

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
высшего образования  
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Акимов Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА ЯЧЕИСТОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО  
БЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО  
АКТИВНЫМИ МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

член-корреспондент РААСН,  
доктор технических наук,  
профессор  
Алюян Роберт Мишаевич

Иваново – 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ.....	11
1.1. Сущность и назначение ячеисто-заполненных бетонов.....	11
1.2. История возникновения ячеистых бетонов автоклавного твердения .....	15
1.3. Направления в развитии технологии производства газосиликата.....	22
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ .....	29
2.1. Современные требования к газосиликату.....	29
2.2. Характеристики применяемого сырья и материалов.....	41
2.3. Методика исследования.....	50
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЕЖПОРОВОЙ ПЕРЕГОРОДКИ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА.....	56
3.1. Модификация известково-кремнеземистого вяжущего активными минеральными добавками .....	57
3.2. Дисперсное армирование газосиликата волокнами.....	66
3.3. Оптимизация состава ячеистого фибробетона с добавками модификаторами .....	80
ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТА .....	86
4.1. Теоретическое обоснования физико-химических процессов автоклавного синтеза низкоосновных гидросиликатов кальция.....	86
4.2. Рентгеноструктурные исследования качественного и количественного состава межпоровой перегородки газосиликата .....	92
4.3. Порометрические и структурные особенности композита и их влияние на физико-механические свойства ячеистого бетона.....	107
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОБЕТОНА.....	118
5.1. Физико-механические характеристики газосиликата.....	118
5.2. Теплотехнические характеристики газосиликата .....	120
5.3. Эксплуатационные характеристики газосиликата .....	122
ВЫВОДЫ.....	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	129
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	144

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы исследований.** Темпы строительства жилья в Российской Федерации постоянно возрастают. Начиная с 2000 г. в России наблюдается устойчивая тенденция увеличения объемов строительства жилья. По данным Федеральной службы государственной статистики (ФСГС) в 2015 г. объем ввода жилья в 2015 году составил 85,35 млн. квадратных метров, а в Ивановской области 260,2 тыс. квадратных метров, что на 3 % превышает значение показателя 2014 года.

Бурное развитие строительной отрасли подстегнуло стремительное развитие строительной индустрии. Главным трендом стройиндустрии в последние годы стало появление современных, в том числе импортных технологических комплексов, позволяющих существенно расширить номенклатуру выпускаемых строительных материалов и значительно улучшить их качество, как с точки зрения внешнего вида, так и основных свойств.

Одним из наиболее активно развивающихся секторов отрасли строительных материалов в России стало производство автоклавного газобетона (АГБ). В последние годы в данном направлении в большом количестве вводятся в эксплуатацию новые заводы, модернизируются существующие производства, увеличиваются объемы выпуска, улучшаются свойства и повышается эффективность производимой продукции. Как результат, популярность АГБ возрастает, что сказывается на увеличении объемов его использования в строительстве. Согласно официальной статистике в 2013 г. ячеистый бетон стал основным стеновым материалом в России. Объемы его производства чуть превысили объемы изготовления керамических стеновых материалов.

По данным Национальной Ассоциации производителей автоклавного газобетона (НААГ) в России существует 70 заводов по производству АГБ с

общей установленной мощностью 15 455 300 м<sup>3</sup>/год [1]. Главным образом эти мощности были представлены импортными технологическими комплексами – 82,2%, поставленными в Россию в последние 10 лет.

Мощности по производству АГБ в России увеличивались на протяжении всех последних лет. Пик ввода мощностей был зафиксирован в 2012 г., когда было сдано в эксплуатацию 6 заводов с общей производительностью 1 939 000 м<sup>3</sup>/год [2.]. С 2013 г. запуск новых производств несколько замедлился, но это не следует рассматривать как тенденцию, связанную с насыщением рынка. Согласно озвученным планам, ввод мощностей по выпуску АГБ в последующие 3-5 лет продолжится.

В России в подавляющем количестве выпускают стеновые блоки. На долю армированных изделий по результатам 2013 г. приходится менее 1% от общего выпуска АГБ [1]. Отмечается некоторое снижение доли выпуска стеновых панелей из АГБ для крупнопанельных домов. При этом доля производства армированных перемычек и плит перекрытия незначительно увеличилась.

Согласно исследованиям НААГ, изделия из АГБ выпускаются с плотностью 200-800 кг/м<sup>3</sup>. Основной объем газобетона (90%) представлен марками D500 и D600. Доля теплоэффективного АГБ марки D400 составляет 8,8% от общего выпуска. Уже больше половины российских заводов (35) предлагают своим клиентам продукцию с плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>.

На заводах с импортными линиями выпускаются более легкие изделия, чем на предприятиях с отечественным оборудованием. Это связано с тем, что импортные комплексы предоставляют большую возможность для выпуска изделий пониженной плотности за счет точной дозировки компонентов, интенсивного смешивания, наличия закрытых зон твердения, автоклавирования при повышенном давлении и др.. Усредненный показатель плотности всего газобетона, выпущенного в России составляет 518,4 кг/м<sup>3</sup>. [2], а на момент распада СССР изделия из АГБ выпускались со средней плотностью 643 кг/м<sup>3</sup> [3]. Таким образом, направленность рынка в сторону

снижения плотности производимого АГБ с целью повышения его теплоэффективности и сокращения цены сохраняется и в настоящее время.

Если сравнивать данные о производстве АГБ в России с данными ближайших соседей, то можно отметить, что Россия является лидером как по числу заводов, производящих АГБ, так и по объемам выпуска. При этом по показателю – выпуск АГБ на душу населения, первое место прочно удерживает Беларусь - 0,317 м<sup>3</sup>/чел. Совокупный объем производства четырех бывших республик СССР составил 17,5 млн м<sup>3</sup>. Даже если учесть выпуск в прибалтийских странах (300-500 тыс. м<sup>3</sup>), совокупный объем произведенного АГБ будет существенно ниже плана (40-45 млн м<sup>3</sup>), поставленного Госстроем СССР для реализации жилищной программы 1987 г. [4].

Все это говорит о высокой популярности газобетона и его широком применении. Это обусловлено тем, что он сочетает в себе высокие прочностные показатели с хорошими теплоизолирующими свойствами. Однако ежегодно возрастающие требования потребителей приводят к необходимости повышения качества выпускаемых изделий. Добиться этого возможно как за счет использования технологических приемов, так и корректировки состава газобетона путем введения различных модифицирующих компонентов.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что модификация вяжущего активными минеральными добавками, повышающими прочность межпоровой перегородки и дисперсное армирование газосиликатов различными волокнами является наиболее перспективным и все более широко применяется во многих областях строительства.

Структура бетона с использованием армирующих волокон приближается к структуре бетона, армированного стальной арматурой. Преимущество дисперсного армирования заключается в том, что волокна фибры имеют повышенную прочность, так как обладают более высокой степенью дисперсности в армируемом камне. Современные волокна,

произведенные из химически инертных материалов, не вступают в реакцию с солями и щелочами результатов реакций в кремнеземистом вяжущем.

Известно, что автоклавные газосиликаты, как и обычные ячеисто-заполненные бетоны, плохо работают на растяжение при изгибе. Газосиликаты также характеризуются образованием усадочных трещин при твердении. Повысить прочностные характеристики, а также другие свойства газосиликатов можно за счет введения оптимального количества активных модификаторов, армирующего волокна и его равномерного распределения в смеси. Дисперсное армирование микроволокном позволяет повысить качество изготовления и применения автоклавного газосиликата.

Таким образом, для расширения номенклатуры эффективных стеновых материалов, разработка технологии автоклавного газосиликата с применением в качестве дисперсной арматуры микроволокон и модификация его активными минеральными добавками является одной из важнейших научных и практических задач.

Отсутствие практики промышленного производства модифицированных автоклавных газосиликатов, высокая потребность рынка в более качественных ячеистых бетонах определяет актуальность, научную и практическую значимость выдвинутой проблемы.

**Степень разработанности темы.** Среди исследователей-теоретиков, работающих над созданием дисперсно-армированных бетонов и конструкций на их основе, можно выделить отечественных ученых Ю.М. Баженова, П.И., Боженова, О.Я. Берга, Г.И. Бердичевского, И.В. Волкова, А.А. Гвоздева, Ю.В. Зайцева, П.Г. Комохова, Л.Г. Курбатова, И.А. Лобанова, К.В. Михайлова, Ф.Н. Рабиновича, В.В. Тимашева, Е.М. Чернышова и зарубежных ученых - Э. Ву, А. Келли, Дж. Купера, С.Т. Милейко, Г.С. Холистера.

Проведенный анализ научных публикаций по вопросам производства газосиликатов автоклавного твердения показал, что автоклавные газосиликаты различных плотностей имеют недостатки в физико-

механических характеристиках. Возможность использования активных минеральных добавок и волокна микроцеллюлозы в качестве дисперсной арматуры приводит к улучшению физико-механических и эксплуатационных характеристик газосиликатов автоклавного твердения и определяет актуальность выбранной темы.

**Целью диссертационного исследования** является разработка составов и исследование физико-механических свойств автоклавного ячеистого бетона, модифицированного активными минеральными добавками и дисперсно-армированного микроволокном.

**Цель работы подразумевает решение следующих задач:**

- разработка составов и обеспечение качества структуры автоклавного газосиликата, модифицированного активными минеральными добавками и дисперсно-армированного микроволокном;
- установление закономерностей формирования физико-механических свойств цементного камня межпоровой перегородки, модифицированного активной минеральной добавкой, и структурообразования в газосиликате дисперсно-армированного волокном;
- физико-химические исследования качественного состава синтезированных новообразований и определение их влияния на физико-механические характеристики газобетона.
- определение физико-механических, теплотехнических и эксплуатационных характеристик модифицированного активной минеральной добавкой автоклавного дисперсноармированного газобетона;

**Научная новизна работы заключается в том, что:**

1. Установлено, что модифицирующая добавка аморфного микрокремнезема хемосорбционно взаимодействует с компонентами известково-кремнеземистого вяжущего с появлением вязких и волокнистых низкоосновных гидросиликатов кальция, относящихся к группе волластонитов и отличающегося большей твердостью.

2. Выявлена зависимость формирования структуры порового пространства газобетона от вида газообразователя, найдены закономерности влияния поровой структуры на теплофизические и механические свойства композита.

3. Определены оптимальные параметры микроармирующего волокна, установлено положительное влияние низкомодульных волокон микроцеллюлозы на физико-механические характеристики газобетона.

4. Найдены зависимости механических и теплотехнических характеристик газобетона от его влажности, установлены закономерности влияния на них модифицирующих добавок.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в разработке оптимальных составов автоклавного дисперсно-армированного газобетона различной плотности, которые отличаются от известных тем что, для управления физико-механическими и эксплуатационными свойствами, содержат модифицирующие добавки аморфного кремнезема от 0,5 до 1,5% и волокно микроцеллюлозы в количестве от 0,5 до 2,5 % от массы вяжущего, с значительно улучшенными физико-механические показателями: прочностные характеристики при сжатии для марки D400 до 2,0-2,5 МПа, для марки D600 3,5-6,0 МПа.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе проанализированы и систематизированы имеющиеся в российской и зарубежной научно-технической литературе сведения о методах управления качеством и технологией производства ячеистых бетонов автоклавного твердения. Опираясь на обобщенную информационную базу, был поставлен ряд научных задач, предложены пути их решения и проведена проверка достоверности результатов.

### **Положения выносимые на защиту:**

- закономерности формирования основных физико-технических свойств газобетона под влиянием различных параметров технологии и состава;
- результаты экспериментальных исследований модифицирования газобетона активными минеральными добавками и микроармированием низко модульной фиброй;
- порометрический анализ влияние газообразователя на поровую структуру газобетона и ее влияние на теплотехнические и физико-механические свойства композита;
- данные физико-химических исследований изменения минералогического состава синтезированных новообразований под влиянием модифицирующей активной минеральной добавки и влияние этих изменений на физико-механические свойства газобетона;
- новые составы дисперсно-армированного газобетона модифицированного активной минеральной добавкой с прочностью при сжатии 3,5-5,5 МПа, коэффициентом теплопроводности не выше 0,14 Вт/м0С и морозостойкостью F100.

**Степень достоверности полученных результатов.** Исследования проведены использованием методик, регламентированных действующими стандартами, а также применением поверенного оборудования, обеспечены большим объемом экспериментальных данных, полученных с применением современной электронно-вычислительной техники и программного обеспечения при статистической обработке результатов и опытно-производственными испытаниями.

### **Апробация результатов исследования**

Результаты исследований докладывались на следующих научных конференциях: XIX, XX, XXI и XXII Международная научно-техническая

конференция «Информационная Среда ВУЗа», Иваново, 2012-2016 гг., на постоянно действующем семинаре академика РААСН Федосова С.В. «Физико-химические и математические аспекты строительного материаловедения и технологий», Иваново, 2015, II и III Межвузовская молодежная научно-техническая конференция с международным участием «Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера» (ПОИСК), Иваново 2015-2016 гг.

**Внедрение результатов.** Основные результаты исследований применялись при производстве газобетонных блоков на ООО «Газобетона» г. Иваново (акт о внедрении от 20.10.2015, г. Иваново).

**Личное участие автора в получении результатов** заключается в выборе объектов, методологии и методов исследований, разработке комплекса теоретических и экспериментальных изысканий; выполнении, обработке и анализе основных результатов, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. В совместных работах, опубликованных Акимовым А.В. в соавторстве, автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ (в том числе 3 статей – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы из 134 наименований, 5 приложений. Работа изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков, 18 таблиц.

# ГЛАВА 1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

## 1.1. Сущность и назначение ячеисто-заполненных бетонов

Снижение материалоемкости строительства при сохранении и улучшении потребительских характеристик зданий и сооружений стало основным направлением развития строительства. Так за период с 1911 по 1980 г. средняя материалоемкость наружных стен каменных зданий в Санкт-Петербурге снизилась от полутора до восьми раз: с 1206 кг/м<sup>2</sup> (2,5 полнотелых кирпича) [5] до 150-400 кг/м<sup>2</sup> (серии 600.11 и 504) для панельных зданий и 728 кг/м<sup>2</sup> (2 щелевых кирпича) для кирпичных.

Однако с 1970-х годов стала явной и обратная тенденция – увеличение материалоемкости строительства с целью снижения эксплуатационных расходов (СНиП II-A.7-71 Строительная теплотехника. Нормы проектирования; СНиП II-3-79\*\* Строительная теплотехника ). Требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций отапливаемых зданий сначала были в дополнение к исключительно санитарно-гигиеническим дополнены экономическими, СНиП II-3-79\*\* Строительная теплотехника, а затем заменены требованиями энергосбережения – СНиП II-3-79\*\* Строительная теплотехника; СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий. Госстрой России. М.: 2004. Проведенная дважды за последние сорок лет смена представлений о нормировании тепловой защиты [6] привела к последовательному росту материалоемкости строительства, который особенно заметен в странах Евросоюза [7]. Сходный рост требований к теплозащитной оболочке зданий прослеживается и в нашей стране [8].

Для того чтобы повышение теплозащитных характеристик ограждающих конструкций здания не влекло за собой рост

материалоемкости, разрабатываются и внедряются новые строительные материалы, получают развитие новые конструктивные схемы зданий [9]. Так в последние два десятилетия в отечественном строительстве появились слоистые ограждающие конструкции с системами наружного утепления [10-13], легкие каркасно-обшивные ограждающие конструкции [14]. Произошли изменения и в ассортименте традиционных подотраслей промышленности строительных материалов: налажен выпуск силикатных стеновых блоков [15], появились крупноформатные изделия из керамики и керамические изделия с поризованным черепком [16] - единственный вид строительной керамики, демонстрирующий устойчивый рост объемов выпуска; значительно выросло производство неармированных изделий из автоклавного ячеистого бетона [17], более чем на 20% снизилась средняя плотность выпускаемых автоклавных ячеистых бетонов (АЯБ) [17-18]. Промышленностью освоен выпуск ячеистобетонных блоков низких плотностей (D300-D400) с достаточной для конструкционных материалов прочностью (класс по прочности при сжатии В1,5 [17]).

Появление новых материалов и конструкций, обладающих сравнительно высокими теплозащитными свойствами, призвано совместить обе основные тенденции современного строительства: продолжающееся снижение материалоемкости, как основную экономическую задачу и повышение теплозащитных характеристик оболочки здания, как составляющую общей задачи снижения энергопотребления.

Производство автоклавных ячеистых бетонов в России стремительно увеличивается. После двукратного спада производства, произошедшего в 1990-х гг. за счет значительного сокращения выпуска армированных изделий (при одновременном росте производства мелких блоков), за период 2000-2012 гг. производство автоклавных ячеистых бетонов в России выросло почти в 7 раз, а установленные производственные мощности увеличились почти в 10 раз [19-21].

Увеличение объемов выпуска автоклавного ячеистого бетона происходит быстрее, чем растут объемы строительства. Если в 2000-м году потребление ячеистых бетонов по данным ФСГС составило 0,021 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> введенного жилья, то в 2011 это значение составило уже 0,061 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>. Более 85% выпуска АЯБ осуществляется на новом оборудовании, введенном в период после 2002 г., более 90% - на оборудовании, введенном в период после 1991-го года [17, 21-22].

Современные производства оснащены скоростными смесителями, обеспечивающими высокую степень однородности бетонной смеси и кантователями массива, позволяющими осуществлять резку массивов на изделия короткими (до 0,8 м) струнами, что обеспечивает высокую геометрическую точность изделий [23]. Наряду с низкими коэффициентами вариации прочности и плотности современных автоклавных ячеистых бетонов, а также с высокой геометрической точностью изделий из них, современные производства оказались способными к производству ячеистых бетонов низких плотностей (D300-D400) со сравнительно высокой прочностью [ 21-23].

Автоклавные ячеистые бетоны низких (D500 и ниже) плотностей обладают сравнительно невысокой (до 0,15 Вт/м\*°C) теплопроводностью [20, 25]. Кладка из блоков из них на тонкослойных клеевых растворах обладает высоким коэффициентом теплотехнической однородности по глади стены [26-28]. Такие характеристики кладки позволяют использовать низкоплотные ячеистые бетоны в большинстве регионов России для устройства однослойных ограждающих конструкций экономически приемлемой толщины. Востребованность такой конструкции наружных стен подтверждается экономическим расчетом [26] и рыночным спросом на такие материалы, как со стороны индивидуальных потребителей, так и со стороны крупных застройщиков [17, 21, 24].

Однако автоклавные ячеистые бетоны марки по средней плотности ниже D500 действовавшими по состоянию на 2006 г. нормативами ГОСТ 25485-89 Бетоны ячеистые. Технические условия; ГОСТ 21520-89 Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие. Технические условия.; ГОСТ 5742-76 Изделия из ячеистых бетонов теплоизоляционные, были относимы к теплоизоляционным материалам. Большинство исследований характеристик автоклавных ячеистых бетонов производилось в 1960-80-е гг. на бетонах марок D600-D1200 [29-31]. Полученные результаты зачастую экстраполировались на марку D500 [32]. Исследований ячеистых бетонов марок D400 и ниже как конструкционно-теплоизоляционных материалов до 2000-х годов в России не проводилось.

Конструкции из автоклавного ячеистого бетона марки по средней плотности D400 начали применяться в ограждающих конструкциях зданий с несущим железобетонным каркасом в г. Москве с 2000-го года [20, 24, 26, 33] (блоки производства ОАО «ЛЗИД»). К тем же годам относится первый опыт применения марки D400 в коттеджном строительстве.

Автоклавный ячеистый бетон марки по средней плотности D400 обладает повышенными по сравнению с более плотным бетоном теплозащитными характеристиками (коэффициент теплопроводности D400 на 20% ниже, чем у D500 и в полтора раза, чем у D600) [29]. При этом ряд его характеристик при работе в составе современных ограждающих конструкций оставался не изученным. Прочность и деформативность кладки при действии вертикальных нагрузок, влажностное состояние при работе в качестве единственного конструкционно-теплоизоляционного слоя ограждающей конструкции, работа в качестве основания для закрепления навесных элементов конструкций.

