет сравнительной гидратационной активности силикатных компонентов газобетонов автоклавного твердения / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев, О.Н. Шарапов // *Современные проблемы науки и образования.* № 1. – 2014.
244. Ячеистый бетон и его недостатки [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://opalubka-info.ru/nedostatki\\_gazobetona.html](http://opalubka-info.ru/nedostatki_gazobetona.html) (дата обращения 12. 12. 2013).
245. *Федин А.А.* Совершенствование технологии и устранение брака в производстве газосиликатных изделий / А.А. Федин, Е.М. Чернышов // *Строительные материалы.* 1962. No 4.С. 25-28.
246. *Борисова В.В.* Перечень минеральных видов Кольского полуострова / В.В. Борисова, А.В. Волошин // *Апатиты: К&М.* 2010. – 64 с.
247. *Рахимбаев Ш.М.* К вопросу о механизме сульфоалюминатной коррозии цементов. *Известия АН СССР. Неорганические материалы* // М., 1969. Т V. – С. 406 – 407.
248. *Мечай А.А.* Сульфоалюминатный модификатор для получения высокопрочного теплоизоляционного ячеистого бетона / А.А. Мечай, Е.И. Барановская Сб докладов III Международного научно-практического семинара «Теория и практика применения ячеистого бетона в строительстве» // Севастополь. – 2007. – С. 124 – 130.
249. *Трунилова Д.С.* Особенности твердения ангидрита в присутствии извести и асбеста / Д.С. Трунилова, М.С. Гаркави, С.С. Шленкина //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. № 15 (191). – С. 54 – 55.

250. *Вишневский А.А.* Оптимизация свойств автоклавного газозолобетона пониженной плотности: Применение изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения. Сб. докл. IV научно-практ. Семинара. Екатеринбург, 5 декабря 2012. / под общ ред. Ф.Л. Капустина // Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 13 –17.

251. *Бочерова Л.И.* Влияние природного гипса на производство и свойства автоклавного газобетона / Сб. тр. научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Краснодар, май 2013. – С. 104 – 106.

252. *Полак А.* Основы моделирования коррозии железобетона // Уфа: Изд-во Уфимск. нефт. ин-та, 1986. – 69 с.

253. *Москвин В. М.* Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гужев // М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

254. *Clark, L.* Thaumacite form of sulfate attack // Concrete International. Vol. 22, № 2, February 1999. p. 37–40.

255. *Colleparidi M.* Damage by Delayed Ettringite Formation – A Holistic Approach and New Hypothesis // Concrete International. Vol. 21, № 1, January 1999. p. 69 – 74.

256. *Штарк Й.* Является ли этtringит причиной разрушения бетона? / Й. Штарк, К. Больманн, К. Зайфарт // Цемент и его применение. 1998, № 2. – С. 13 – 22.

257. *Керн Р.* Основы термодинамики для минералогов, петрографов и геологов / Р. Керн, А. Вайсброд // М.: Мир, 1966. – 276 с.

258. *Базанов С.Н.* Система этtringит – таумасит: отличительные черты разрушения бетона / С. Базанов, М. Торопова // Популярное бетоноведение. – 2005. – № 5. – С. 111 – 119.

259. *Базанов С. М.* Механизм разрушения бетона при воздействии сульфатов // *Строительные материалы*. 2004, № 9. – С. 46–48.
260. *Кафтаева М.В.* О влиянии первичного и вторичного этtringита на качество автоклавного газобетона / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев // *Строительные материалы*. № 7. – 2013. – С. 45 – 47.
261. *Строкова В.В.* Влияние генетических особенностей кварца на синтез новообразований в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.05. – Москва, 1997. – 22 с.
262. *Кафтаева М.В.* Особенности производства энергоэффективных материалов автоклавного твердения для ограждающих конструкций. Сб. науч. трудов «Энергосбережение и экология в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве городов: междунар. науч.-практ. конф. / М.В. Кафтаева, Г. Маличенко // Белгор. гос. технол. ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – С. 192 – 196.
263. *Сулейманова Л.А.* К вопросу о подборе газообразователей для изготовления ячеистобетонных изделий / Л.А. Сулейманова, К.А. Кара, И.Е. Красникова, О.А. Скороходова // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. – № 1. – С. 20-23.
264. *Прохоров С.Б.* Рынок специализированных газообразователей в России. Критерии качества специализированных газообразователей. Сб. тр. научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Краснодар, май 2013. – С. 148 – 151.
265. *Рудченко Д.Г.* Некоторые пути повышения качества, энергосбережения и экономии сырьевых материалов на заводах АЕРОК. Материалы VI между. науч.-практ. конф. Сб. докладов «Ячеистые бетоны в современном строительстве // Санкт-Петербург. 7 – 9 сентября 2009. – С. 36 – 42.
266. *Кузнецов А.Н.* Мероприятия, направленные на энергоресурсосбережение при производстве автоклавного газобетона. Сб.