## 1.2. История возникновения ячеистых бетонов автоклавного твердения

Вопросы зарождения двух технологий: автоклавной обработки силикатных материалов и создания ячеистой структуры бетонов на различных видах вяжущих материалов подробно разобраны в работах П.И. Боженова, Пинскера В.А., Вылегжанина В.П., Гойкалова А.Н. Кузнецова Д.В. и др. [30, 34-37].

Автоклавные силикатные материалы в виде опытно-промышленных и промышленных образцов были созданы в XIX в.: А. Добре и Г. де Сенармон во Франции, Ш. Рауленд в США и В. Михаэлис в Германии разными путями пришли к получению искусственных камней в автоклавах. Их работы показали возможность получения прочного искусственного камня при сравнительно низких температурах в присутствии воды или водяного пара (в отличие от высокотемпературного обжига в керамической промышленности). Эффективность автоклавной обработки породила большое число публикаций и изобретений в разных странах к концу XIX в. [34].

Получение ячеистых бетонов было впервые запатентовано пражским инженером Гофманом, получившим в 1889 г. патент на изготовление бетонов, ячеистая структура которых образовывалась за счет выделения углекислого газа при реакции соляной кислоты и гидрокарбоната натрия [24].

Газобетон впервые запатентован в США в 1914 г. — J.W.Aylsworth и F.A.Duer получили патент на изготовление ячеистого бетона на основе цемента и алюминиевой пудры [30].

Промышленное производство автоклавного газобетона для жилищного строительства началось в 1924г. в Швеции фирмой Skavde Gazobeton AB под торговой маркой Durox, который по лицензии был распространен в Дании, Франции, Голландии, Норвегии, Румынии и США [30].

В 1929 г. под руководством Карла Августа Карлена заработал завод газосиликата (АЯБ на известковом без применения цемента вяжущем) на

основе технологии, запатентованной в 1923 г. Акселем Эрикссоном. Завод построен вблизи г. Хэллаброттет в селе Yxhult (фирмой Yxhult Stenhuggeri AB), первые буквы названия которого в сочетании со вторым слогом шведского слова "бетон" (betong) дали название (в 1940г.) выпускаемой продукции «Итонг» (Ytong). Коммерчески успешное производство автоклавного ячеистого бетона в межвоенной Европе развивалось интенсивно. В Швеции этому способствовал дефицит лесоматериалов (продаваемых за рубеж, особенно в предвоенную Германию), и обнаружение удобных к освоению месторождений известняков и горючих сланцев, послуживших (после обжига) вяжущим автоклавного твердения. Коммерческий успех к автоклавным ячеистым бетонам пришел благодаря сравнительной дешевизне и пожаробезопасности газосиликатных зданий в сравнении с деревянными [30, 38].

В это время бывший главный химик фирмы АО Лохъян Калккитехдас профессор Леннарт Форсен, работавший в области автоклавного цементного газобетона, переехал из Финляндии в Швецию по приглашению фирмы Skanska Cement-AB, где вместе с инженером Иваром Эклундом (К.И.А. Eklund) разработал технологию автоклавного газобетона (на цементе и молотом песке, без добавки извести). Соответствующий продукт получил фирменное название "Сипорекс" (Siporex) начиная с 1934 г. [30, 38-39].

В Дании, используя шведский опыт, начали в 1936 г. выпускать газобетон на смешанном вяжущем. С 1939 г. заработала в Германии фирма Nebel ("Хебель"), также используя шведский опыт и смешанное вяжущее. В дальнейшем эти и другие фирмы, перенимая опыт друг друга, выпускали продукцию под различными фирменными названиями (в том числе "порит", "термолайт", "кальсилоркс", "бебалит", "униполь", "аэрокрет", "шимабетон" и т.д.), причем технологии характеризовались не столько сырьевыми материалами, сколько особенностями резательных машин.

На территории СССР первый газобетонный завод построен в 1937 г. в Риге (завод "Ригипс", затем "Цементно-шиферный завод") по лицензии

фирмы "Сипорекс" (на цементе и песке), а жилые дома, построенные из мелких блоков, выпускавшихся этим заводом, успешно эксплуатируются уже более 70 лет [40-42].

В 1947 г. Польша купила в Швеции технологию и частично оборудование фирмы "Сипорекс" и построила у себя несколько заводов автоклавного газобетона. Наладив выпуск оборудования, 7 заводов Польша продала в Чехословакию и 10 заводов в СССР. Таким образом, можно считать, что советское промышленное производство автоклавного газобетона было (косвенно) простимулировано фирмой «Сипорекс» [30, 40].

В России промышленное производство силикатных материалов (изначально — полнотелого кирпича) было организовано еще в конце XIX в. В 1901 г. в России было 9 заводов силикатного кирпича [34].

Первые исследования неавтоклавных ячеистых бетонов (пенобетона и газобетона) в СССР выполнены в 1928 г. А.А. Брюшковым и М.Н. Гензлером [43]. Работы продолжил в 1932 г. Б.Н. Кауфман. Внедрение в строительство пенобетона началось в 1930-1932 гг. на стройках Москвы, Ленинграда и других городов. Пенобетон естественного твердения плотностью 400-500 кг/м<sup>3</sup> применялся в качестве монолитной теплоизоляции кровель [44].

В 1932-1935 гг. Н.А. Поповым, В.В. Ризоватовым были продолжены исследования и осуществлено внедрение в строительство неавтоклавного газобетона на портландцементе, воде и алюминиевой пудре. Однако монолитные пенобетон и газобетон требовали большого расхода цемента (350-450 кг/м<sup>3</sup>), имели небольшую прочность при сжатии (5-7 кг/см<sup>2</sup>) и значительную усадку, вызывавшую трещины и даже разрушение изделий [40.].

По инициативе П.В. Лапшина в СССР в 1932 г. было начато изготовление ячеистых силикатных изделий, в частности пеносиликата, а в конце 1930-х гг. было начато широкое промышленное производство автоклавных сборных деталей. Тогда же М.Н. Гензлер в Ленинграде, И.Т. Кудряшев в Москве стали применять автоклавную обработку как средство

увеличения прочности, уменьшения трещинообразования и усадки пенобетона [34].

Производство автоклавного армопенобетона впервые было организовано в 1938-1939 гг., в Челябинске и Новосибирске в виде кровельных плит, выполняющих несущие и теплоизоляционные функции, затем в 1940 г. в поселке Лыткарино под Москвой, в 1948 г. - в Днепропетровске [42].

В 1939 г. был получен пеносиликат на молотой извести-кипелке (И.Т. Кудряшев и др.). На основе этих работ с 1941 года начали выпускать покрытия промышленных зданий из армопеносиликатных плит на цементе и извести, в которых сочетались и конструкционные, и теплоизоляционные функции ячеистого материала [42].

В 1953 г. в Березняках было организовано производство крупноразмерных армопенобетонных изделий для бескаркасных панельных домов с поперечными несущими стенами. В 1954 г. в Таллинне, а затем и во многих других городах (Барнаул, Ижевск, Колпино) начат выпуск пеносиликальцитных стеновых блоков для малоэтажного строительства.

В конце 1956 г. на заводе крупнопанельного домостроения в Первоуральске освоено производство несущих стеновых панелей «на комнату» с проемом из армопенобетона, а в 1959 г. в Свердловске применены самонесущие панели «на комнату».

С 1957 г. началось изготовление теплоизоляционного газобетона на основе пергидроля на бетонных заводах в городах Новая Каховка и Жигулевск [42-44]. В конце 1950-х в СССР был налажен выпуск автоклавного газобетона на поставленном Польшей оборудовании. Один из этих десяти [30] заводов заработал в Ленинграде в 1959 г. Он вошел в состав Домостроительного комбината №3 (ДСК-3 Главленинградстроя). В 1960-е гг. из продукции ДСК-3 было построено более 3 млн. кв.м жилых зданий [30].

К 1960-м годам производство автоклавных ячеистых бетонов стало самостоятельным, растущим научным направлением, во многом

опережающим европейские наработки в этой области. В 1960-70-е годы разрабатывались и внедрялись технологии воздействия на растущий массив (вибрационная, затем ударная) [45], позволяющие менее критично относиться к качеству сырья. Велись исследования зависимостей свойств бетонов от характеристик сырьевых компонентов, технологических режимов изготовления, построение корреляционных зависимостей прочности от плотности, морозостойкости от плотности, состава и технологии производства, механические свойства ячеистых бетонов (Чернышов Е.М., Федин А.А., Муст Х., Левин Н.И., Пинскер В.А., Макаричев В.В. [46-52]). Изучались сорбция ячеистых бетонов, их теплопроводность, воздухо- и паропроницаемость, капиллярные свойства и др. (Р.Е. Брилинг, К.Ф. Фокин, А.У. Франчук, Г.Ф. Кузнецов, Б.Ф. Васильев, Ф.В. Ушков [53-58]). Со второй половины 1960-х гг. подавляющее большинство вводимых производственных мощностей были ориентированы на газовый способ образования ячеистой структуры и автоклавную обработку бетона.

К концу 1980-х годов производство армированных изделий и мелких блоков в СССР составляло около 6 млн.куб.м в год. В 1989 году средняя плотность бетона панелей наружных стен составляла 687 кг/куб.м, средняя плотность бетона мелких блоков — 643 кг/куб.м. В то же время в УралНИИСтромпроекте и в ЛенЗНИИЭПе были выполнены работы, позволившие начать опытно-промышленное производство армированных панелей из вариотропного газобетона со средней плотностью 350 кг/куб.м.

К этому времени в СССР из ячеистых бетонов было построено более 200 млн. м<sup>2</sup> общей площади жилья, более 40 млн. м<sup>2</sup> промзданий, более 5 млн. м<sup>2</sup> животноводческих комплексов и более 20 млн. м<sup>2</sup> культурно-бытовых и общественных зданий [18].

При этом, несмотря на высокий уровень отечественных научных разработок, ориентиром для советской промышленности служили западноевропейские достижения (понижение плотности панелей и блоков вплоть до 300 кг/куб.м), основанные в первую очередь на стабильном

качестве сырья и оборудовании, обеспечивающем высокую однородность материала [18].

В 1991 г. в СССР было выпущено 5,7 млн м<sup>3</sup> автоклавного ячеистого бетона, в т.ч. 1,6 млн м<sup>3</sup> армированных изделий. Намечалось довести выпуск изделий в 1995 г. до 40 млн. м [18].

В 1987 году, 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. и 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.куб.м 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.куб.м в год [18, 24].

Планы предусматривали не только механическое наращивание объемов выпуска автоклавных бетонов. Важной задачей было объявлено снижение

средней плотности выпускаемой в стране продукции: «При снижении объемной массы ячеистого бетона можно утоньшить стены и снизить расход материала на 1 кв.м общей площади, что эквивалентно росту производства материала. Так, снижением плотности с 600 кг/куб.м до 300 кг/куб.м 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...» [18].

Действительность, однако, в силу особенностей советской экономики и динамики мировых цен на энергоносители, не дала реализоваться столь амбициозным планам. Плановый рост производства автоклавных армированных изделий и мелких блоков с 6 до 40 млн.куб.м обернулся падением до уровня 3,5 млн.куб.м (из них в России около 2 млн.куб.м) [17, 24, 59].

При этом советские инвестиционные программы обладали некоторой инерцией. Так, закупленное в конце 80-х с правом копирования оборудование фирмы «Итонг» было смонтировано в г. Самаре уже в постсоветское время и ОАО «Коттедж» начал выпуск блоков из автоклавного бетона в 1995-м году. Оборудование было скопировано в Набережных Челнах и им (в упрощенном исполнении) был оснащен набережно-челнинский «Завод ячеистых бетонов» [17].

Практически параллельно с монтажом закупленного оборудования фирмы «Итонг» в рамках программы вывода советских войск из Германии на пространстве бывшего СССР было построено несколько заводов по выпуску изделий из автоклавного газобетона на оборудовании фирмы Hebel («Хебель») (завод в Липецке, 211 КЖБИ МО РФ в г. Сертолово под Санкт-Петербургом, комбинат «Забудова» в п.Чисть в Белоруссии). В то же время был запущен завод «Сибит» на оборудовании «Итонг» в г. Новосибирске.

Заводы на импортном оборудовании, запущенные в 1994-97-м годах, обеспечили появление на российском строительном рынке более 0,5 млн.мз

газобетонных блоков с высокой точностью геометрических размеров, позволяющей вести кладку на тонкослойных клеевых растворах. Продукция этих заводов, ставшая действительно «газобетоном нового поколения», существенно повлияла на конструктивные решения жилых и офисных зданий с монолитным каркасом, старт коммерческого строительства которых пришелся как раз на конец 1990-х гг. [17].

До конца 1998-го года инвестиционный климат в России не способствовал притоку сравнительно крупных частных капиталов в производство строительных материалов. Такая ситуация породила появление и бурное развитие значительного количества небольших производств автоклавного ячеистого бетона.

Изменения инвестиционного климата после 1998-го года и последовавший рост спроса и цен на жилье, а также общий рост объемов строительства, привели к постепенному увеличению объемов инвестиций в промышленность строительных материалов, что привело к заметному росту производства автоклавного газобетона. За период 2000-2012 гг. производство изделий из автоклавного газобетона в России выросло более чем в 6 раз [17, 21]. Автоклавный газобетон — наиболее быстрорастущий сегмент рынка стеновых материалов [16, 45, 59].

### **1.3. Направления в развитии технологии производства газосиликата**

Прочностные и деформативные характеристики автоклавных ячеистых бетонов были хорошо изучены в 1960-80-х гг. [52, 60-62]. В этот период основным исследуемым материалом уже стал автоклавный газобетон, как материал, обеспечивающий основной выпуск ячеистых бетонов в СССР. Основные выпускаемые плотности армированных изделий в описываемый период составляли 700-800 кг/м<sup>3</sup>, мелкие блоки как правило производились плотностью 600-700 кг/м<sup>3</sup>. Меньшие значения средних плотностей в незначительных количествах производились преимущественно в Белоруссии,

Эстонии и Ленинграде []. Большой вклад в исследования прочностных и деформативных характеристик ячеистых бетонов внесен в частности Силаенковым Е. С. [18, 30, 60-63], Макаричевым В. В. [64], Левиным Н. И. [65], Пинскером В. А. [51-52] и др. Поскольку исследования проводились на существовавшей в стране материальной базе, нижней границей плотности для конструкционных бетонов, прочность которых принималась в расчет при устройстве несущих конструкций, была принята сначала  $600 \text{ кг/м}^3$  по ГОСТ 11118-73 Панели из автоклавных ячеистых бетонов для наружных стен зданий. Технические требования, затем —  $500 \text{ кг/м}^3$  по ГОСТ 25485-89 Бетоны ячеистые. Технические условия. Прочность ячеистых бетонов плотностью  $300\text{-}400 \text{ кг/м}^3$  устанавливалась на образцах кубиках, цилиндрах и призмах. Такие бетоны применялись только для выпуска теплоизоляционных изделий. Армированные изделия из бетонов плотностью менее  $500 \text{ кг/м}^3$  в СССР не изготавливались, блоки для каменной кладки не производились. Ячеистые бетоны плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$  и ниже применялись с 1960-х гг. для производства армированных изделий и устройства несущей каменной кладки в странах Западной Европы [38].

Общие сведения о прочности и деформативности каменных кладок изложены в классическом труде Онищика Л.И. [66]. В отечественных нормах эти исследования, продолженные в основном в ЦНИИСКе, закреплены в СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81. В нормативном поле Евросоюза требования к расчету каменной кладки содержатся в Еврокоде 6. Общие требования изложены в EN 1996-1-1: 2005 Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-1. (Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Часть 1-1. Общие положения). При этом в указанном документе кладка с тонким швом (в отечественной литературе традиционно называемым «клеевым») рассчитывается без учета прочности материала шва [67], а ячеистые бетоны рассматриваются как несущие вне зависимости от плотности при условии обеспечения средней прочности (при испытании по EN 772-1:2000 Methods

of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength (Методы испытаний изделий для каменной кладки. Часть 1. Определение прочности при сжатии. [68]) не ниже  $1,5 \text{ Н/мм}^2$  EN 771-4: 2003 Specification for masonry units. Part 4: Autoclaved aerated concrete masonry units. (Требования к изделиям для каменной кладки. Часть 4. Изделия для каменной кладки из автоклавного ячеистого бетона) [69]. Сравнение расчетных методик определения прочности при сжатии каменной кладки, используемых в нормативах разных стран, и результаты этих расчетов сравнены С.Л. Галкиным в [70]. Частично такой разбор проводится в [67].

В последнее десятилетие в странах Евросоюза строительство однослойных конструкций из автоклавного ячеистого бетона ориентировано на применение низких плотностей ( $300, 350, 400 \text{ кг/м}^3$ ). Основными изучаемыми параметрами при этом являются методы усиления кладок (например, [71]) и теплозащитные свойства газобетонных конструкций (например, [72-73]), как наиболее актуальные при текущем изменении требований к зданиям [74].

Прочность и деформативность армированной кладки из автоклавных ячеистобетонных блоков стала предметом диссертационной работы Гойкалова А.Н. [36]. Работа выполнена на примере кладки из блоков марки по средней плотности D600. В ЦНИИСКе им. В.А. Кучеренко Джамуевым Б.К. под руководством Грановского А.В. исследовалась возможность использования кладки из блоков марки по средней плотности D500 для применения в сейсмических районах строительства [75]. В ходе исследования получены данные о прочности и деформативности такой кладки [76].

Технологические особенности производства автоклавного газобетона на современных российских заводах имеют значительные отличия в смесеприготовлении, составе сырьевых компонентов и рецептурах исходных смесей от технологий, освоенных советской промышленностью [77]. Прочность и деформативность автоклавного газобетона, производимого на

современных заводах, описана в работах Гойкалова А.Н. [36], Славчевой Г. С. [78], касаются ее Киселев Д. А. [79], Литвиненко Д.В. [26], Кузнецов Д. В. [37]. Прочностные и деформативные характеристики автоклавного ячеистого бетона, выпускаемого в Республике Беларусь, рассмотрены в работе [63].

В последние годы одной из широко внедряемых технологий стали автоматизированные линии WKB Systems GmbH (Германия). Особенностью этой технологии является использование непрореагировавшего кремнеземистого вяжущего, тепло от реакций гашения которого используют с целью интенсификации процесса подъема сырца и фиксации структуры газобетона.

Сущность технологии заключается в следующем: холодная вода с водозаборной станции по трубопроводу доставляется в цех. Дозировка ее осуществляется непосредственно из системы на весы дозирования шламовых масс согласно введенному в рецепте значению.

Горячая вода (конденсат) при ведении процесса автоклавной обработки откачивается по линии конденсатоотвода и накапливается в конденсатных баках. Далее по системе трубопровода, имеющей «кольцевую конфигурацию», посредством насоса горячая вода подается в накопительный бак объемом 6,8 м<sup>3</sup>, обложенный теплоизоляцией. Из него горячая вода дозируется на весы шламовых масс.

Песчаный шлам из одного из двух шламбассейнов (в один идет процесс намола и усреднения песчаного шлама, а с другого процесс заливки) путем открытия необходимой задвижки при включении насоса по трубопроводу подается на дозировку. Трубопровод подачи прямого шлама имеет «кольцевую конфигурацию» и при включении насоса подачи начинается циркуляция (песчаный шлам начинает циркулировать, и по трубопроводу перекачивается в тот или иной шламбассейн). При начале процесса дозирования дроссельные задвижки в трубопроводе перекрываются (открываются) и песчаный шлам поступает на весы шламовых масс согласно

введенному в рецепте значению. На трубопроводе подачи установлена петля взвешивания, благодаря которой определяется плотность песчаного шлама.

Обратный шлам из шламбассейна объемом  $50 \text{ м}^3$ , оборудованного мешалкой, по трубопроводу при включении насоса подачи также начинает циркулировать. В момент дозировки задвижка, вмонтированная в трубопровод, открывается, и обратный шлам поступает на весы шламовых масс.

Объем весов дозирования шламовых масс (холодная и горячая воды, прямой и обратный шламы) составляет  $5,1 \text{ м}^3$ .

Сухие компоненты – цемент, известково-песчаное вяжущее и гипс также при процессе заливки начинают поступать на весовые дозаторы, оборудованные тензодатчиками.

Цемент из расходного силоса, оборудованного на выходе шиберной задвижкой, по шнековому транспортеру подается на весы дозирования цемента объемом  $0,84 \text{ м}^3$ . В случае зависания материала на расходном силосе предусмотрен вибратор.

Известково-песчаное вяжущее и гипс также каждый из своего расходного силоса через шиберную задвижку по шнековому транспортеру поступают на весы дозирования гипса с известково-песчаного вяжущего (на один весовой дозатор поочередно) объемом  $0,84 \text{ м}^3$ . В случае зависания расходные силоса гипса и известково-песчаного вяжущего также оборудованы вибраторами.

В момент дозировки сырьевых компонентов на участке приготовления алюминиевой суспензии также начинается процесс дозировки алюминиевой пасты. Из одного из двух, или сразу из обоих весовых дозаторов, имеющих объем по  $0,16 \text{ м}^3$ , алюминиевая пудра по шнековому транспортеру поступают в миксер приготовления алюминиевой суспензии. В него предварительно по расходомеру было отдозировано необходимое количество воды. На один замес газобетонной массы приготавливается одна порция алюминиевой суспензии.

В тот момент, когда все компоненты отдозированы и алюминиевая суспензия будет приготовлена, начинается процесс смешивания в центральном миксере объемом 6,3 м<sup>3</sup>. Последовательность и время перемешивания сырьевых компонентов, а также другие технологические параметры задаются в систему. Сначала идет опорожнение шламовых масс (самотеком при открытии дроссельной задвижки), включается электродвигатель мешалки миксера. Далее сыплются цемент, известково-песчаное вяжущее и гипс. Сухие сырьевые компоненты также самотеком поступают в миксер. В случае зависания на весовых дозаторах предусмотрены вибраторы. Алюминиевая суспензия подается в миксер по трубопроводу самотеком с поддавливанием воздухом в последнюю очередь. Затем наступает завершающая стадия смешивания. Сливной рукав переходит в положение слива в форму, имеющую габаритные размеры 6120×1345×710, предварительно смазанную маслом на участке смазки, и происходит момент опорожнения газобетонной массы.

После опорожнения газобетонной массы сливной рукав переходит в положение промывки. Под главным смесителем расположена мешалка промывочной воды и слива аварийной заливки объемом 12,3 м<sup>3</sup>. Промывка осуществляется посредством включения насоса подачи промывочной воды в трубопровод, подведенный к сливному рукаву. В мешалку промывочной воды подведен трубопровод холодной воды, что позволяет пополнять ее. Из мешалки промывочной воды и аварийного слива заливки предусмотрена перекачка по трубопроводу подачей насоса в мешалку участка резки.

Залитая же форма в автоматическом режиме системой фрикционных колес и передаточным мостом отправляется в камеру созревания, где поддерживается оптимальная температура для набора газобетонной смеси необходимой пористости (процесс вспучивания) и пластической прочности. Конфигурация залитой формы и пути в камере созревания, который она заняла, отмечается автоматически в системе управления процессом вывозки

форм на участок резки и начинается обратный отсчет оставшегося времени созревания.

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ

### 2.1. Современные требования к газосиликату

Структурные изменения строительной отрасли как у нас в стране, так и за рубежом, вызванные сменой подхода к проектированию тепловой защиты [6]. Широкое применение получила кладка из ячеистобетонных блоков в наружных стенах монолитных каркасных зданий. В период начала двухтысячных годов началось массовое применение газобетонных блоков в индивидуальном жилищном строительстве в качестве однослойных несущих и наружных ограждающих стен. Основная часть продукции приемной при строительстве соответствовала I категории по показателям точности геометрических размеров по ГОСТ 21520-89 Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие. Технические условия, имела марку по средней плотности D500 с классом по прочности на сжатие B2-2,5 [80]. Начиная с 2008 г. и по настоящее время автоклавный газобетон марок по средней плотности D400 и ниже составляет более 50% от общего объема его потребления [81].

Наружные ограждения зданий с несущим каркасом практически всегда выполняются в виде поэтажно опертых стен [82-83]. В редких случаях по архитектурным соображениям кладка выполняется в виде самонесущих фрагментов на высоту 3 - 5 этажей. В малоэтажном строительстве кладка совмещает несущие и теплоизолирующие функции.

Наружная отделка. В случаях, когда ячеистый бетон выполняют функцию основного теплоизолятора, в качестве наружной отделки выступают: кирпичная кладка толщиной 120-250 мм, тонкослойные штукатурки или перетирка поверхности с последующей окраской (особенно при отделке стен остекляемых балконов и лоджий), облицовка листовыми материалами на отnose [84-85].

Широкое распространение получили системы наружного утепления по газобетонному основанию. Наиболее распространенные варианты: 200-250

мм стеновых блоков D400-D500, минераловатный утеплитель и штукатурная отделка или навесные фасадные системы по утеплителю [80].

Внутренняя отделка в большинстве случаев — перетирка поверхности штукатурными составами слоем толщиной до 5 мм. Редко, но встречаются случаи применения для внутренней отделки листовых обшивок. Кладка из газобетонных блоков ведется в большинстве случаев с применением тонкослойных кладочных растворов [26].

Основные конструктивные решения наружных стен, в которых используется кладка из газобетонных блоков, могут быть систематизированы следующим образом [86] (рис. 2.1):

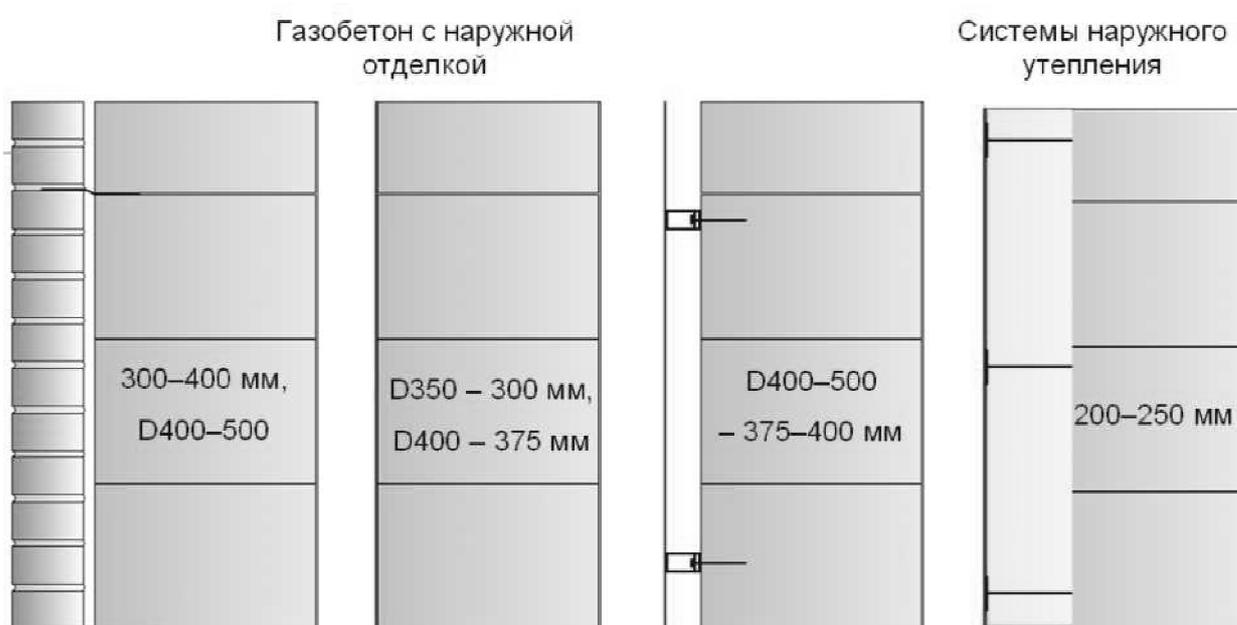


Рис. 2.1. Основные варианты стеновых заполнений с применением кладки из автоклавных газобетонных блоков в монолитном строительстве

- однослойная газобетонная стена с кирпичной облицовкой. Облицовочный слой 120, реже - 250 мм. Облицовочный слой в зданиях с несущим каркасом либо закрывает торцы перекрытий, либо выкладывается заподлицо с ними. В малоэтажном строительстве облицовочный слой, как правило, самонесущий на высоту здания. Применяется газобетон марок D300-D500, толщиной 300-400 мм.

- однослойная газобетонная стена. Кладка выполняет конструктивную и теплоизоляционную функцию. Наружная отделка - выравнивание поверхности, окраска. В малоэтажном строительстве такая конструкция стены распространена широко [87]. В жилых зданиях с несущим каркасом применяется в подавляющем большинстве случаев на остекляемых балконах и лоджиях. D300-D400 300-375 мм.

- газобетонная кладка с наружным утеплением. Для защиты утеплителя от атмосферных воздействий устраивается либо штукатурный фасад с тонким штукатурным слоем, либо навесная фасадная система с вентилируемой воздушной прослойкой. Газобетон в основном выполняет функцию несущей основы для утеплителя. Толщина в поэтажно опертых стенах — 200-250 мм, в несущих стенах малоэтажного строительства — по расчету несущей способности (250-400 мм). Марка по средней плотности в пределах D400-D600.

Выбор конструктивного решения определяет и набор проблем, которые могут возникнуть на стадиях строительства и эксплуатации объекта. Разберем основные из них.

В малоэтажном строительстве кладка из автоклавных ячеистых бетонов в большинстве случаев выполняет несущую функцию. В 1960-е гг. с несущими панелями из автоклавного газобетона толщиной 24 см, плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  (D1000) и прочностью около  $50 \text{ кг/см}^2$  (B 3,5) в Ленинграде строились восьмиэтажные жилые дома, но в современном строительстве здания с несущими стенами из ячеистобетонной кладки, как правило, ограничиваются пятью этажами [63]. Индивидуальное жилищное строительство ориентировано на меньшую этажность. Три этажа, исключая мансардный и цокольный — это практический потолок ИЖС [87].

Выполнение несущих функций не избавляет газобетонную кладку от выполнения теплозащитных задач: сопротивление теплопередаче, воздухопроницанию, сопротивлению прониканию водяных паров.

Для определения применимости кладки для выполнения несущих функций необходимо знать ее основные расчетные характеристики (сопротивление сжатию, растяжению, срезу), иметь данные о ее деформативности [88-89].

Механизм работы заполняющей ячейки несущего каркаса кладки универсален вне зависимости от вида материала, используемого для устройства каменной кладки. Возможные проблемы [90-93] и способы их предотвращения и устранения:

1. Передача нагрузки на заполнение от вышерасположенного перекрытия.

Возникает при отсутствии или недостаточной толщине деформационного шва между кладкой и перекрытием (ошибки проекта или организации работ) или при возникновении сверхнормативного прогиба перекрытия (несистемная ошибка) [63]. Для предотвращения передачи нагрузок от элементов каркаса на кладку необходимо правильное исполнение деформационных швов между заполняющей кладкой и каркасом. Требования к такому заполнению разобраны в [94]. Проектное решение деформационного шва между несущими конструкциями и заполнением должно быть исполнимо в построечных условиях. Внутренний слой деформационного шва должен включать материалы с высоким сопротивлением паропрооницанию, например, пенополиэтиленовые жгуты. Толщина деформационного шва между кладкой и перекрытием должна подбираться исходя из нормативного прогиба перекрытия ( $1/300$  пролета) и расчетной сжимаемости материалов.

2. Недостаточная устойчивость стенового заполнения под действием ветровых нагрузок.

Может возникнуть при большой этажности здания и легких тонких ограждениях, особенно при вывешивании кладки за торец перекрытия. Методика расчета такой кладки на устойчивость приведена в [95]. Для обеспечения устойчивости стеновых заполнений необходимо

предусматривать исполнимое в условиях строительной площадки закрепление их от выпадения из плоскости.

С этой точки зрения кладка из штучных материалов может рассматриваться как изгибаемый элемент по СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81. Опорой изгибаемых конструкций в этом случае будут являться элементы, закрепляющие стеновые фрагменты в плоскости фасада. Задача закрепления фрагментов стеновых заполнений (в т.ч. из автоклавных ячеистобетонных блоков низких плотностей) в плоскости фасада имеет апробированные решения. Элементы закрепления таких фрагментов обладают нормативными расчетными сопротивлениями и могут назначаться в зависимости от расчетных нагрузок [26, 96-97].

3. Сверхнормативная воздухопроницаемость деформационных швов между элементами несущего каркаса и кладкой.

Во всех случаях является следствием низкого качества исполнения либо отсутствия деформационного шва между несущими стенами/колоннами и кладкой, или между кладкой и перекрытием. Воздухопроницаемость деформационных швов устраняются их качественным исполнением. Вопрос воздухопроницаемости стыков смежных элементов здания актуален для всех типов ограждающих конструкций. В наиболее проработанном виде он решен в ГОСТ 30971-2002 Швы монтажные узлов примыканий оконных блоков к стеновым проемам.

4. Сверхнормативная воздухопроницаемость самой кладки.

Низкое качество кладочных работ и небрежность заполнения швов (особенно вертикальных), применение цементных растворов без пластифицирующих добавок глины и извести всегда актуальны для кладки толщиной в один камень. Расчетное сопротивление воздухопроницанию кладки толщиной в один камень на цементных растворах не позволяет рассчитывать только на кладку при обеспечении требуемых значений [26, 98-99]. Воздухопроницаемость однорядной кладки из газобетонных блоков

возможна только по швам. Снижение воздухопроницаемости кладки может обеспечиваться как повышением качества кладочных работ, так и применением для внутренней отделки материалов с достаточным сопротивлением воздухопроницанию [99].

Конструкции из конструкционно-теплоизоляционных материалов должны обладать теплофизическими характеристиками, не худшими расчетных значений. Для этого их эксплуатационная влажность (а, следовательно, и реальная теплопроводность) должна быть в пределах расчетных значений. Отсутствие сплошного слоя наружной теплоизоляции предъявляет требования к качеству исполнения узлов сопряжения конструкций. Возможные проблемы при выполнении этих задач [86] и основные способы их предотвращения и устранения:

1. Интенсивные теплотери в зоне опирания кладки на монолитное перекрытие.

Проектные решения этого узла разделяются на две основные группы: перфорация перекрытия по оси стен теплоизоляционными вкладышами (пенополистирольными или минераловатными) или устройство сплошного теплоизоляционного экрана на торце перекрытия (как правило, при кладке, выступающей за пределы перекрытия). Несистемные проблемы возникают в первом случае — при ошибках в устройстве вкладышей в теле бетона. Вкладыши при недостаточном закреплении могут всплывать или просто смещаться при заливке бетона; пенополистирольные вкладыши могут выгорать при производстве сварочных работ и т.п. [82].

Торцы перекрытий в каркасных зданиях без систем наружного утепления — важный с точки зрения тепловой защиты конструктивный элемент. При наличии возможности торцы должны утапливаться в плоскость фасада и изолироваться по периметру. При отсутствии такой возможности следует уделять проектированию и расстановке теплоизоляционных вкладышей, перфорирующих край диска перекрытия, повышенное внимание [26].

## 2. Увлажнение кладки выше расчетных значений.

Увлажнение кладки к концу периода влагонакопления до значений, значительно превышающих расчетные 4-5% по массе, следует рассматривать как следствие проектной ошибки или брака, допущенного при производстве работ. Возможные причины такого переувлажнения:

-высокая воздухопроницаемость деформационных швов между кладкой из газобетонных блоков и перекрытием в двухслойных стенах (газобетон + лицевой кирпич), приводящая к поступлению внутреннего воздуха из помещения в зазор между слоями кладки с конденсацией в нем водяного пара. Это приводит к сильному переувлажнению наружных слоев газобетона, сквозному увлажнению лицевого кирпича, образованию наледи на дне воздушной прослойки.

-высокая воздухопроницаемость кладки из газобетонных блоков при отсутствии отделки в сданных, но не заселенных квартирах. Пустошовка в сочетании с отсутствием сплошных отделочных слоев, обладающих достаточно высоким значением сопротивления паропрооницанию, приводит к тем же последствиям.

- высокое сопротивление паропрооницанию наружной отделки. Негативное влияние наклеенной на кладку керамической плитки или нанесенной плотной штукатурки особенно заметно проявляется в тех случаях, когда наружная отделка проводилась осенью по свежей кладке с высоким содержанием технологической и построечной влаги. Такая отделка, препятствующая удалению влаги из толщи стены, в климатических условиях европейской части России утрачивает сцепление с кладкой в первые годы эксплуатации из-за морозного разрушения водонасыщенного когезионного слоя [100-101].

Для предотвращения переувлажнения кладки необходимо выполнение следующих правил [102]:

-обеспечить низкую воздухопроницаемость ограждающих конструкций с применением газобетонной кладки. Тщательно выполнять деформационные

швы между кладкой и перекрытиями, при сомнении в качестве кладочных работ обеспечить наличие штукатурных или иных отелочных слоев с достаточным сопротивлением воздухопроницанию.

-избегать использования для наружной отделки материалов с низкой паропроницаемостью — плотной цементно-песчаной штукатурки, наклеиваемой облицовочной плитки, тонких слоев полимерных теплоизоляционных материалов.

В многоэтажном строительстве закрепление направляющих профилей фасадных систем с вентилируемым зазором может осуществляться только в элементы несущего каркаса (например, в торцы перекрытий) и не использовать заполняющую кладку как основание для крепежа [103]. При этом, однако, сохраняется необходимость использования кладки в качестве основания для закрепления теплоизоляционных плит. В двухслойных стенах (основная конструкционно-теплоизоляционная кладка из ячеистобетонных блоков и облицовочная кладка из лицевого кирпича, камней, блоков) ячеистый бетон служит основанием для закрепления гибких связей. Несмотря на ограничение применения марки по плотности D400 в качестве внутреннего слоя многослойных стен, ее использование для этих целей остается широким. В малоэтажном строительстве кладка из газобетонных блоков используется также для закрепления навесных фасадных облицовок. Во всех случаях кладка стен может являться основанием для закрепления внутридомового инженерного оборудования, мебели, элементов интерьера. При использовании ячеистобетонной кладки в качестве основы для механического крепежа возможны следующие проблемы:

1. Ненадежность связи между основным газобетонным и лицевым кирпичным слоями

Расчетная высота ряда газобетонной кладки - 250 мм, высота ряда кирпичной кладки - 77 мм (из одинарного) или 100 мм (из модульного кирпича). Перевязка таких кладок сварными сетками с шагом по высоте 750 или 500 мм на практике не осуществима без 20-30 мм растворных швов в

газобетоне, выполняемых с целью подгонки высоты ряда. Такие швы понижают коэффициент теплотехнической однородности по глади кладки [19, 26-27], что не может считаться приемлемым. Расстановка одиночных анкеров — гибких связей — в швы кладок также требует подгонки высоты рядов. Сгибание связей для заведения их в несовпадающие по высоте кладочные швы влечет дополнительные особенности их работы [104]. Решение проблемы заключается в использовании вворачиваемых в тело газобетона анкеров, а также в использовании сгибаемых гибких связей с большой площадью опоры на газобетон.

2. Ненадежность выбранных крепежных элементов для устройства навесных фасадов по газобетонному основанию

Использование газобетонных стен в качестве основания для систем наружного утепления началось стихийно, без предшествовавшей удовлетворительной проработки (как, впрочем, и вообще использование систем наружного утепления). В ряде случаев к выбору крепежа для кронштейнов навесных фасадов приступали (и приступают) лишь по окончании кладочных работ. В результате встречаются случаи использования для этих целей сквозных шпилек с тарельчатыми шайбами на наружной и внутренней сторонах кладки [105]. Определение несущей способности дюбелей, проводимое в построечных условиях, не учитывает текущей влажности кладки [106]; методика определения несущей способности не дает представления о фактической однородности крепежа [107]. При наличии объективных проблем подбор и устройство креплений в газобетонной кладке с расчетом на работу под действием пульсирующей нагрузки по оси, перпендикулярной плоскости кладки - это серьезная, но решаемая задача [108].

Во-первых, забивные закладные детали, работающие на срез и использующие в своей работе сопротивление бетона сжатию имеют высокую несущую способность [109] (навесные газобетонные панели крепятся к несущим конструкциям забивными нагелями - по сути, гвоздями), но

требуют установки на стадии кладочных работ, т.е. включения в состав основного проекта.

Во-вторых, основные производители крепежа имеют в своем ассортименте специально предназначенные для ячеистых, щелевых и высокопустотных материалов изделия с достаточно высокой несущей способностью [108].