- тр. Научно-практической конференции «Современное производство автоклавного газобетона» // Санкт-Петербург, ноябрь 2011. – С. 60 – 64.
267. *Шмитько Е. И.* Управление процессами твердения бетона в свете решения проблем энергосбережения // Строительные материалы . – 1992. – № 11. – С. 7–11.
268. *Эйнре А. Х.* Возможности уменьшения расхода тепловой энергии при производстве газобетона // Строительные материалы . – 1996. – № 2. – С. 22 – 23.
269. *Ребиндер П.А.* К оптимизации технологии производства конструкций из ячеистых бетонов: в кн.: Ячеистые бетоны / П.А. Ребиндер, В.А. Пинскер // Л.: ЛенЗН ИИЭП, Госражданстрой. 1968. – С. 3 – 19.
270. *Чернышов Е.М.* Управление процессами структурообразования и качеством силикатных автоклавных материалов (вопросы методологии, структурное материаловедение, инженерно-технологические задачи): Автореф. дисс. д-ра техн. наук.: Л., 1988. – 45 с.
271. *Золотарева Н.Л.* Зависимость свойств пены газонаполненных строительных систем от технологических факторов / *Н.Л. Золотарева, Е.И. Шмитько, Т.Н. Пояркова* // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 3. – С. 56 – 60.
272. *Мартыненко В.А.* Влияние технологических и энергетических параметров газобетонных изделий на энергозатраты при автоклавной обработке / Строительство, материаловедение, машиностроение серия «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве»: Сб. науч. трудов. Вып. 4. // Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – С. 22 – 26.
273. *Рудченко Д.Г.* Технологии энергосбережения в производстве газобетона [http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=5697](http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5697) (дата обращения 20.12.2013.)

274. *Кафтаева М.В.* Энергосбережение при производстве автоклавных стеновых изделий для ограждающих конструкций зданий / М.В. Кафтаева, О.Н. Шарапов, М.А. Шугаева, И.Ш. Рахимбаев // Современные проблемы науки и образования.– 2013. – № 6. URL: [www.science-education.ru/113-10607](http://www.science-education.ru/113-10607) (дата опубликования: 03.11.2013).
275. *Kaftaewa M.W.* Die Wärmeentwicklung bei der Synthese wasserhaltigen Silikatverbindung des Porenbetons / M.W. Kaftaewa, I.Sch. Rahimbaev // Zement, Kalk, Gips (FRG) / № 12. – 2013.
276. Электронный ресурс <http://www.ami-system.ru/files/about.pdf> / Современная система управления организациями / Компания «АМИ-Систем», 2012.
277. *Тейлор Ф.* Принципы научной организации труда [монография] <http://www.improvement.ru/bibliot/taylor/index.shtm> (дата обращения 20.12.2013)
278. *Шелдрейк Дж.* Теория Менеджмента. От тейлоризма до японизации // С-П.: Питер, 2001. – 352 с.
279. *Голдратт Э.М.* Цель: процесс непрерывного совершенствования // К.: Изд-во: Попурри, 2009. – 496 с.
280. *Акулова И.И.* Оптимизация системы организационно-технических мероприятий в антикризисном управлении предприятием строительной индустрии / И.И. Акулова, Е.М. Чернышов, А.Я. Аснина, И.Е. Гельбанд // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 10. – С. 44 – 48.
281. *Егоршин А.П.* Управление персоналом // Н.Новгород.: НИМБ, 2001. – 720 с.
282. *Савицкая Г.В.* Анализ хозяйственной деятельности предприятия: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. // М.: Инфра-М, 2009. – 536 с.
283. *Джеффри К. Лайкер* Дао Toyota. 14 принципов менеджмента ведущей компании мира // К.: Изд-во: Альпина 2013. – 402 с.