Анализ применяемых в современном строительстве ограждающих конструкций, содержащих в своем составе кладку из автоклавных газобетонных блоков, а также анализ литературы, касающейся так или иначе эксплуатационных характеристик ячеистых бетонов и прочностных свойств каменной кладки, показывает, что некоторые технические решения, использующие автоклавный ячеистый бетон марок по средней плотности ниже D500, не обоснованы предварительными исследованиями. Средняя плотность выпускаемого в России автоклавного газобетона снизилась за последние 15 лет почти на  $100 \text{ кг/м}^3$  - с более чем  $610 \text{ кг/м}^3$  в середине 1990-х гг. до менее чем  $520 \text{ кг/м}^3$  в 2011 году. Выпуск газобетона марок по средней плотности D400 и ниже превысил 600 тыс. м<sup>3</sup> в год.

Поскольку до 2009 года такие бетоны классифицировались по ГОСТ 21520-89 Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие. Технические условия, как теплоизоляционные, исследования прочностных и деформативных свойств конструкций из автоклавного ячеистого бетона проводились на материалах марок по средней плотности не ниже D500. Большой объем данных по несущей способности ячеистобетонных конструкций основан на изучении ячеистых бетонов марки по средней плотности D600. При этом данные о прочностных характеристиках ячеистых бетонов марки D400 и ниже, как правило, содержат только информацию о кубиковой и призмочной прочности бетона.

Несущая способность анкерных креплений в ячеистом бетоне исследована применительно к закладным деталям армированных конструкций. Исследована несущая способность забивных нагелей при

работе перпендикулярно оси установки в ячеистых бетонах плотностью 600 кг/м<sup>3</sup> и более. Есть современные работы, рассматривающие анкерный крепеж в газобетоне марок D500 и D600 в зависимости от влажности материала и вида крепления. Применение в качестве основания для анкерного крепежа автоклавного газобетона марки D400 не рассмотрено, корреляция между плотностью бетона и несущей способностью анкеров в явном виде в рассмотренной литературе не показана.

Широко исследованы теплофизические характеристики газобетона низких плотностей. Теплопроводность, сорбционная влажность, прогнозируемая влажность в различных видах конструкций с применением в том числе и газобетона марки по средней плотности D400 являются объектами современных исследований, проводимых как в нашей стране, так и за рубежом. Однако российские исследования проводились только на образцах материала, поскольку практически отсутствовали эксплуатируемые здания с ячеистым бетоном марки D400 в качестве единственного конструкционно-теплоизоляционного слоя. Большинство эксплуатируемых зданий с однослойными конструкциями из ячеистых бетонов, построены с применением марок по плотности D600 и выше, полученные при их обследовании данные требуют проверки применимости к низким плотностям.

При рассмотрении конструктивных решений наружных ограждений отапливаемых зданий, используемых в практике современного строительства, нами выявлены три основных группы функций, выполняемых кладкой из газобетонных блоков.

Во-первых, это функция несущей конструкции, выполняемая кладкой преимущественно в малоэтажном строительстве, где газобетон марки D400 (в сочетании с материалом растворного шва) выступает зачастую единственным материалом, осуществляющим передачу нагрузок от перекрытий и покрытий на фундамент. Для несущей каменной кладки важны данные по ее прочности и деформативности.

Во-вторых, это теплоизолирующая функция, выполняемая кладкой из теплоизоляционно-конструкционного материала, который часто является единственным материалом в конструкции, обладающим значимым термическим сопротивлением. Для выполнения функции единственного теплоизолятора, основным материал кладки должен обладать не только определенной теплопроводностью, а сама кладка определенным коэффициентом теплотехнической однородности, но должен также выдерживаться определенный влажностный режим эксплуатации — при работе конструкций должно происходить высыхание газобетона от начальной послеавтоклавной до установившейся равновесной влажности, в дальнейшем сезонные колебания влажности не должны выходить из нормативно ограниченного диапазона.

В-третьих, это функция внутреннего слоя многослойных конструкций, в которых кладка из газобетона служит основой для закрепления навесных облицовок или облицовок, закрепляемых к внутреннему слою стены для обеспечения устойчивости лицевой кладки. Для понимания применимости материала в качестве основания для механического закрепления навесных и приставных элементов нужны данные о несущей способности устанавливаемого в него крепежа.

Таким образом, сопоставляя сведения о газобетоне марки по средней плотности D400, полученные из литературных источников, с выводами о факторах и характеристиках, значимых для оценки пригодности материала к выполнению им возлагаемых на него в современном строительстве функций, мы приходим к выводу, что для обоснования возможности использования автоклавных ячеистых бетонов марки по средней плотности D400 необходимо провести ряд исследований.

## 2.2. Характеристики применяемого сырья и материалов

В производстве газобетона автоклавного твердения в качестве основного вяжущего вещества используют известково-кремнеземистое вяжущее, включающее в себя 67% извести и 33% молотого кварцевого песка, с удельной поверхностью 3500 см<sup>2</sup>/г; в качестве вяжущего предварительного твердения – портландцемент марка ЦЕМ I 42,5 Н без минеральных добавок; заполнитель в виде песчаного шлама с удельной поверхностью не ниже 2700 см<sup>2</sup>/г и плотностью 1680 -1720 кг/м<sup>3</sup>; регулятор скорости схватывания смеси г гипс сыромолотый, с содержанием гипса (CaSO<sub>4</sub> × 2H<sub>2</sub>O) не менее 80% и влажностью не более 1%; газообразователь - алюминиевая паста с содержанием активного алюминия не менее 92%, твердых веществ не менее 70 – 75%, тонкостью помола – проход через сито 71 мкм – не менее 99%.

Для исследования и оптимизации состава модифицированного активной минеральной добавкой и микроволокном автоклавного газобетона в исследовании применялись следующие материалы:

### Известь

Строительная известь в соответствии с ГОСТ 9179-77. Межгосударственный стандарт. "Известь строительная. Технические условия" (утв. и введен в действие Постановлением Госстроя СССР от 26.07.1977 N 107) (ред. от 01.03.1989) в зависимости от условий твердения подразделяется на воздушную, обеспечивающую твердение строительных растворов и бетонов и сохранение ими прочности в воздушно-сухих условиях, и на гидравлическую, обеспечивающую твердение строительных растворов и бетонов и сохранение ими прочности как на воздухе, так и в воде.

Воздушную негашеную известь, применяемую при производстве автоклавного газобетона в зависимости от содержания в ней окислов кальция

и магния подразделяют на кальциевую, магниальную и доломитовую. Применяемая для исследования известь получена из известняка Добрятинского месторождения Владимирской области, химический состав которого представлен таблице 2.1, относится к кальциевой:

Таблица 2.1. Химический состав исходного известняка

Позиция	Содержание, %
Потери при прокаливании ( $H_2O+CO_2$ )	43,72.
Содержание двуокси кремния ( $SiO_2$ )	1,71.
Содержание суммы полторных и других окислов ( $Fe_2O_3+Al_2O_3+TiO_2+Mg_3O_4+P_2O_5$ )	0,62
Содержание $SO_3$	0,7
Содержание оксида магния ( $MgO$ )	4,76.
Содержание оксида кальция ( $CaO$ )	48,87
Сумма	99,75

Строительную негашеную известь по времени гашения подразделяют на быстрогасящуюся - не более 8 мин, среднегасящуюся - не более 25 мин, медленногасящуюся - более 25 мин. Строительную известь следует изготавливать в соответствии с требованиями настоящего стандарта по технологическому регламенту, утвержденному в установленном порядке.

Негашёная известь является полупродуктом для получения известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ). Для производства ИКВ ее применяют в гашёном виде, то есть предварительно превращают в гидратную известь (пушонку) или в известковое тесто. Гидратная известь – высокодисперсный сухой порошок, получаемый гашением комовой или молотой негашёной извести соответствующим количеством жидкой или парообразной воды, обеспечивающим переход оксидов кальция и магния в их гидраты. Гидратная известь состоит преимущественно из гидроксида кальция  $Ca(OH)_2$ , а также

гидроксида магния  $Mg(OH)_2$  и небольшого количества примесей (как правило, карбоната кальция). Известковое тесто - продукт, получаемый гашением комовой или молотой негашёной извести водой в количестве, обеспечивающем переход оксидов кальция и магния в их гидраты и образование пластичной тестообразной массы. Выдержанное тесто содержит обычно 50-55% гидроксидов кальция и магния и 50-45% механически и адсорбционно связанной воды. Основная операция при получении этих видов извести – гашение. Оно заключается в обработке извести водой. Обычно при гашении идёт самопроизвольный распад кусков извести на тонкодисперсные частички размером не более 5-20 мкм.

В исследовании применялась известь строительная воздушная гидратная (гашеная) таблица 2.2:

Таблица 2.2. Состав гидратной извести

Позиция	Содержание, %
Содержание активных CaO и MgO	до 70
Влажность	0,8
Содержание $Ca(OH)_2$	95
Остаток на сите № 02	не более 0.8.
Остаток на сите № 008	не более 6,0

Песок.

Для производства газосиликатных блоков как компонент вяжущего, так и в качестве заполнителя применяется песок в соответствии с ГОСТ 8736-2014. Межгосударственный стандарт. "Песок для строительных работ. Технические условия" (введен в действие Приказом Росстандарта от 18.11.2014 N 1641-ст).

В исследовании использовались пески карьеров ивановской области, химический состав проб которых, представлен в таблице 2.3, приложение 1:

Таблица 2.3. – Химический состав песков

№ пробы	Содержание, %								
	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> несвяз.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Потери при прокаливании
1	90,96	76,10	1,33	0,30	0,56	1,60	2,00	0,15	3,10
2	89,57	81,24	2,77	0,50	0,55	2,43	3,15	0,25	0,78
3	77,52	68,24	5,61	0,50	1,25	5,11	4,33	0,29	5,39

Так как непосредственно, без переработки песок не применяется, а используется в виде тонкомолотого наполнителя в ИКВ и в качестве заполнителя в шламе, после мокрого помола, то предпочтение отдавалась пробе имеющего наибольшее количество несвязанного кремнезема и низкого содержания алюминатных соединений, которые негативно отражаются на продуктах гидротермального синтеза. В дальнейших исследованиях использовался песок пробы № 2, карьера Тейковского района Ивановской области. Гранулометрический состав не читывался по вышеприведенным причинам.

#### Цемент.

Портландцемент применяемый в качестве вяжущего предварительного твердения, должен соответствовать ГОСТ 31108-2003 "Цементы общестроительные. Технические условия" (введен в действие Постановлением Госстроя РФ от 21.06.2003 N 93).

В исследовании использовался портландцемент производства ОАО «Мордовцемент», с характеристиками, представленными в таблице 2.4 и в паспорте Приложение 2:

Таблица 2.4 – Характеристики портландцемента ЦЕМ I – 42,5 Н

Позиция	Значение
Нормальная густота цементного теста, %	25,75
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	338
Содержание технологических добавок, %	Нет
Начало схватывания, (мин)	140
Массовая доля щелочных оксидов R <sub>2</sub> O, %	0,77
Содержание оксида магния MgO, %	1,37
Содержание оксида серы (IV) SO <sub>3</sub> ,	2,71
Содержание хлор - иона Cl <sup>-</sup> , %	0,003
Средняя активность при пропаривании, МПа	39,7
Прочность на сжатие в возрасте 3/28 суток за предыдущий месяц, МПа	33,2/53,8
Признаки ложного схватывания	нет
Группа по эффективности пропаривания	первая
Значение удельной эффективной активности естественных радионуклидов, Бк/кг	73±11
C <sub>3</sub> S (трехкальциевый силикат),%	60,83
C <sub>2</sub> S (двухкальциевый силикат),%	16,25
C <sub>3</sub> A (трехкальциевый алюминат),%	7,21
C <sub>4</sub> AF (четырекальциевый алюмоферрит), %	12,45

Гипс.

Двуводный гипс используется при производстве автоклавного газобетона на этапе смешения и вспучивания, как добавку регулируемую сроки схватывания вяжущего предварительного твердения. В исследовании использовался гипс сыромолотый производства ООО «Сандинский

гипсоперерабатывающий комбинат», 453300, Республика Башкортостан, г. Кумертау, ул.2-й переулк Советский.

Примененный гипс сыромолотый изготавливается предприятием ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат» согласно требованиям ТУ 5743-001-88100376-2013 способом размола и сушки гипсового камня фракции от 0 до 10 мм. Камень гипсовый добывается предприятием ООО «Сандин» в процессе разработки Сандинского месторождения (Кююргазинский район), расположенным в 9.0 км юго-западнее с. Ермолаево Кююргазинского района Республики Башкортостан и поставляется предприятию ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат».

Санитарно-эпидемиологическая экспертиза гипса сыромолотого проводилась на соответствие Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) (Глава II Раздел 11. «Требования к продукции, изделиям, являющимся источником ионизирующего излучения, в том числе генерирующего, а также изделиям и товарам, содержащим радиоактивные вещества»), СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

По результатам проведенных исследований проб гипса сыромолотого гамма-спектрометрическим методом в соответствии с требованиями ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные», установлено, что анализируемые пробы относятся к материалам 1 -го класса (эффективная удельная активность составляет  $22,1 \pm 8,0$  Бк/кг и не превышает 370 Бк/кг) и данный материал может быть использован согласно области применения для производства строительных материалов, применяемых во всех видах строительства.

Основные характеристики применяемого двухводного гипса приведены в таблице 2.5. и приложении 3.

Таблица 2.5 – Характеристики сыромолотого двухводного гипса

Позиция	Значение
Содержание гидратной воды, %	17,42
Содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , %	83,24
Влажность, %	0,36
Степень помола (остаток на сите 0,2 мм), %	5,84

#### Фибра целлюлозная

В исследовании в качестве армирующего волокна использовались щелочестойкие натуральные целлюлозные волокна "Армоцель". Они позволяют оптимизировать и улучшить, технологические и физико-механические свойства как конечного продукта, так, что наиболее важно с точки зрения снижения брака, промежуточного вспученного сырца.

Волокна микроцеллюлозы (МКЦ) - низкомолекулярные, что позволяет им равномерно распределяться в смеси, и не агрегировать на лопостях высокоскоростного смесителя, применяемого в производстве газобетона. Длина волокна составляет от 20 мкм до 2500 мкм, диаметр волокна примерно 25 мкм, насыпной вес каждого сорта 25-250 г/л, устойчивость к температурам — до 220°C.

Целлюлозная добавка позволяет структурировать систему путем образования трехмерного каркаса волокна с низкой степенью расслаиваемости смеси и стабильностью свойств. Также содействует высокому сцеплению в не затвердевшем положении и большой тексотропности - не происходит смещение в вертикальной плоскости, более устойчивая газомасса.

## Кремнеземистый модификатор

В качестве кремнеземистого модификатора, позволяющего направленно синтезировать низкоосновные гидросиликаты кальция повышенной прочности и стойкости использовалась ультрадисперстная добавка, в качестве которой выступал микрокремнезем (МК).

Микрокремнезем (microsilica, silica fume) нашел широкое применение в строительной индустрии Европы, Америки и Азии с вовлечением его в бетоны нового поколения.

Первоначальный интерес к применению микрокремнезема в бетонах был обусловлен проблемами охраны окружающей среды и усиленным контролем загрязнения атмосферы, а также необходимостью экономии энергии в промышленности строительных материалов за счет частичной замены цемента промышленными отходами. Первый опыт применения МК в бетоне отмечен в 1971 г. на металлургическом заводе Фиско в Норвегии. При этом, наряду с возрастанием водопотребности растворов и бетонов в присутствии МК, отмечалось увеличение прочности, возможность экономии цемента и др.

Примененный в исследовании МК производства ОАО "Кузнецкие ферросплавы" представляет собой очень мелкие шарообразные частички аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью около 20 м<sup>2</sup>/г. Гранулометрический состав МК ОАО "Кузнецкие ферросплавы" приведен в таблице 2.6:

Таблица 2.6. - Гранулометрический состав микрокремнезема

Фракция, мкм	2,0	2-2,36	2,6-3,4	3,4-5,4	5,4-8,3	8,3-15,3	15,3-20,0	20,0-46,3
Содержание, % масс.	0,07	1,01	0,86	1,37	1,41	2,66	1,0	1,06

По гранулометрическому составу размер большинства частиц МК не превышает 1 микрона, а средний размер частиц составляет около 0,1 микрона, т.е. примерно в 100 раз меньше среднего размера зерна цемента.

Частицы МК могут агломерировать в агрегаты размерами до 0,5 мкм.

Плотность МК в естественном состоянии составляет около 2,2 г/см (портландцемента - 3,1 г/см<sup>3</sup>), а объемная плотность в рыхлом состоянии - 130-430 кг/м<sup>3</sup> (цемента - 1500 кг/м<sup>3</sup>).

Насыпной вес микрокремнезема зависит от степени его уплотнения и составляет:

- в неуплотненном состоянии - 0,17-0,20 т/м<sup>3</sup>;
- в уплотненном состоянии - 0,35-0,80 т/м<sup>3</sup>.

Угол естественного откоса МК составляет:

- в неуплотненном ("природном") состоянии - 75-80°;
- в уплотненном состоянии - 25-30°.

Значение показателя рН водной суспензии МК предприятия составляет:

- по данным ОАО "Кузнецкие ферросплавы", в среднем - 7,74;
- по данным "Tomoe Engineering Co., Ltd." (Япония) - 8,1-8,4.

Свойства микрокремнезема исследовались в химико-аналитической лаборатории ОАО "Кузнецкие ферросплавы", в лабораториях фирм: "Pechiney" и "MicroPul France" (Франция), "Эйва Трейдинг" и "Tomoe Engineering Co., Ltd." (Япония), ОАО "Кузнецкий цементный завод", Западно-Сибирский испытательный центр" (г. Новокузнецк).

#### Газообразователь

Обычно в качестве газообразователя применяют в виде порошка (алюминиевая пудра ПАК-3), с содержанием активного алюминия не менее 95%. В настоящем исследовании применялся газообразователь в виде пасты пасты на основе диэтиленгликоля производства компании Schlenk Metallic Pigments GmbH

Одним из основополагающих принципов при выборе газообразователя для производства ячеистого бетона являлся учет возможных недостатков и поиск оптимального варианта в отношении протекания процесса вспучивания и влияние на структуру конечного продукта.

Важным свойством алюминиевых паст и порошков является их воздействие на процессы вспучивания и схватывания газобетона. В сертификатах испытаний поставщиков газообразователей указаны различные параметры продукции, которые подходят в качестве газообразователя. Однако установить связь между параметрами используемых типов алюминия и их воздействием на процесс образования ячеистого газобетона довольно сложно, т.к. для этого требуется специальное оборудование, позволяющее провести тщательные исследования.

Продукция компании Schlenk Metallic Pigments примененной в исследовании подтверждает качество своей продукции сертификатом, который прилагается к каждой поставке алюминиевой пасты или порошка. В сертификате качества представлены свойства продукции на основании стандартного или расширенного набора параметров тестирования. К сертификату испытаний с расширенным набором параметров прилагается графический анализ кинетики газовыделения. (Пример сертификата качества с расширенным набором параметров представлен в приложении 4).

### **2.3. Методика исследования**

Основными методами разработки, оптимизации и исследования ячеистого бетона, как и обычных бетонов, является проведение экспериментов согласно инструкций разработанных профильными. Однако подбор ячеистого бетона на основе выбранных компонентов включает в себя необходимость отдельной разработки методов модификации вяжущего и исследование его свойств, а также оптимизация поровой структуры бетона,

что значительно увеличивает число экспериментов. Поэтому остро встает вопрос эффективности и оптимальности эксперимента.

Для увеличения эффективности разработки и исследования кремнеземистого вяжущего применяются экспериментально-статистические методы, с помощью которых составляют математическую модель, изучая зависимость отклика системы на изменения входных параметров, с учетом возможных неконтролируемых, случайным образом изменяющихся параметров — “шумов” объекта [110-112].

Математической моделью служит функция отклика (выход), связывающая выходной параметр, характеризующий результат эксперимента, с переменными (факторами), которые варьируются при проведении опытов. При использовании статистических методов математическая модель процесса часто представляется в виде полинома: отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция. Анализ полученного полинома, дает возможность судить об оптимальности состава вяжущего [110-102].