284. *Масааки Имаи*. Кайдзен. Ключ к успеху японских компаний // К.: Изд-во: Альпина 2013. – 280 с.
285. *Буткевич Г.Р.* Проблемы вовлечения отходов горнодобывающего производства в хозяйственную деятельность // Строительные материалы. 2013. № 7. – С. 62 – 65.
286. *Чернышев Е.М.* Изготовление силикатных автоклавных материалов с использованием отходов обогащения железистых кварцитов КМА. / Е.М. Чернышев, Н.Д. Потамошнева // Строительные материалы. 1992. № 11. – С. 4.
287. *Володченко А.Н.* Влияние песчано-глинистых пород на оптимизацию микроструктуры автоклавных силикатных материалов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2012 : материалы междунар. науч.-практ. Интернет-конф. 2012. –URL: [www.sworld.com.ua/konfer29/91.pdf](http://www.sworld.com.ua/konfer29/91.pdf). 10.04.2013).
288. *Логанина В.И.* Реологические свойства известковых составов с применением наполнителей на основе силикатов кальция / В.И. Логанина, Л.В. Маркова, К.А. Папшева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 1. С. 6-9.
289. *Вернигорова В.Н.* Закономерности структурообразования известковых композиций с применением наполнителей на основе гидросиликатов кальция / В.Н. Вернигорова, В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Ю.А. Мокрушина // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 11 – 12. – С. 26 – 31.
290. *Володченко А.Н.* Автоклавные ячеистые бетоны на основе магнезиальных глин / А.Н. Володченко, В.С. Лесовик // Известия вузов. Строительство. 2012. № 5. – С. 14 – 21.
291. *Канаев А.Ю.* Пеносиликат, модифицированный железоксидными промышленными отходами / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Известия вузов. Строительство. 2012. № 7 – 8. – С. 27 – 31.

292. *Мармандян В.З.* Новые комплексы для переработки строительных отходов / В.З. Мармандян, В.А. Арсентьев, С.В. Казаков // *Строительные материалы.* 2005. № 10. – С. 66 – 69.
293. *Далатказин А.А.* Отсевы дробления: проблема, требующая решения // *Строительные материалы.* 2006. № 8 – С. 28 – 29.
294. *Лесовик В.С.* Ячеистый бетон с использованием попутнодобываемых пород архангельской алмазоносной провинции / В.С. Лесовик, А.Н. Володченко, С.И. Алфимов, Р.В. Жуков, В.К. Гаранин // *Известия вузов. Строительство.* 2007. №2. – С. 13 – 18.
295. *Долотова Р.Г.* Оценка активности низкокремнеземистого сырья и его пригодности в качестве заполнителя ячеистого бетона. Р.Г. Долотова, В.Н. Смиренская, В.И. Верещагин // *Строительные материалы.* 2008. №1. – С 40 – 42.
296. *Строкова В.В.* Фазообразование в системе цемент – известь – кремнезем в гидротермальных условиях с использованием наноструктурированного модификатора / В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, Н.И. Алтынник, И.В. Жерновский, Е.Г. Осадчий // *Строительные материалы.* 2013. № 9. – С. 30 – 33.



## Продолжение приложения А

29.10.13 3 смлс

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Воронежская область г.Россошь

Общество с ограниченной ответственностью «Придонхимстрой Известь»

396657, Воронежская область, г. Россошь, ул. Промышленная, 14

Тел. (47396) 2 - 63 - 78, 5 - 18 - 99

Факс (47396) 5 - 18 - 91

E-mail: [phsi@vsi.rosizvest.ru](mailto:phsi@vsi.rosizvest.ru)Сайт: [www.rosizvest.ru](http://www.rosizvest.ru)ПАСПОРТ № 55  
ИЗВЕСТЬ НЕГАШЕНАЯ

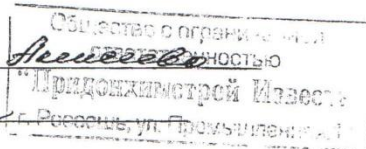
ГОСТ 9179 - 77

Адрес потребителя \_\_\_\_\_  
Партия 26  
Масса партии 2000гг. РоссошьДата отгрузки 29.10.13  
Вагон № 90293614

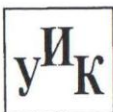
## ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

№	Наименование показателей	Норма по ГОСТ			Данные аналит. контроля
		I сорт	II сорт	III сорт	
1	Активные СаО+MgO (%)	90	80	70	84,5
2	Активные MgO (%)	5	5	5	0,8
3	CO <sub>2</sub> (%)	3	5	7	3,3
4	Остаток на сите 02/008 (%)	1,5/15	1,5/15	1,5/15	0,62/9,8
5	Температура гашения (°C)				88°
6	Время гашения (мин.)				3'
7	Равномерность изменения объема				не определено
8	Удельная эффективная активность радионуклидов Бк/кг				30,7

Гарантийный срок хранения извести – 30 суток со дня её отгрузки

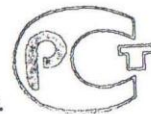
Заключение ОТК: Продукт соответствует ГОСТ 9179 - 77Сорт IIНачальник ОТК В.В. АкимовЛаборант Генит

## Продолжение приложения А



Открытое акционерное общество  
«Угловский известковый комбинат»

174360, Новгородская обл., Окуловский р-он, п. Угловка, ул. Спортивная, д. 2.  
ИНН 5311001214, ОКПО 05292757  
т. (816-57) 26-235, 26-187, т./факс 26-580, 26-225, 26-589.



22.10.13 01100011

## ПАСПОРТ КАЧЕСТВА

от 16 10 13 г. № 3478

на известь строительную и технологическую порошкообразную без добавок, отгруженную в ж. д. вагоне  
№ 53365540

Станция отправления УГЛОВКА

Потребитель ООО «Боровский ЗСМ»

Станция назначения Боровск

Партия 431 Масса партии 65,5 т.

Классификация: воздушная, кальциевая, негашеная

Содержание активных  $\text{CaO} + \text{MgO}$  78,48 % Сор III

Содержание  $\text{MgO}$  2,10 % Содержание  $\text{CO}_2$  4,0 %

Непогасившиеся зера - % Содержание гидратной воды 1,10 %

Время гашения 26 мин. Температура гашения 94 °

Тонкость помола - остаток частиц на ситах с сеткой: № 02 0 %

№ 008 6,14 %

ГОСТ 9179-77

Лаборант ОТК Никлаева

ОАО «Боровнская типография»