Эффективность экспериментов в большой степени зависит от методов их проведения. Различают пассивный и активный эксперименты. Пассивный эксперимент является традиционным методом, когда ставится большая серия опытов с поочередным варьированием каждой из переменных. К пассивному эксперименту относится так же, сбор исходного статистического материала в режиме нормальной эксплуатации на промышленном объекте. Обработка опытных данных для получения математической модели проводится статистическими методами. Методы математической статистики позволяют в этом случае извлечь максимум информации из имеющихся экспериментальных данных — оптимизировать процедуру обработки и анализа эксперимента. Используя активный эксперимент (планирование эксперимента), можно достичь существенно большего — оптимизировать и стадию постановки эксперимента [110, 112-113]

Планирование эксперимента — это оптимальное управление экспериментом в условиях неполной информации о механизме процесса. Теоретические основы и описание практических методов представлены в специальной литературе и разработанных на их основе инструкциях [110-114].

Экспериментальные исследования проводились с применением D-оптимальных планов типа  $2^n+2n+1$ . В нашем случае общий вид для двухфакторного эксперимента ( $n=2$ ) приведен в табл. 2.7.

Таблица 2.7. - Матрица планирования эксперимента

№ п/п	Матрица планирования			Результаты экспериментальных исследований				
	X1	X2	X1·X2	$\varphi_k$	$X_R$	$S_2^2$	$Y_R$	$X_R \cdot Y_R$
1	+	+	+	Заполняется в соответствии с экспериментальными результатами				
2	-	+	-					
3	+	-	-					
4	-	-	+					
5	$+\alpha$	0	0					
6	$-\alpha$	0	0					
7	0	$+\alpha$	0					
8	0	$-\alpha$	0					
9	0	0	0					

В каждой точке плана экспериментальные исследования повторяются не менее 3 раз. Для снижения отрицательного влияния случайных факторов, т.е. для повышения надежности экспериментальных результатов порядок проведения опытов устанавливается методом рандомизации. Плечо, так

называемых, звездных точек ( $\alpha$ ), устанавливается в зависимости от количества варьируемых факторов (при  $n=2$ ,  $\alpha=1$ , а при  $n=3$ ,  $\alpha=1,21$ ).

Дисперсию ( $S_i^2$ ) параллельных исследований принимают при определении доверительного интервала, с дисперсной адекватности ( $S_{ад}^2$ ) при оценке соответствия математической модели реальному процессу.

Взаимосвязь между значениями  $i$ -го фактора в натуральном и кодированном виде вычисляется по формуле:

$$x = (\bar{X} - X_{i3}) / \Delta X_{i3} \quad (2.1)$$

где  $\bar{X}_i, X_{i3}$  - натуральные и средние значения параметров  $i$ -го фактора;  $\Delta X_i$  - интервал варьирования, соответственно  $i$ -го фактора.

Примечание: кодированное значение  $i$ -го фактора ( $X_i$ ) – произведено в интервале от 1 до -1.

Основной задачей математического планирования является обработка результатов экспериментальных данных и нахождение зависимости вида:

$$Y_1 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 \quad (2.2)$$

где  $b_i$  – коэффициент, величина которого определяется в зависимости от выбранных методик.

Величину расчетных коэффициентов устанавливают методом сравнения с доверительным интервалом ( $\Delta b$ ), определенным из суммарной дисперсии параллельных опытов и табличных значений критерия ( $\tau$ )

Стьюдента. В тех случаях, когда определенный расчетным путем коэффициент по своей абсолютной величине оказывается меньше значения доверительного интервала, то этот коэффициент рассматривается как ничтожный и приравняется к нулю.

Адекватность полученных математических моделей полиномов проверяют путем расчета величины дисперсии. Адекватность и сравнение соответствующего расчетного значения с применением ( $F_p$ ) с учетом табличных значений  $F_T$ .

В случае, когда  $F_p < F_T$  модель считают адекватной реальному переносу со степенной точностью.

Оптимизация варьирующих параметров ( $X_1 \dots X_i$ ) заключается в определении областей их изменения, обеспечивающих получение желаемых результатов ( $Y_k$ ). В данной работе использовали два основных параметра оптимизации, ограничение результатов и поиск экстремума. Этот экстремум должен соответствовать вариантам анализа математической модели. Они представлены следующими зависимостями:

$$f(X_1 X_i) = \text{заданная величина фактора } Y_k \quad (2.3)$$

$$dY_k/dX_i = df(X_1, X_i)/dX_i = 0 \quad (2.4)$$

$$dY_k/dX_j = df(X_i, X_j)/dX_j = 0 \quad (2.5)$$

Степень и направление варьируемых факторов, и их влияние на результат оценивали по абсолютной величине коэффициента (b), стоящий перед кодированным значением фактора и знаку коэффициента.

Интерполяция результатов оптимизации и полученных математических моделей осуществлялось с применением специальных компьютерных программ или путем построения номограмм, позволяющих решать инженерные задачи.

Достоверность полученных экспериментальных данных при определении свойств исследуемого материала определялись с применением статических методов контроля. Часть наблюдений были необходимы для получения достоверных результатов при исследовании свойств исследуемого материала. Как правило, оно определяется соответствующими ГОСТами и стандартами. В случае, когда число наблюдений не нормируется или если определяются параметры технологии, то применяется формула из области вариационной статистики, а именно:

$$n = \frac{v^2 t^2}{\rho^2}, \quad (2.6)$$

где  $n$  – число наблюдений;  $t$  – показатель достоверности результатов (для керамических материалов  $t=1,95$  при вероятности  $0,95$ ;  $\rho$  – показатель точности, обычно этот показатель составляет  $5\%$ ;  $V$  – вариационный коэффициент, представляющий собой относительный показатель изменчивости того или иного свойства исследуемого материала и вычисляемое из равенства:

$$V = \frac{100\sigma}{A}, \quad (2.7)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение результатов;  $A$  – среднее арифметическое отклонение.

С применением уравнений (2.6) было рассчитано необходимое количество экспериментальных наблюдений. Оно составляло не менее трех экспериментальных наблюдений, которые имели место в данной работе. Статическая обработка экспериментальных результатов проводилась с использованием метода наименьших квадратов [110].

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЕЖПОРОВОЙ ПЕРЕГОРОДКИ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА.**

Целью данного этапа исследования является разработка составов и изучение зависимости основных физико-механических свойств автоклавного газобетона от расхода компонентов и их качественных характеристик. Компонентами такого бетона приняты материалы приведенные в главе 2 настоящего исследования.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных разработке газобетонов, проектирование его состава является одним из самых важных и непростых этапов. В результате подбора состава должно быть определено рациональное отношение между применяемыми материалами, которое обеспечивает необходимую подвижность смеси, прочность с учетом технологии изготовления, долговечность и экономичность. При этом надо учитывать, что выходные характеристики смеси являются случайной величиной некоторого диапазона, зависящей от многих качественных и количественных факторов, часть из которых не всегда может быть выявлены и управляемы в ходе эксперимента или производства. В связи с этим, были применены пассивное и активное планирование экспериментов и математико-статистическая обработка полученных экспериментальных данных, получившие в последнее время широкое применение, позволяющие, в сравнении с традиционными методами, сократить число необходимых опытов, быстро выявить оптимальный вариант, описать языком математики существующие зависимости между компонентами смеси и ее свойствами.

В данной части работы были использованы математико-статистические методы, такие как дисперсионный и регрессионный анализы, Т-тест и планирование экстремальных экспериментов [110-114]. Для этого использовали: пакет приложений статистических программ к

электронным таблицам “Excel”, статистические программы “IBM SPSS 23” и “Statistica 10.0”, а так же математические программf “Mathcad 2014 Pro”. Это позволило получить математические модели зависимости физико-механических свойств газобетона от состава смеси.

### **3.1. Модификация известково-кремнеземистого вяжущего активными минеральными добавками**

Прочностные свойства межпоровой перегородки определяются количеством образовавшихся гидросиликатов на микроуровне системы: известково-кремнеземистое вяжущее – наполнитель, гидросиликаты кальция серии CSH(B) по реакции  $n\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} = n\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Объем синтезированного гидросиликата кальция, в свою очередь, зависит от суммарной поверхности раздела фаз (3.1) кварцевой составляющей с известью, от продолжительности воздействия и величины давления водяного пара, состава исходного сырья и соотношения компонентов [115-116].

$$S_f = C_f S_{sp}, \quad (3.1)$$

где  $C_f$  – количество наполнителя кремнеземистой составляющей, кг;

$S_{sp}$  – удельная поверхность кремнеземистой составляющей, м<sup>2</sup>/кг.

Однако у существующих предприятий имеются серьезные ограничения технологических возможностей управления множеством перечисленных факторов, поэтому приходится оперировать такими управляющими воздействиями, которые существенно не нарушали бы принятый технологический процесс, но обеспечивали бы при этом рост целевого свойства. Так при анализе дескрипторов технологического процесса на Ивановском ООО «Газобетон», оборудованным автоматизированными линиями WKB Systems GmbH (Германия), были выявлены ограничения по таким основным технологическим факторам, как дисперсность

кремнеземистого заполнителя (прямого и обратного шламов), режима автоклавирования, подвижности газобетонной смеси на стадии вспучивания. Кроме того, значимо ограничивает в возможностях жесткая привязка к поставщикам ряда компонентов – кварцевого песка, известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) и газообразователя фирмы Schlenk Metallic Pigments GmbH [115].

Предварительный анализ данных испытаний образцов газосиликата показал, что значимыми факторами, при воздействии на которые можно эффективно управлять основными показателями – прочностью (R) и плотностью бетона ( $\gamma$ ) без нарушения существующих параметров производства, являются удельная поверхность (x) и расход известково-кремнеземистого вяжущего ( $y_1$ ), уравнения (3.2) и (3.3), рис. 3.1-3.2, а также водотвердое отношение ( $y_2$ ) при постоянной подвижности смеси, уравнения (3.4) и (3.5), рис. 3.3-3.4. Увеличение расхода вяжущего и его удельной поверхности ведет к увеличению прочности и плотности газосиликата. Сложнее зависимость прочности и плотности при сочетании факторов удельная поверхность – водотвердое отношение. Так влияние фактора удельной поверхности вяжущего становится минимальным, а наиболее значимым становится водотвердое отношение. В натуральном выражении это сводится к тому, что оптимальным значением водотвердого отношения является 0,48-0,50.

$$R=0,89+0,143x+0,19y_1+0,05x^2+0,29xy_1+0,23y_1^2 \quad (3.2)$$

$$\gamma =428,86+115,02x+163,74y_1+36,81x^2+139,56y_1^2+241,59xy_1 \quad (3.3)$$

$$R=0,678+0,54x-0,69y_2-0,51x^2-0,53y_2^2+1,36xy_2 \quad (3.4)$$

$$\gamma=358,09+81,11x-70,61y_2+68,64x^2-45,33y_2^2-22,38xy_2 \quad (3.5)$$

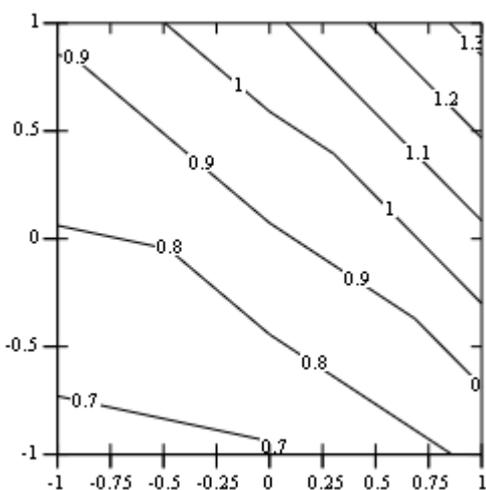


Рис. 3.1. Зависимость прочности от удельной поверхности (x) и расхода известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) ( $y_1$ )

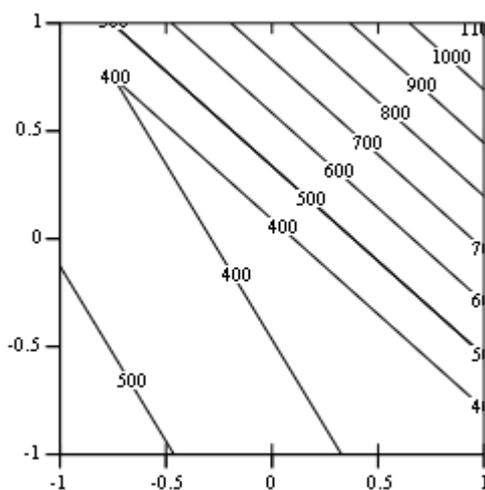


Рис. 3.2. Зависимость плотности от удельной поверхности (x) и расхода известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) ( $y_1$ )

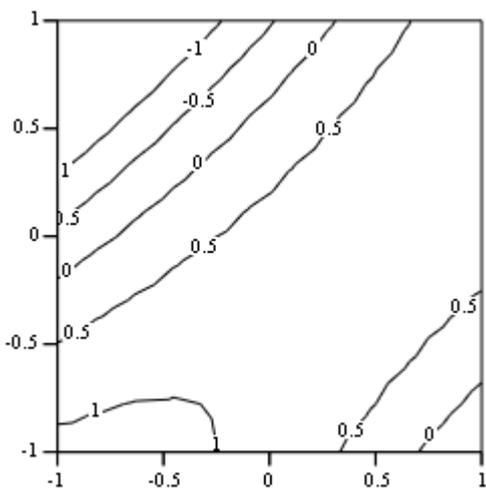


Рис. 3.3. Зависимость прочности от удельной поверхности (x) и водотвердого отношения ( $y_2$ )

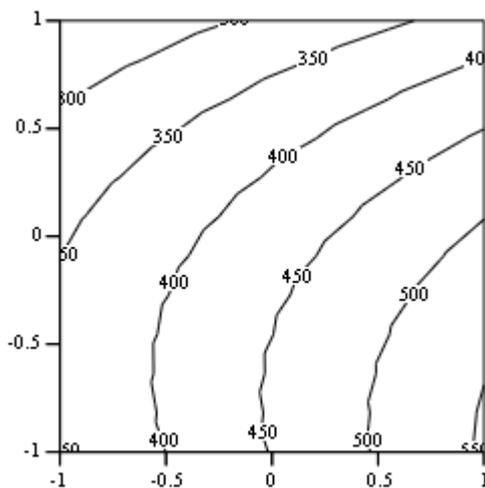


Рис. 3.4. Зависимость плотности от удельной поверхности (x) и водотвердого отношения ( $y_2$ )

Свойства прочности и плотности линейно связаны между собой с обратным значением корреляции, что налагает ограничение на возможность экстенсивного увеличения прочности за счет увеличения расхода вяжущего в системе. Это выражается в том, что даже при увеличении расхода

известково-кремнеземистого вяжущего рост прочности идет медленнее, чем нарастание плотности, что заметно снижает эффективность такого решения.

Более эффективным будет управление качественными характеристиками вяжущего – удельной поверхностью, а стало быть, ростом площади границы фаз (3.1), а также активностью. Учитывая фиксированность свойств известково-кремнеземистого вяжущего, поставляемого на предприятие, управление качественными характеристиками ИКВ может быть осуществлено за счет его модификации микрокремнеземом (МК), обладающим высокой удельной (порядка 20000 см<sup>2</sup>/г) поверхностью и активностью за счет аморфной структуры.

Таблица 3.1. - Зависимость свойств бетонной смеси и газосиликата от расхода микрокремнезема

№ опыта	Расход микрокремнезема от массы сухих компонентов исходной смеси	Подвижность	Плотность	Прочность
	%			
1	0,000	165,000	465,000	1,100
2	0,500	163,000	490,000	1,970
3	1,000	157,000	504,000	2,160
4	3,000	145,000	606,000	2,400
5	5,000	136,000	641,000	2,440
6	7,000	122,400	681,600	2,350
7	10,000	110,800	728,400	2,100
8	15,000	99,200	775,200	1,500

Были проведены поисковые эксперименты, которые показали эффективность такой модификации, табл. 3.1. Заметен значительный рост прочности образцов близкой плотности уже при минимальных значениях расхода модификатора – до 1%, рис 3.5. Однако при больших значениях

расхода МК отмечается рост плотности за счет снижении подвижности при практически фиксированной прочности.

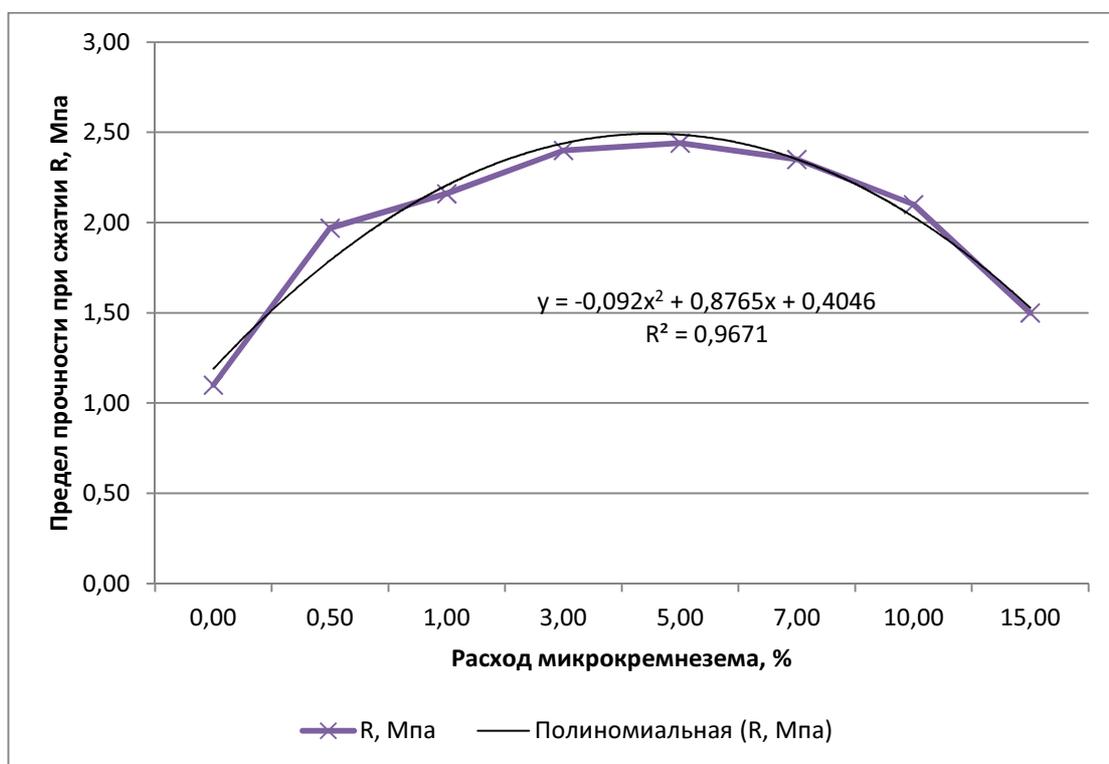


Рис. 3.5. Зависимость прочности газосиликата, от расхода микрокремнезема

Таким образом, может быть признана эффективной модификация известково-кремнеземистого вяжущего 1% микрокремнезема, что позволяет без значительно снижения реологических и плотностных свойств газосиликата повысить его прочность на 75-90%. Дальнейшая оптимизация требует регулирования подвижности смеси, за счет применения водоредуцирующих добавок и оптимизации расхода газообразователя.

Учитывая, что вяжущим предварительно твердения в газобетоне является портландцемент, то необходимо изучить механизм влияния микрокремнезема на свойства вспученной массы до автоклавной обработки и в частности на реологические свойства.

Минеральная добавка считается тем активнее, чем больше она поглощает извести из ее водного раствора за определенный промежуток времени. При одинаковом поглощении извести различными добавками активнее считается та, которая имеет большую скорость поглощения в начальный период.

Кинетика связывания СаО различными минеральными добавками из насыщенного известкового раствора приведена на рис.3.6.