## Приложение Б

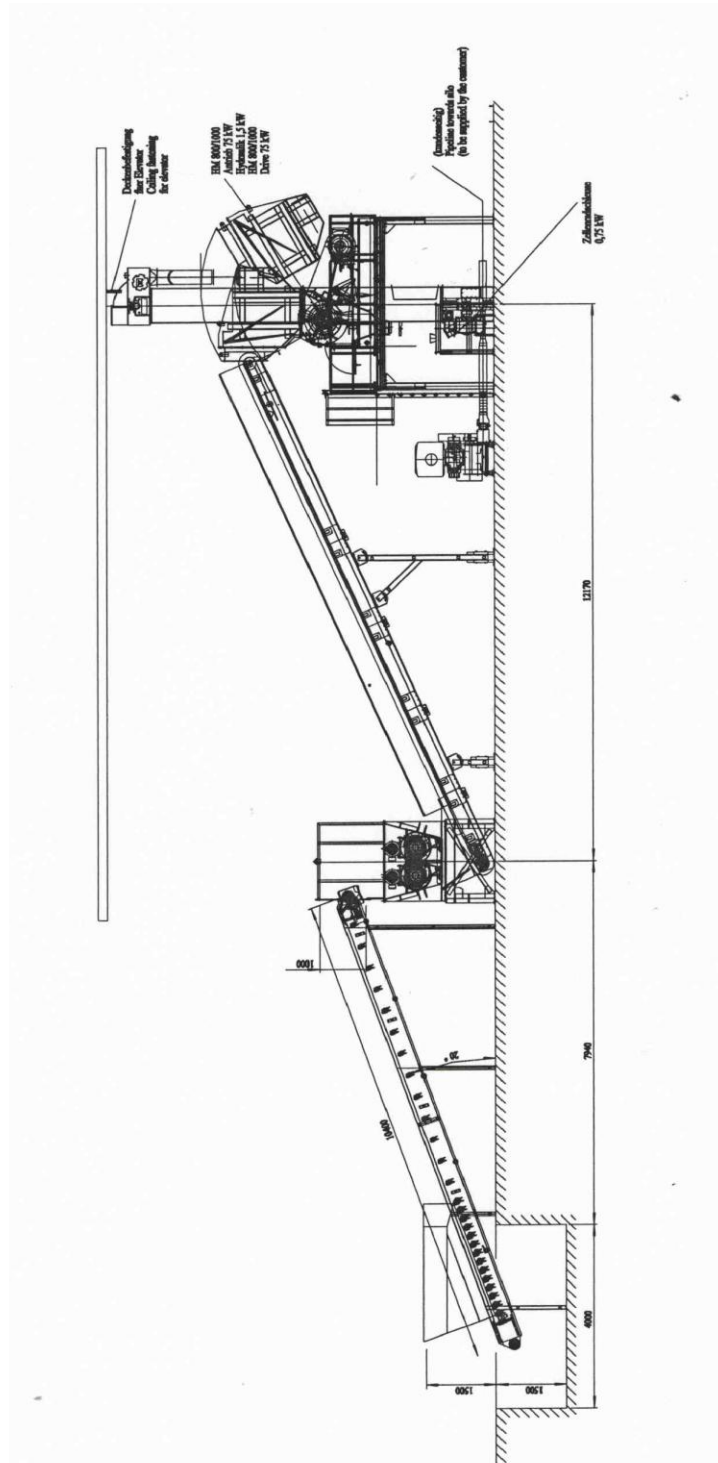
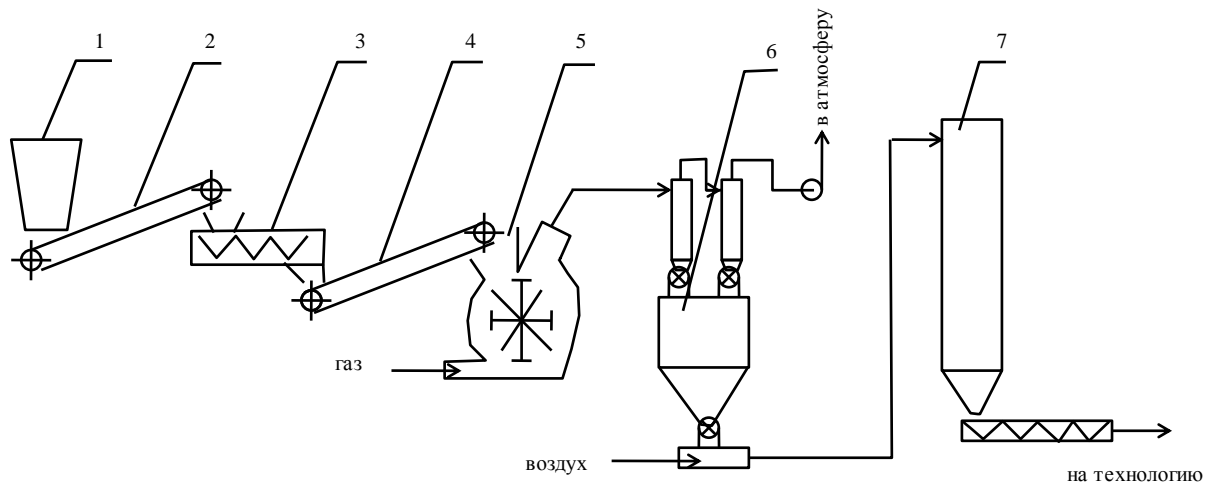


Рис. А-1 – Технологическая схема линии по переработке газобетонов  
фирмы МАЗА-ХЕНКЕ

Технологическая схема  
установки по переработке отходов газобетона



- 1 - Приемный бункер отходов газобетона
- 2, 4 - Ленточные конвейеры
- 3 - Шнековая дробилка
- 5 - Молотковая вентилируемая мельница
- 6 - Комплект аспирации для разгрузки мельницы
- 7 - Силос №5

Рис. Б-2 – Предлагаемая автором технологическая линия по переработке газобетона, работающая на отечественном оборудовании



## Приложение В

УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор

ЗАО «КСМ»



Д.В. Шевчук,

11.ноября 2013г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен комиссией в составе:  
от ЗАО «Комбинат строительных материалов»

главный технолог – А.И. Бирюков,

технолог – И.В.Курманова,

нач. лаборатории – О.Р. Черкасова,

от Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова канд. техн. наук, доцент Кафтаева М.В. в том, что на заводе по производству ячеистых бетонов автоклавного твердения внедрены научные разработки автором которых является канд. техн. наук, доцент Кафтаева М.В.

Разработки заключаются в том, что:

по методикам автора проведена корректировка системы организации производства, позволившая с июля 2010 года повысить объем выпуска продукции предприятия;

подобраны и откорректированы составы ячеистых бетонов автоклавного твердения марок по средней плотности D 600, D 500, D 400 для получения бетонов с заданными свойствами;

проведено обучение линейного и технологического персонала способам регулирования свойств газобетонных смесей;

составлены рекомендации с указанием контрольных значений параметров по всем технологическим переделам;

произведен оптимальный подбор кремнеземистого компонента оптимальной гранулометрии, состоящего из двух видов песка: Тихвинского и



произведен оптимальный подбор кремнеземистого компонента оптимальной granulometрии, состоящего из двух видов песка: Тихвинского и Андреевского месторождений, расположенных в Тюменской обл. в соотношении 60 : 40 % соответственно.

ЗАО «КСМ» принял разработки к внедрению с июля 2010 года, при этом, против применяемых до начала внедрения составов средняя экономия цемента составляет 12 кг/м<sup>3</sup>, извести – 5 кг/м<sup>3</sup>, гипса – 5,5 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, годовой экономический эффект от внедрения разработки, при производстве 242 000 м<sup>3</sup> газобетона в год, составил :

10 454 400 руб + 8 954 000 руб + 3 141 160 руб = 22 549 560 руб/год.

Главный технолог \_\_\_\_\_  А.И. Бирюков  
 Технолог \_\_\_\_\_  И.В. Курманова  
 Нач. лаборатории \_\_\_\_\_  О.Р. Черкасова  
 Автор разработки \_\_\_\_\_  М.В. Кафтаева

## Продолжение приложения В



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

от ЗАО "Саянскгазобетон": главный инженер – П.И. Сапегин,  
главный технолог – А.Г. Бояркин,  
нач. лаборатории – Е.П. Попретинская,

от Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова канд. техн. наук, доцент Кафтаева М.В. в том, что на заводе по производству ячеистых бетонов автоклавного твердения внедрена научная разработка автором которой является Кафтаева М.В.

Разработка заключается в том, что по методикам автора разработаны составы ячеистых бетонов автоклавного твердения с заданными свойствами и проведено обучение линейного и технологического персонала способам регулирования их свойств.

Сырьевые материалы для производства:

Цемент  
известь  
песок  
алюминиевая паста

ЗАО "Саянскгазобетон" принял к внедрению новые составы с 10.11.2012, при этом, против применяемых до начала внедрения составов экономия цемента составляет  $10 \text{ кг/м}^3$ , извести –  $5 \text{ кг/м}^3$ , гипса –  $3,5 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, условный годовой экономический эффект от внедрения разработки, при производстве  $540 \text{ м}^3/\text{сут}$ , составляет  $9\,321\,100 \text{ руб.} + 5\,645\,798 \text{ руб.} + 1\,890\,230 \text{ руб.} = 16\,857\,128 \text{ руб/год}$ .

Главный инженер П.И. Сапегин П.И. Сапегин

Главный технолог А.Г. Бояркин А.Г. Бояркин

Нач. лаборатории Е.П. Попретинская Е.П. Попретинская

Автор разработки М.В. Кафтаева М.В. Кафтаева