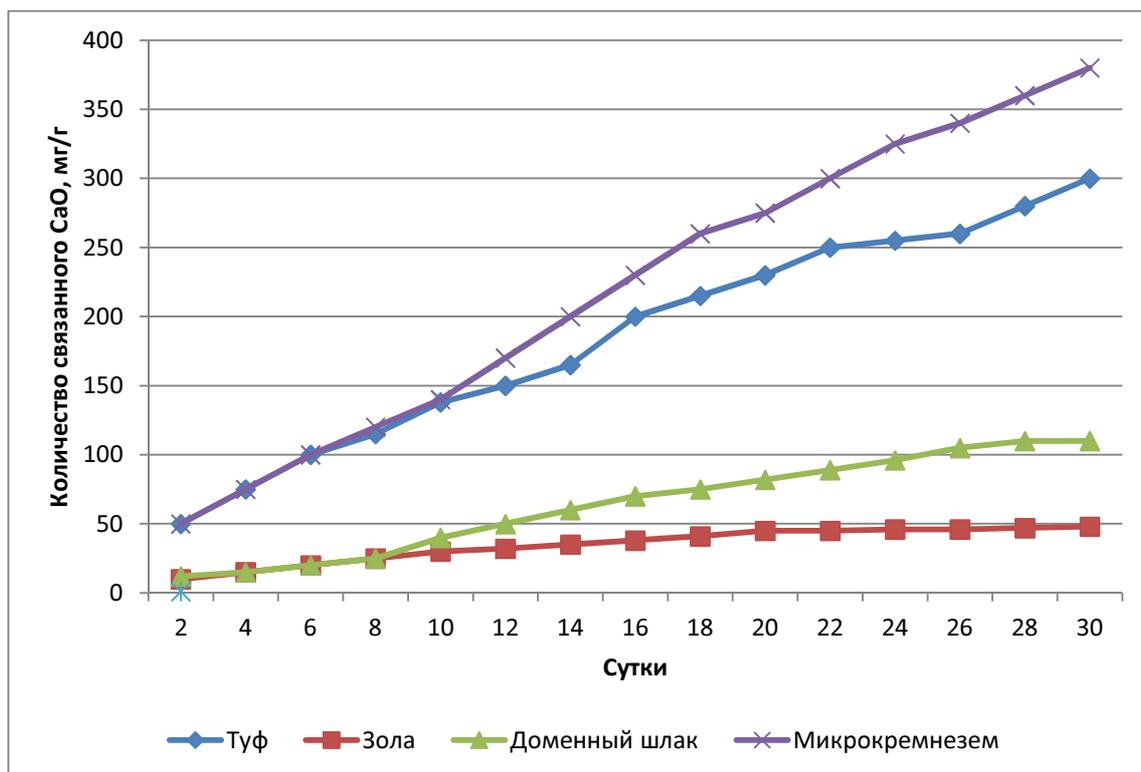


Рис.3.6. Кинетика связывания СаО из насыщенного известкового раствора различными минеральными добавками

Как следует из приведенных данных, микрокремнезем наиболее интенсивно связывает СаО из раствора по сравнению с другими добавками. Высокореакционный природный пуццолановый материал - цеолитовый туф - за 30 суток связывает СаО на 23% меньше. Другие материалы: доменный шлак и особенно зола, поглощают известь значительно менее интенсивно.

Весьма мелкий гранулометрический состав и значительная удельная

поверхность зерен аморфного кремнезема обуславливают высокие пуццолановые свойства и позитивное влияние МК на свойства бетона. Кремнезем в таком виде легко вступает в химическую реакцию с гидроокисью кальция, высвобождаемой в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH в результате реакции:



Эта вновь образовавшаяся фаза CSH характеризуется меньшим отношением C/S (0,9-1,3, даже до 1,4), чем CSH в результате гидратации цемента, причем это соотношение уменьшается с увеличением дозировки МК. Как следствие, она обладает способностью присоединять другие ионы, особенно щелочи, что имеет существенное значение в связи с применением МК для уменьшения расширения, вызванного реакциями между щелочами и заполнителем.

Взаимодействие частиц МК с продуктами гидратации цемента начинается на ранних стадиях и практически заканчивается в возрасте 28 сут. Силикатный гель, образующийся в начальный период гидратации, в дальнейшем переходит в различные морфологические типы CSH, что и является фактором повышения прочности бетонов с МК.

При твердении в нормальных условиях указанная реакция протекает, главным образом, в период от 7 до 14 сут. При повышенных температурах (не более 100°C) взаимодействие SiO<sub>2</sub> и CaO может полностью заканчиваться в процессе тепловлажностной обработки.

При автоклавной обработке введение в состав смеси ультрадисперсного МК в количестве 10% массы кремнеземистого компонента приводит к изменению фазового состава цементного камня, увеличению на 30-40% количества кристаллов низкоосновных гидросиликатов и соответственно контактов между ними в единице объема

материала.

Пуццолановые свойства МК обеспечивают получение хорошо закристаллизованного C-S-H I через 7 дней твердения при 38°C. Изучение термогравиметрическим методом показало, что в твердеющем цементном камне МК уменьшает количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  от 33 до 5% при увеличении дозировки МК от 0 до 20% от массы цемента.

Удельное тепловыделение микрокремнезема в цементной пасте такое же или несколько выше по сравнению с цементом, наблюдается увеличение экзотермичности реакции. Прирост прочности от применения МК в бетоне выше, чем в цементном камне.

Второй фактор - физический, способствующий уплотнению структуры цементного теста и камня - заполнение пространства между частицами цемента в тесте и продуктами гидратации в цементном камне ультрадисперсными частицами МК.

Связывая свободную известь и уплотняя цементный камень, МК способствует повышению его коррозионной стойкости. Добавка повышает прочность бетона на 30-35%, водонепроницаемость на 25-50%.

Согласно исследованиям Каприелова С.С. и Шейнфельда А.В. введение МК в состав вяжущего сопровождается увеличением водопотребности (нормальной густоты) цементного теста и приводит к продлению сроков начала и конца схватывания по сравнению с обычным цементным тестом. Продление сроков схватывания и водопотребность зависят от дозировки МК. Использование в качестве водоредуцирующего компонента суперпластификатора позволяет сохранять водопотребность вяжущего с МК на уровне цемента, т.е. - не увеличивать нормальную густоту теста. В этом случае сроки схватывания при дозировках МК до 20% массы цемента практически не изменяются, рис.3.7.

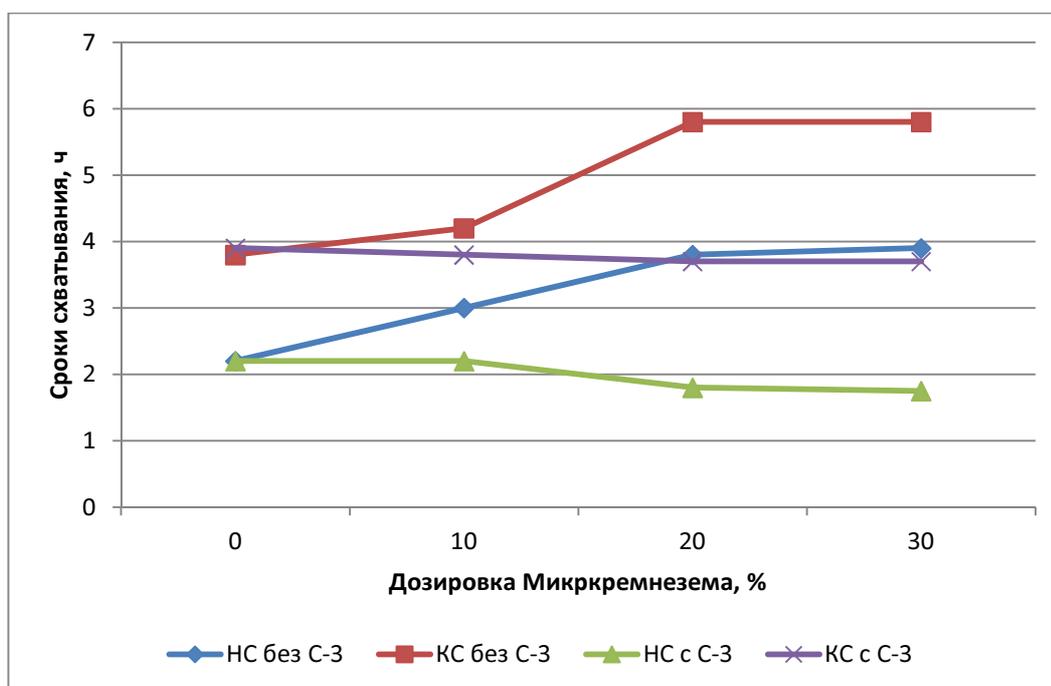


Рис.3.7. Влияние МК на сроки схватывания цементного теста нормальной густоты

Сокращение сроков схватывания объясняется тем, что введение ультрадисперсных частиц МК способствует повышению вязкости системы и более быстрому возникновению центров кристаллизации, что приводит к снижению энергетических затрат на образование зародышей кристаллизации, способствует формированию структуры цементного камня с меньшими напряжениями и ускорению процессов твердения цементных систем.

Важным свойством бетонных смесей являются водопотребность, связность, удобоукладываемость и подвижность.

При замещении до 5% цемента МК водопотребность бетонов изменяется весьма незначительно, однако при повышении количества МК в составе вяжущего она возрастает более интенсивно: водопотребность увеличивается примерно на 1 л на каждый килограмм микрокремнезема.

Дозировки добавок, снижающих водопотребность бетонных смесей, зависят от количества МК в составе бетона и начального водоцементного

отношения. Добавки лигносульфонатов в количестве 0,2-0,4% массы цемента достаточно, чтобы водопотребность бетона с 10% МК была одинаковой с контрольной смесью.

Связность или расслаиваемость смесей характеризуется величиной водоотделения. МК, используемый в качестве заменителя цемента, даже без водоредуцирующих добавок, уменьшает водоотделение. Значительное уменьшение водоотделения способствует снижению расслоения и улучшает как структуру бетона, так и его декоративные свойства.

Подвижность и удобоукладываемость бетонных смесей зависят от дозировки МК. Смеси с МК, но без водоредуцирующих добавок обладают худшей удобоукладываемостью, чем обычные смеси той же подвижности без МК. Поэтому на практике процесс укладки и уплотнения бетонных смесей с МК, не содержащих пластификаторов, более энергоемкий. В этих случаях для достижения необходимой удобоукладываемости рекомендуется подвижность (осадку конуса) увеличивать на 2-5 см.

При использовании водоредуцирующих добавок, особенно суперпластификаторов, удобоукладываемость смесей с МК значительно улучшается, взаимосвязь удобоукладываемости и осадки конуса становится такой же, как в обычном бетоне.

### **3.2. Дисперсное армирование газосиликата волокнами**

Одним из перспективных направлений является применение армирующих волокон для повышения прочности бетонной матрицы. Данный эффект зависит от вида используемых волокон, характера их сцепления и ориентации в объеме бетона, химической устойчивости по отношению к вяжущим. Такими материалами являются фибробетоны. Существует возможность создания таких изделий с различным сочетанием не только самих волокон, но и разных видов неорганических матриц.

В качестве армирующих материалов для бетонов используют металлические, минеральные и органические волокна в виде непрерывных нитей (сеток, тканей) и в виде отдельных отрезков - фибр [117].

Производство дисперсно-армированных бетонов осуществляется на основе различного вида минеральных вяжущих. В настоящее время, в основном, используется портландцемент, глиноземистый цемент, гипсовые вяжущие. Однако, недостаточно широко изучено влияние минеральных вяжущих на свойства композиций армированных различного вида волокнами, особенно на границе бетон-волокно.

Среда гидратирующихся портланд цементов является активной щелочной средой ( $\text{pH}=12$  и более). Это, в основном, определяет влияние такой среды на армирующие волокна. Продукты гидратации предохраняют от коррозии металлическую арматуру, но оказываются агрессивными по отношению к минеральным (стеклянным) волокнам. В качестве продуктов гидратации образуются гидросиликаты и гидроксид кальция, которые и определяют, в основном, свойства цементного камня. Основным компонентом среды твердеющих портландцементов, определяющим ее влияние на армирующие волокна, является гидроксид кальция, взаимодействующий с компонентами стекла. В результате воздействия происходит коррозионное разрушение стеклянного волокна вследствие выщелачивания и разрушения их кремнекислородного каркаса.

При использовании портландцементов для дисперсно-армированных бетонов важное значение имеет соотношение между фазами алита ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) и белита ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) в цементном вяжущем. Снижение алитовой и повышение количества белитовой фазы уменьшает интенсивность воздействия щелочной среды цемента по отношению к стеклянным волокнам. Исследования по разработке составов белитовых портландцементов для стеклоармированных композиций были выполнены под руководством А.А. Пащенко и В.П. Сербина [118]. Такой цемент получали из сырьевой смеси на основе известняково-базальтовых горных

пород. Перспективным также оказался специальный состав сульфатированного портландцемента, в котором отсутствовали традиционные клинкерные минералы, а основными минералами являлись сульфатосиликат кальция  $2(C_2S) \cdot CaSO_4$ ; сульфоалюминат кальция  $2(CA) \cdot CaSO_4$  и белит. Значения рН такого цемента составили 9,8-10, т. е. значительно ниже, чем у стандартного портландцемента и близки к значениям рН глиноземистого цемента.

Глиноземистый цемент реже применяется в строительстве, чем портландцемент. Его стоимость значительно выше стоимости портландских цементов. Однако, глиноземистые цементы обладают многими ценными свойствами [119]. Основное преимущество - это быстрый рост прочности в процессе твердения. Бетоны на глиноземистом цементе более плотны и водонепроницаемы, стойки к агрессивным средам, более инертны ко всем видам минеральных волокон. Глиноземистый цемент, в основном, состоит из аллюминатов кальция, среди которых определяющим свойством вяжущего является  $CaO \cdot Al_2O_3$  (CA). Его содержание в глиноземистом цементе составляет 50-60%. При получении дисперсно-армированных композиций на таком цементе необходимо учесть, что прочность бетона при определенных условиях может повышаться или заметно снижаться. Большое значение имеют температурные условия.

Для армирования фибробетонов используются волокна различного происхождения и структуры: металлические (стальные), минеральные (стеклянные), синтетические (нейлоновые, полиэтиленовые, полипропиленовые) и др. Разнообразие типов стекол обуславливает возможность получения широкой номенклатуры стеклянных волокон различного состава с довольно широким диапазоном физических свойств [120]. К наиболее обширной группе относятся силикатные стекла и получаемые из них волокна: кварцевые, алюмоборосиликатные, цирконийсиликатные, керамические и др. Разрабатываются и производятся шлаковые волокна, волокна из плавящихся горных пород (базальта).

Использование стеклянных волокон является особенно выгодным при производстве тонкостенных конструкций. Однако, основной причиной, сдерживающая их применение в качестве арматуры для бетона, является невысокая устойчивость к воздействию среды гидратирующихся портландцементов. В настоящее время зарубежными и отечественными учеными разработаны и запатентованы составы щелочестойких стеклянных волокон: Fibre Technologies International Ltd. (Бристоль, Англия), L'Industrielle De Prefabrication (Прист, Франция), San Goben Cem-Fil (Чикаго, США -Cem-Fil Anti-Crak), НПО "Стекло" (Россия -СЦ-6) и др. [120]. Кроме стеклянных волокон используются синтетические, относящиеся к обширному классу органических. Наиболее отвечают предъявляемым требованиям, как армирующего материала фибробетонов, нейлоновые, полиэтиленовые, полипропиленовые волокна, которые являются инертными по отношению к продуктам гидратации цемента. Нейлоновые волокна позволили увеличить сопротивляемость бетонных изделий динамическим нагрузкам [120], а по остальным показателям (прочность, химическая инертность, долговечность и теплостойкость) они близки к более дешевым и распространенным полипропиленовым волокнам. Своей сетчатой структурой полипропиленовые волокна позволяют достичь более прочное зацепление в строительном композите. Существенным недостатком, сдерживающим их использование, является, то, что все синтетические волокна имеют очень низкие гидрофильные свойства и их сцепление со строительным композитом обуславливается только силами механического заанкеривания.

Известны попытки использования в качестве арматуры органических волокон растительного происхождения (хлопковых, льняных, древесных, сизалевых, кокосовых и др.). Такие волокна не имеют сродства к бетону из-за своей физической структуры и химического состава. Это приводит к низким адгезионным характеристикам по отношению к строительному композиту. Кроме того, эти волокна содержат сложный комплекс веществ: целлюлозу, лигнин, гемицеллюлозу, экстрактивные и смолистые вещества, простейшие

сахара, минеральные соли и др. При попадании в щелочную среду раствора цемента гемицеллюлоза гидролизуется и переходит в простейшие водорастворимые сахара (сахарозу, фруктозу, глюкозу), являющиеся “цементными ядами”. Остальные вещества волокон не оказывают влияние на процесс твердения цемента. Простейшие сахара же замедляют процесс твердения цемента, вплоть до полного прекращения, снижают его прочность. Для устранения вредного действия сахаров проводят специальную биохимическую, физическую и химическую обработку волокон. Существенным фактором, сдерживающим применение большей части волокон растительного происхождения для армирования бетона, является также их высокое водопоглощение, что влияет на прочность цементных композиций.

В работе В.В. Козлова и Р.М. Ахмеднабиева [121] отмечается, что применяемый для гидроизоляционных работ чеканочный состав (техническое название БУС) на основе портландцемента, гипсоглиноземистого цемента, глиноземистого цемента и асбестового волокна имеет низкую деформативность и трещиностойкость, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах гидроизоляционного материала. Поэтому, была рассмотрена возможность замены высокомодульного асбестового волокна низко модульным полипропиленовым. Диаметр полипропиленовых волокон составлял 0.2 мм, длина изменялась от 14 до 30 мм, количество волокон – от 2 до 8% по объему. Полипропиленовые волокна не смачиваются водой и не вступают в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента, поэтому на поверхности раздела волокно-матрица не образуется зона, свойства которой отличались бы от исходных материалов. Таким образом, взаимодействие волокон с матрицей носит чисто механический характер, обусловленный сдвиговыми напряжениями на поверхности раздела волокно-матрица, величина которых зависит от степени расширения матрицы.

Анализ проведенных исследований показал, что вклад волокна в работу разрушений композиций увеличивается пропорционально объемному содержанию. Однако при дальнейшем повышении длины волокна пропорциональность нарушается больше, чем выше содержание волокна. Этот факт объясняется тем, что при принятой технологии изготовления образцов (отдозированные количества составляющих цементной матрицы и волокна загружались в шаровую мельницу и перемешивались в течение 12-15 мин.) с увеличением длины волокна увеличивается вероятность образования комьев. Это затрудняет равномерное распределение волокна в объеме матрицы. Предел прочности при сжатии с увеличением содержания волокна до 8% снижается на 16%. На поверхности образцов с использованием более длинных волокон при сжатии наблюдается изменение расположения трещин. Вместо одной глубокой трещины, появляются множество неглубоких мелких, что способствует повышению деформативности цементных композиций, так как при множественном разрушении требуется больше энергии разрушения.

Результаты экспериментов показали, что введение 2% полипропиленового волокна длиной 14 мм приводит к увеличению вязкости разрушения по сравнению с неармированной бетонной матрицей в 1,6 раза.

Проблема замены асбеста (полностью или частично) в производстве асбестоцементных изделий другими видами волокон рассматривается в работе Григорьевой Л.С., Рабея М.Б., Сулеймана О.В. [122]. Проведена работа с асбестоцементом по цементно-волокнистым изделиям с частичной (до 50%) заменой асбеста целлюлозными волокнами (целлюлоза сульфатная небеленая НС-2 и сульфатная беленая). В результате проведенных экспериментов были получены следующие результаты: предел прочности на изгиб 309-36,2 кгс/см<sup>2</sup>; ударная вязкость 3,43-2,89 кг с см/см<sup>2</sup>; средняя плотность 1,65-1,71 г/см<sup>3</sup>. Отмечено, что увеличение степени размола волокна в 2,8 раза способствовало повышению статической прочности

образцов соответственно на 14-17%. Но ударная прочность материала и ударная вязкость снизилась на 35-56%.

Возможность использования теплоизоляционных отходов на основе: растительных, шерстяных, хлопковых, синтетических волокон, рассматривается в работе Воробьева В. А. [123]. Отмечено, что в некоторых случаях для получения материалов с улучшенными свойствами целесообразно использовать смеси волокон различных типов. Например, добавляя к отходам на основе целлюлозных волокон (хлопковых отходов), обладающих отличными теплоизоляционными свойствами, более плотных волокон синтетических материалов, можно добиться снижения сорбционного увлажнения массы. Авторы отмечают, что образцы лучшего качества были получены при помощи гипса и магнезиального вяжущего. Прочность на изгиб образцов составила 0,3-0,6 МПа, средняя плотность 240-340 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,07-0,1 Вт/м К.

В работах западных ученых [124] рассматриваются композиции на основе цемента с различными волокнами. Авторы подтверждают факт того, что полимерные волокна эффективно увеличивают прочность на удар цементных матриц вследствие низких модулей упругости, сопровождающихся большим растяжением под нагрузкой. Рассмотрена возможность использования другого вида волокна совместно с полимерными, когда желательно улучшить как прочность на растяжение, так и сопротивление удару. В качестве волокнистого компонента использовались полипропиленовые нити, лента и моноволокно 150 мкм, а также моноволокно нейлона 24 (диаметром 54 мкм). В качестве другого волокна, добавляемого к полимерному, использовали стеклянное, углеродное волокно и асбест. В качестве матрицы служил портландцемент. Содержание волокна 1-2% по массе. В результате экспериментов, были получены следующие результаты: модуль разрыва композиционного материала на основе нейлонового волокна 7,1-11,2 МПа; прочность при ударе до 21,8 КДж/м<sup>2</sup>. Модуль разрыва композиционного материала на основе

полипропиленового волокна - 7,8-15,2 МПа; прочность при ударе 8,6-26,1 КДж/м<sup>2</sup>. Армирование более длинными и тонкими волокнами дает лучшие результаты, по видимому, из-за их большей удельной поверхности, которая способствует увеличению площади контакта с матрицей. Высокопрочные и высококомодульные углеродные и асбестовые волокна позволяют получать композиции с пределом прочности на разрыв до 40 МПа, но они показали очень небольшое увеличение ударной прочности по сравнению с прочностью без добавок. Стекланные волокна позволяют получить композиции с высоким пределом прочности на разрыв и ударной прочностью, но наблюдается некоторое уменьшение прочности во времени, причём, его степень зависит от условий твердения. Использование в качестве армирующего компонента смесей органических и неорганических волокон позволило увеличить прочность композита, как на разрыв, так и на удар. Упрочнение материала происходит линейно, пока не достигается предельное значение прочности. Оптимальным считается содержание волокна, равномерно распределенного в матрице без увеличения его прочности.

Эксперименты по выдергиванию волокон, направленные на измерение прочности связи между пропиленовым волокном и цементной матрицей, показали результаты, отличающиеся в широком диапазоне [120]. Отличительной чертой экспериментов являлось то, что в большинстве случаев волокна разрушались чаще, чем выдергивались из матрицы. Это свидетельствует о низкой прочности волокон или о большом сцеплении с матрицей. Максимально рассчитанная прочность связи составила лишь 1 МПа. Такое низкое значение означает, что эта связь по своей природе обусловлена трением. На нее, однако, незначительно влияет изменение среды, в которую помещается композиционный материал.

Практически, все виды синтетических волокон (нейлоновые, капроновые, полипропиленовые и др.) обладают химической стойкостью к воздействиям щелочной среды гидратирующихся портландцементов. Экспериментальные данные [120] показывают, что введение синтетических

волокон в бетон не приводит, обычно, к сколько-нибудь заметному повышению прочности материала на растяжение, сжатие и изгиб при действии статических нагрузений, так как бетон не в состоянии передать статические усилия на волокна, которые обладают более низкими, по сравнению с бетоном, значениями модуля упругости. Поэтому применение синтетических волокон целесообразно в зависимости от условий работы конструкции в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации.

Синтетические волокна существенно повышают сопротивление бетона ударным нагрузкам. При быстром приложении нагрузки энергия, необходимая для разрушения армированного бетона после образования в нем трещин, должна затрачиваться на выдергивание волокон из бетонной матрицы. Когда время нагрузки чрезвычайно мало, необходимо за короткий промежуток времени провести большую работу, чтобы обеспечить выдергивание большой массы весьма тонких и пластичных волокон из объема бетона.

Синтетические волокна имеют низкую смачиваемость и соответственно плохую адгезию к цементному камню. Обеспечение совместной работы волокон с бетоном может быть достигнуто только за счет их механического зацепления. Эффективность волокон тем выше, чем больше их относительная длина. Наилучшие результаты достигнуты на бетонах с содержанием синтетических волокон 0,15-0,25% по массе (0,4-0,65% по объему) при длине 10-100 мм [120].

Применение синтетических волокон в качестве армирующего материала обычно приводит к уменьшению усадочных деформаций в бетоне, повышает морозостойкость, сопротивление усталости, истиранию, влиянию атмосферных воздействий.

Значительный интерес представляет применение полиамидных волокон - отходов при получении шинного корда. Промышленные отходы кордовых волокон (вискозных, капроновых) дешевле полиэтиленовых, нейлоновых и полипропиленовых. Оптимальное количество отходов

кордных волокон (длина 5-25 мм, диаметр 0,5-0,67 мм.), вводимых в бетонную смесь, составляет обычно 0,6-1% по массе бетона.

В целях повышения прочности при изгибе и ударной вязкости асбестоцементных изделий совместно с асбестовым волокном используют органические волокна.

В целях повышения модуля упругости асфальтового бетона предлагается способ изготовления смеси, заключающийся в слиянии нагретых минеральных материалов с битумом и синтетическим волокном, обработанным 40-60%) смолы от массы волокна. В качестве синтетического волокна используют вискозное или лавсановое или капроновое. Длина волокна 3-30 мм.

Для получения качественных материалов, армированных волокнами необходимо выполнить ряд условий [120].

- иметь достаточное количество прочных волокон;
- технология производства не должна ухудшать свойства волокон;
- волокна должны иметь высокую прочность сцепления со строительным композитом;
- волокна должны быть распределены по всему объему материала;
- строительная матрица должна быть инертной по отношению к волокнам;
- волокна должны иметь более высокий модуль упругости чем строительная матрица;

При армировании бетона неметаллическим волокном существует ограничение применения крупного заполнителя, а для практического использования рекомендованы матрицы на основе гипсового, цементного камня или мелкозернистого бетона. Введение волокон в строительную смесь проводят несколькими методами. Достаточно высокие результаты при получении стеклоармированных композиций отмечались при использовании прутково-шнековых, спирально-вихревых смесителей [120, 125]. Другими методами являются перемешивание армирующих волокон либо с сухой

изделий строительной смесью до добавления воды, либо непосредственно добавление уже в готовую строительную смесь затворенную водой. При этом формование и обработка бетонной смеси проводится в сочетании с вакуумированием, центрифугированием, прессованием для создания более плотной структуры материала. Распространенным методом формования стеклобетона является напыление раствора под давлением с одновременной подачей волокна. Такой метод эффективен при изготовлении тонкостенных конструкций.

Анализ работ в области технологии производства дисперсно-армированных материалов показывает, что рассмотрены далеко не все вопросы. Многие технологические методы находятся в стадии разработки.

Таким образом, в ряде работ рассматривается технология изготовления бетонных конструкций армированных стекловолокном. Собакиной С. А. было отмечено [126], что армирование такими волокнами позволяет в ряде конструкций заменить стальную тканую сетку, необходимую для восприятия временных нагрузок. В данной работе выделяется ряд технологических зависимостей, связанных с использованием стекловолокна для армирования бетона. Определяется прочность на сжатие, на изгиб. Использовались волокна, нарезанные из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла Е (ГОСТ 17139-71). В ходе работы было отмечено, что содержание волокна в смеси лимитируется технологическими и техническими параметрами формования бетона. Были рассмотрены различные составы смеси. В ходе эксперимента выявлено, что введение стекловолокна в количестве 2% допустимо для стекловолокнистых смесей:

- 1) состава Ц:П = 1:2 с В/Ц не более 0,47 и жесткостью 40-60 с;
- 2) состава Ц:П = 1:1 с В/Ц не более 0,40 и жесткостью 40-60 с;
- 3) состава Ц:П = 1:1 с В/Ц не более 0,45 и жесткостью 20-30 с;

Так же отмечено, что характеризовать бетонную смесь жесткостью недостаточно, т. к. при равной жесткости наблюдается разная формуемость смеси. Жесткость смеси, полученной в смесителе, значительно превышает

жесткость после ручного перемешивания, но формуемость первой резко улучшается за счет усиленных процессов активирования цементного теста и псевдоразжижения. Принимая во внимание приведенные факторы, проводились испытания на прочность. В результате экспериментов было установлено, что в жестких стеклобетонных смесях с В/Ц = 0,30, в сравнении с исходным бетонным составом, при 1% волокна увеличивается прочность на изгиб в 3 раза, но уменьшается прочность на сжатие на 10%; при 2% волокна увеличивается прочность на изгиб в 2,6 раза, прочность на сжатие увеличивается на 5%.

В менее жестких смесях с В/Ц = 0,37, в сравнении с исходным составом, при 1% армировании увеличивается прочность на изгиб в 1,6 раза, а прочность на сжатие на 15%] при 2% армировании прочность на сжатие возрастает на 30%. Таким образом, рекомендуется состав для тонкостенных конструкций, где Ц:П = 1:1, В/Ц = 0,37-0,40; с содержанием волокон 2% по массе и жесткостью 40-60 с. Высокочастотная вибрация (100 Гц) оказывает благоприятное воздействие на формуемость и прочностные показатели для жестких смесей, а с понижением жесткости эффект высокочастотной вибрации снижается.

Отмечено, что ущерб механическим и структурным свойствам стеклофибробетона наносит высокотемпературная и влажностная тепловая обработка. Однако, мягкая тепловая обработка при температуре 60-65°C в течении 4-х часов повышает прочностные характеристики изделий.

На основании проведенных исследований, были сделаны выводы применительно к технологии изготовления стеклофибробетонов для тонкостенных конструкций:

- для достижения равномерного распределения волокон по матрице строительного композита достигается использованием высокооборотного смесителя принудительного действия (350 об/мин) роторного типа;

- стекловолокно рационально вводить в готовую бетонную смесь постепенно, небольшими порциями.

- после 3-4 минутного перемешивания в смесителе принудительного действия смесь с волокном имеет большую жесткость, но однородность и формуемость смеси резко улучшается;

- оптимальным по совокупности свойств формуемости и прочности является состав с Ц/П = 1:1 и содержанием стекловолокна около 2%;

- для уплотнения стеклофибробетонных смесей эффективным является использование виброплощадок;

- рационально проводить тепловую обработку конструкций в термоформах кондуктивным способом при температуре не выше 60-65°C.

В производстве стеклофибробетона Собакиной С. А. и Тревашовой В. В. отмечается эффективность использования пластификатора С-3 ) [127]. Использование добавки в количестве 0,5-1% от массы цемента позволяет существенно повысить подвижность смеси при неизменном составе бетона или повысить непроницаемость и прочность бетона при сокращении расхода воды и неизменной подвижности смеси. Благоприятное воздействие оказывает С-3 на рост прочности стеклобетона в условиях пропаривания в высокотемпературном режиме.

Для получения качественных изделий с заранее заданными свойствами необходимо:

- равномерное распределение армирующих волокон по объему бетона;

- плотная упаковка системы «дисперсная арматура - мелкозернистый бетон;

- повышение сцепления армирующих волокон с бетоном;

- благоприятные условия твердения.

Установлено, что первоначальным условием получения дисперсно-армированных бетонов с улучшенными свойствами является обеспечение

плотной упаковки системы «цемент - песок - дисперсная арматура» и их взаимное сцепление, причем оба эти фактора зависят от рационально подобранного состава бетона с учетом дисперсной арматуры.

Анализ экспериментальных данных, показывает, что наилучшими прочностными характеристиками обладают фибробетоны, состав которых подобран в соответствии с предложенной методикой. При этом корректировку соотношения цемента и заполнителя необходимо производить по одному из вариантов, в зависимости от вида и свойств применяемых заполнителей и армирующих волокон.

Однако, в значительном количестве проведенных исследований отмечается тот факт, что большое количество волокон имеют низкую адгезию к строительному композиту, что существенно влияет на ассортимент используемых волокон и на прочностные характеристики получаемых изделий.

Обобщая вышеизложенный материал можно дать следующие характеристики армирующим волокнам – табл. 3.2.

Таблица 3.2. – Основные характеристики армирующих волокон.

Волокно	Характеристики			
	Модуль упругости, ГПа	Прочность на растяжение, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Прочность сцепления с цементным камнем, МПа
Стекловолокно	75	2,5	3	0,024
Асбестовое	170	3,2	2,2	0,085
Целлюлозное	10	0,3	6,0	0,051
Льняное	9	0,5	6	0,052
Хлопковые отбеленные	8	0,3	4,0	0,046
Полиэфирные	3,5	0,7	12	0,145
Полиамидные	4,0	0,9	13	0,158
Триацетатные	8	0,4	12	0,198

Из таблицы 3.2. вытекает, что для микроармирования на первый взгляд предпочтительнее полиэфирные, полиамидные и триацетатные волокна,

обладающие максимальной прочностью сцепления с цементным камнем. Однако, эти типы волокон не способны сохранять свои физико-механические свойства при автоклавной обработке, так как склонны к термическому распаду уже при температурах порядка 80<sup>0</sup>С. Стекловолокно в свою очередь выщелачивается в высокощелочной среде кремнеземистого вяжущего уже на ранних этапах формования изделий, а асбестовое волокно из-за высокой плотности агломераций не позволяет получить равномерную поровую структуру газосиликата. Поэтому предпочтительнее использовать волокна на основе целлюлозы.

Важным моментом является модуль волокна – т.е. отношение его длины к диаметру. Высокомодульные волокна в скоростных смесителях, применяемых при производстве газобетонов, склонны к агломерации и неравномерному распределению по объему смеси. В связи с этим предпочтение должно быть отдано низкомолекулярным волокнам – т.е. микроцеллюлозе.

### **3.3. Оптимизация состава ячеистого фибробетона с добавками модификаторами**

На основе вышеизложенного можно утверждать, что модификация вяжущего активными минеральными добавками и дисперсное армирование газосиликатов различными волокнами является наиболее перспективным и все более широко применяется во многих областях строительства. Преимущество дисперсного армирования заключается в том, что волокна фибры резко повышают прочность материала. Кроме того, современные волокна произведенные из химически инертных материалов, не вступают в реакцию с солями и щелочами результатов реакции в кремнеземистом вяжущем. К таким волокнам, в частности относятся фибра на основе микроцеллюлозы (МЦ).

Автоклавные газосиликаты, как и обычные, плохо работают на растяжение при изгибе. Газосиликаты также характеризуются образованием усадочных трещин при твердении. Повысить прочностные характеристики, а также другие свойства газосиликатов можно за счет введения оптимального количества активных модификаторов, армирующего волокна и его равномерного распределения в смеси. Дисперсное армирование волокном микроцеллюлозы позволяет повысить качество изготовления и применения автоклавного газосиликата.

Таким образом, для удовлетворения спроса на эффективные стеновые материалы разработка технологии автоклавного газосиликата с применением в качестве дисперсной арматуры волокон микроцеллюлозы (МЦ) и модификация активными минеральными добавками является одной из важнейших научных и практических задач.

Количество кремнеземистой составляющей ограничено рецептурой применяемого на предприятии вяжущего. Управление качественными характеристиками известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) может быть осуществлено за счет повышения удельной поверхности кремнеземистой составляющей, путем модификации вяжущего микрокремнеземом (МК), обладающим высокой удельной (порядка 40000 см<sup>2</sup>/г) поверхностью и активностью за счет аморфной структуры.

Введение в состав дополнительных компонентов приводит к снижению подвижности смеси, что отрицательно сказывается на плотности конечного материала. Причем, если применение МК за счет части кремнеземистого компонента ИКВ не влияет на подвижность, то применение фибры МЦ значительно влияет на нее (рис. 3.8).

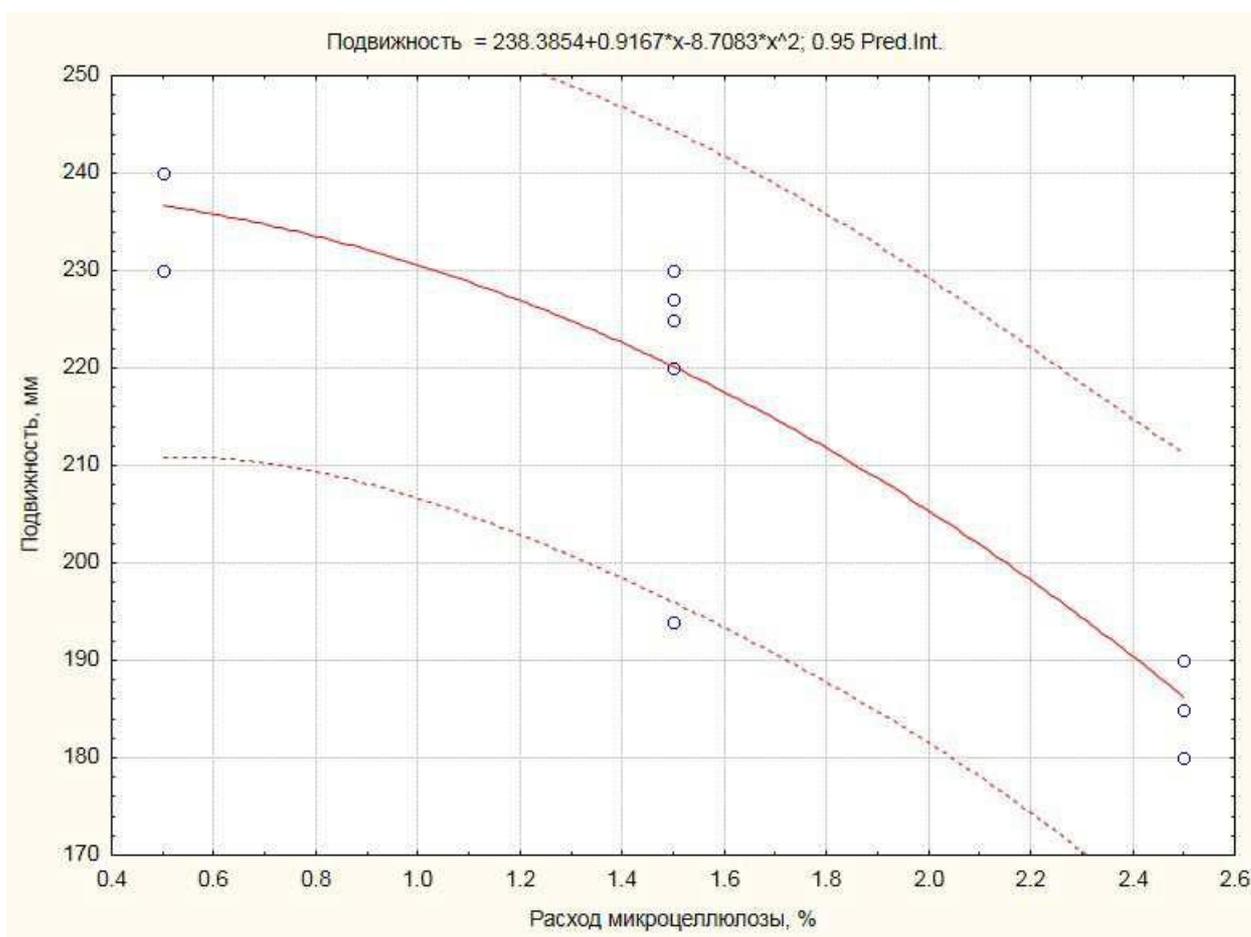


Рис. 3.8. Зависимость подвижности смеси от расхода микроцеллюлозы

Корректировка подвижности за счет введения дополнительной воды, приводит к смещению водотвердого отношения в сторону увеличения, что негативно сказывается на прочностных характеристиках. Корректировку водотвердого отношения можно провести за счет применения суперпластификаторов.

Для определения оптимальных расходов модифицирующих компонентов был спланирован и проведен активный факторный эксперимент, по методике представленной в разделе 2.3, с равноподвижными смесями, на основании полученных данных, табл. 3.3. В эксперименте варьировались расходы МК и МЦ от 0,5% до 1,5% и от 0,5% до 2,5% соответственно. Результаты приведены на рис. 3.9 – 3.10.

Таблица 3.3. – Результаты реализации активного эксперимент

Расход микрокремнезема, %	Расход микроцеллюлозы, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии R, МПа
1.5	2.5	488.1796	3.343
0.5	2.5	496.863	3.044
1.5	0.5	493.672	2.527
0.5	0.5	488.9708	2.932
1.5	1.5	515.154	3.062
0.5	1.5	514.2524	2.599
1	2.5	480.026	3.861664
1	2.5	612.4348	4.734
1	1.5	487.1072	3.718607
1	1,5	490.1663	3,8260
1	1,5	491.3342	3,7898

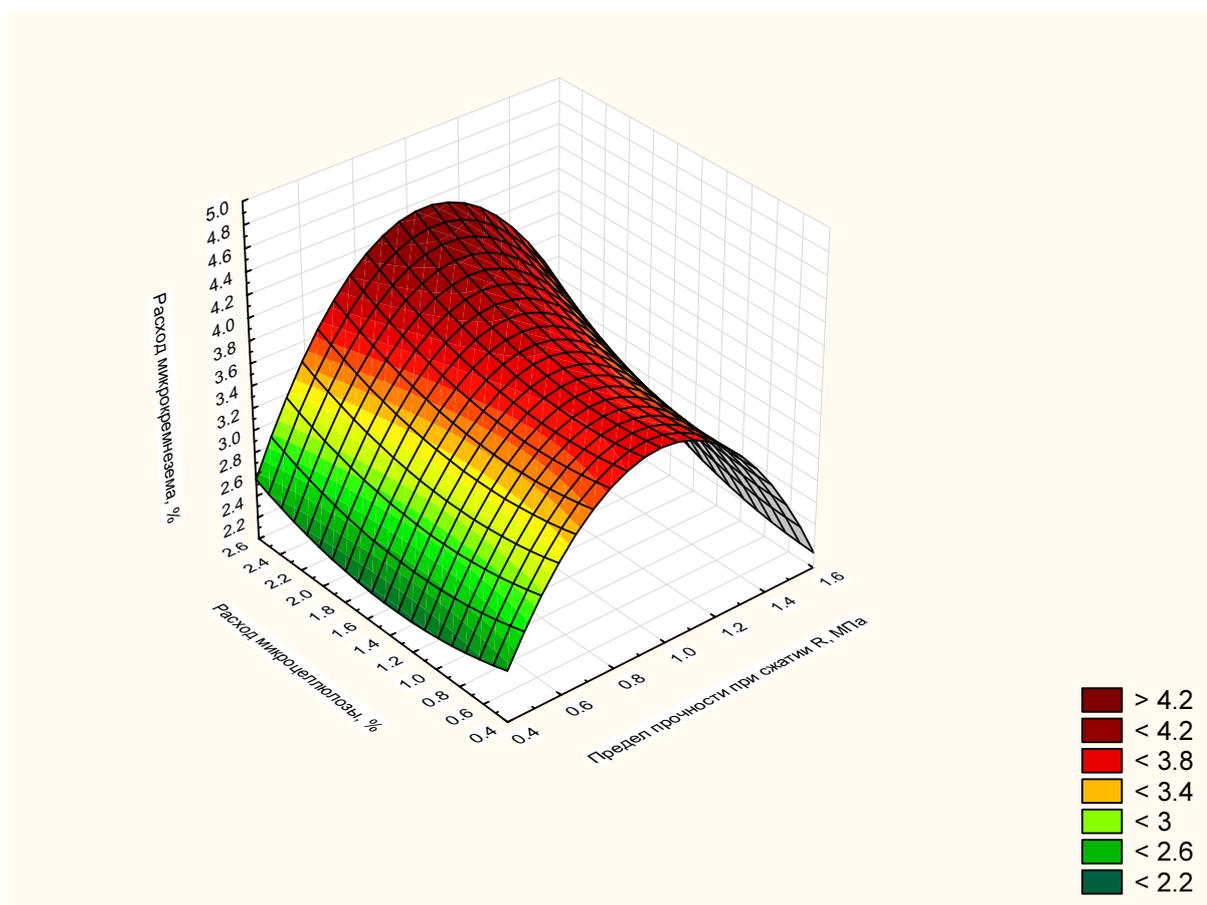


Рис. 3.9. Зависимость прочности газосиликата от расхода модификаторов

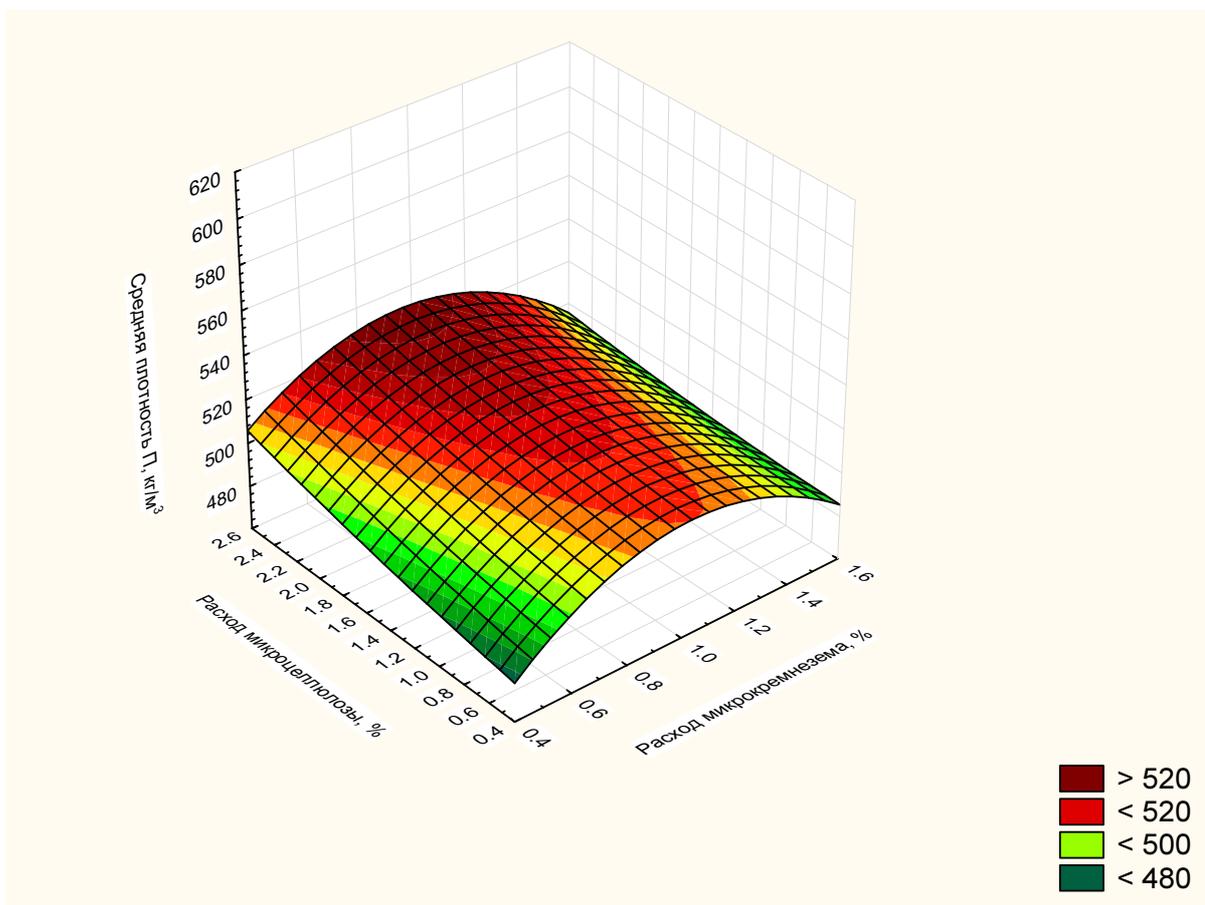


Рис. 3.10. Зависимость плотности газосиликата от расхода модификаторов

Уравнения, адекватно описывающие зависимость прочности и плотности от расхода микрокремнезема -  $x$  и микроцеллюлозы –  $y$ :

$$R = 0.203 + 7.7337x - 0.686y - 4.0714x^2 + 0.352xy + 0.19592 \quad (3.6)$$

$$\Pi = 416.3956 + 178.5079x + 10.5937y - 84.7482x^2 - 6.6923xy + 1.6097y^2 \quad (3.7)$$

Анализ графиков и уравнений показывает, что максимальная прочность, при незначительном снижении плотности газосиликата соответствует расходу микрокремнезема в 1%. Сложнее зависимость характеристик газобетона от расхода армирующего волокна. Оба графика представляют собой минимакс, где минимум приходится именно на расход МЦ. При оптимальном расходе МК значимое нарастание прочности начинается с

центра плана и к границе факторного пространства увеличивается на 60-80%. Экстраполируя за пределы границ факторного пространства, можно утверждать, что дальнейшее введение МЦ будет способствовать нарастанию прочности. Однако при введении более 2,4% МЦ начинает значимо нарастать плотность материала, что снижает его качественные характеристики. Поэтому оптимальными могут считаться составы с расходами микрокремнезема в 1% и микроцеллюлозы в 2,4%.

## ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТА

### 4.1. Теоретическое обоснования физико-химических процессов автоклавного синтеза низкоосновных гидросиликатов кальция

Гидросиликаты кальция играют важную роль в формировании строительных свойств автоклавных материалов и в процессах твердения вяжущих веществ. Исследования последних лет показали, что состав гидросиликатов кальция изменяется в широких пределах в зависимости от исходного сырья, соотношения компонентов и условий синтеза.

К настоящему времени известно 28 гидросиликатов кальция, в том числе 11 природных минералов [128].

Кроме того, известно несколько фаз, состав которых не установлен.

Следует подчеркнуть, что большое число фаз, характерное для гидросиликатов кальция, по сравнению со значительно меньшим числом гидросиликатов магния объясняется тем, что кальций обладает большим ионным радиусом, что и определяет несколько типов его координации с кислородом.

Х. Тейлор [129], рассматривая гидросиликаты кальция, отмечает: «Неизвестны кальциевые соединения — аналоги таких минералов, как амфиболы, серпентины или слюды. Причина этого также кроется в том, что у ионов  $\text{Ca}^{2+}$  радиус больше, в связи с чем они могут играть лишь вспомогательную роль во всех таких структурах. Исключением из этого правила является только кальциевый хондродит<sup>1</sup>; структура его аналогична структуре хондродита — минерала, содержащего  $\text{Mg}^{2+}$  или  $\text{Fe}^{2+}$ . Структура соединения  $\gamma\text{-Ca}_2\text{SO}_4$ , производным которого (по структуре) является кальциевый хондродит, аналогична структуре оливина.

Как оливин, так и кальциевый хондродит содержит изолированные тетраэдры  $\text{SiO}_4^{4-}$ , которые могут значительно отклоняться от своего

положения. Это позволяет им образовывать сочетания с более крупными ионами  $\text{Ca}^{2+}$  без существенных изменений структуры. В других магнезиальных или железистых гидросиликатах такие явления невозможны, так как структуры содержат связанные тетраэдры».

Для технологии автоклавных материалов гидросиликаты кальция пока имеют первостепенное значение. Практически производство автоклавных строительных материалов базируется на техническом синтезе гидросиликатов кальция. Гидросиликаты почти нерастворимы в воде. При гидратации силикатов кальция ниже  $100^\circ\text{C}$  возникают плохо закристаллизовавшиеся новообразования. Чтобы получить кристалл конкретного гидросиликата кальция, необходимо обеспечить надлежащий состав смеси и соответствующие гидротермальные условия. Размеры кристаллов гидросиликатов кальция обычно находятся в пределах 10—30 мкм, что затрудняет изучение их состава, структуры и свойств [130].

Н. В. Белов [131] показал возможность обратимой замены в гидросиликатах части тетраэдров  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  на равнозначные и равнообъемные группы  $(\text{OH})^{4-}$ . Он считает, что в основе структуры гидросиликатов лежит волластонитовый блок, который построен из одной колонки кальциевых октаэдров и двух колонок кальциевых призм. Вдоль него тянутся две между собой не связанные цепочки кремнекислородных тетраэдров. Это доказывается тем, что при обезвоживании очень многие гидросиликаты дают  $\alpha$ , или  $\beta - \text{CaOSiO}_2$ . Ограниченное число минералов при дегидратации образуют  $\beta$  - или  $\gamma$ - $2\text{CaOSiO}_2$ . Исключение составляет афвилит  $\text{Ca}_3\text{H}_2\text{O}[\text{SiO}_3(\text{OH})]_2$ . Его структура сложена не из цепочек тетраэдров, а формируется островным радикалом  $\text{SiO}_3^{2+}$ .

Гидросиликаты кальция можно рассматривать как гидраты силикатов кальция. Вода в отдельных гидросиликатах находится в разных связях:  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  — гидратная, кристаллическая, цеолитная. Поэтому температура дегидратации различна. Опираясь на многочисленные публикации, Х.

Тейлор [129] выделяет следующие основные группы гидросиликатов кальция:

- соединения, родственные по структуре волластониту: некоит, окенит, ксонотлит, фошагит, гиллебрандит;
- тоберморитовую;
- гиrolитовую: гиrolит, трускоттит, Z-фаза (Ассарсона);
- соединения, родственные по структуре  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  : кальциевый хондродит (гидрат  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ );
- другие гидросиликаты кальция: афвилит, гидрат  $\text{C}_2\text{S}$ , Y-фаза.

Система  $\text{CaO—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$  очень сложна, она имеет много метастабильных неустойчивых фаз, возникающих и исчезающих при изменении температур и давлений в автоклаве. Гиллебрандит же устойчив при низких температурах, при избытке  $\text{Ca(OH)}_2$  и только в том случае, если он хорошо кристаллизован. Исследования показали, что равновесное состояние в системе  $\text{CaO—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$  практически не достигается в реальных условиях производства автоклавных изделий. Цементирующее вещество автоклавных материалов представлено стабильными и метастабильными гидросиликатами кальция, поэтому несомненный интерес представляет исследование процессов, протекающих в исходной сырьевой смеси в период автоклавной обработки, и их влияния на технические свойства изделий.

Эксперименты, проведенные с известково-кремнеземными смесями разной основности в широком температурном интервале, показали, что фазовые превращения в процессе гидротермальной обработки вызывают периодические скачки прочности камня.

Синтез гидросиликатов кальция может сопровождаться полным связыванием извести и последующим ее частичным выделением из-за перестройки кристаллических решеток ранее образовавшихся метастабильных фаз. Однако какой-либо зависимости между содержанием

свободной извести и прочностью изделия не замечено. По-видимому, сама свободная известь в небольших количествах не оказывает существенного отрицательного влияния на прочность камня. Фазовое равновесие в системе  $\text{CaO—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$ , по мнению Х. Тейлора [129.], трудно достигнуть даже при температурах выше  $200\text{—}400^\circ\text{C}$ . Он подчеркивает, что синтез при температуре ниже  $200^\circ\text{C}$  требует длительного времени и очень сложен, так как Состав новообразований зависит от многих факторов, включая природу исходных материалов.

С повышением температуры состояние устойчивости переходит к более основным гидросиликатам, причем основность гидросиликатов зависит от состава исходных продуктов: чем выше их основность, тем более основные гидросиликаты образуются в автоклаве.

В смесях, у которых  $\text{CaO} : \text{SiO}_2$  больше или равно 2, фиксируется большое количество отклонений от этого правила, так как возникает много метастабильных соединений. Наиболее устойчивыми чаще оказываются низкоосновные гидросиликаты кальция.

Анализ работ разных авторов [129-131] позволяет сделать некоторые выводы, имеющие практическое значение для технологии автоклавных материалов:

1. Для смесей  $\text{C/S} = 2$  и более из извести и кварца при температурах  $175\text{—}200^\circ\text{C}$  получается  $\text{C}_2\text{SH(A)}$  обязательно в смеси с  $\text{C}_2\text{SH(B)}$ . При всех температурах фиксируется смесь этих двух гидросиликатов кальция. Если смесь приготовить из извести и аморфного  $\text{SiO}_2$ , то образуется только  $\text{C}_2\text{SH(B)}$ . Если автоклавной обработке подвергнуть  $\text{C}_2\text{S}$ , при  $200\text{—}225^\circ\text{C}$  трудно установить состав образовавшегося двухкальциевого гидросиликата. Температурный перепад  $175\text{—}200^\circ\text{C}$  ( $0,9\text{—}1,2$  МПа в автоклаве) также дает различные гидросиликаты в зависимости от структуры исходных продуктов, использованных для изготовления смеси, имеющей отношение  $\text{C/S} = 2$  и более.

2. Фаза Z устойчива при температурах 130-150<sup>0</sup>C в смесях состава C/S<2.

3. Тоберморит может образовываться 120-140-150<sup>0</sup>C в смесях состава C/S от 1:1 до 5:4.

4. Двухкальциевые гидросиликаты неустойчивы. Ниже температуры 100<sup>0</sup>C C<sub>2</sub>SH<sub>2</sub> переходит в более устойчивые соединения CSH(B) и Ca(OH)<sub>2</sub>.

5. Наиболее устойчивы однокальциевые гидросиликаты. Они присутствуют в составах C/S, равных от 2/3 до 3/1, и в очень широком интервале температур — от 20 до 350<sup>0</sup> C.

6. В низкоосновных смесях преобладают индивидуальные фазы: гиролит, тоберморит, ксонотлит и особенно CSH(B). По мере увеличения содержания в исходной смеси CaO отмечается образование смеси различных гидросиликатов и уменьшается интервал температур, при которых они устойчивы.

Образование устойчивых соединений связано с выделением свободной энергии. Термодинамические расчеты, сделанные для ряда силикатных систем, в том числе и для гидросиликатов кальция [131], убедительно показали, какие фазы могут образоваться в различных условиях, и выявили энергетические характеристики протекающих реакций.

Чем меньше запас химической энергии, тем устойчивее химическое соединение. Наиболее термодинамически устойчивы соединения с соотношением C/S = 2/3-4/3, так как в этих областях наименьший запас химической энергии, а, следовательно, и большая устойчивость. Поэтому и фиксируются низкоосновные гидросиликаты.

Из сказанного ясно, что на устойчивость гидросиликатов кальция влияют состав и температурные условия. Кстати, малая распространенность природных гидросиликатов кальция объясняется их термодинамической устойчивостью в ограниченном интервале температур.

При назначении режима автоклавной обработки надо учесть взаимодействие составляющих сырьевой смеси и выбрать температуры в автоклаве, обеспечивающие образование наиболее устойчивых соединений для данной сырьевой смеси. В условиях гидротермальной обработки в зависимости от состава исходной смеси можно получить различные гидросиликаты кальция. Так, из малоизвестковых смесей синтезируют гиролит, ксонотлит и тобермориты, а из высокоизвестковых — гиллебрандит.

Гидроалюминаты кальция являются одним из результатов автоклавного синтеза из исходных смесей кремнеземистого вяжущего и газообразователя. Механические свойства отдельных гидроалюминатов, так же как и гидросиликатов, зависят от температурных условий их образования. Ю.М. Бутт [132] установил, что прочность гидратированного  $C_3A$  резко падает с повышением температуры. Причину падения прочности гидратированного  $C_3A$  при увеличении температуры или длительности автоклавной обработки определяется термодинамической неустойчивостью гидроалюминатов кальция.

Известны десять гидроалюминатов  $Ca$ , различающихся по соотношению  $C/A=1-4$  и содержанию воды. При температуре выше  $200^\circ C$  устойчивы только смеси высокоосновных гидроалюминатов кальция с  $Ca(OH)_2$  и с  $Al_2(OH)_3$ . При температурах ниже  $100^\circ C$  отмечается образование большого числа гидроалюминатов кальция и их смесей с ограниченными площадями стабильности, например трехкальциевый алюминат легко переходит в четырехкальциевый, что вызывает понижение прочности. Поэтому при автоклавной обработке следует избегать образования гидроалюминатов кальция. Это можно обеспечить путем получения гидрогранатов и других соединений в системе  $CaO—Al_2O_3—SiO_2—H_2O$ .

В структуру алюмосиликатов кальция входят радикалы  $[SiO_4]$ ;  $[Si_2O_7]$ ;  $[Si_3O_{12}]$ ;  $[Al_2Si_2O_{10}]$ ;  $[Al_2Si_5O_{15}]$ ;  $[Al_2Si_7O_{18}]$ . Эта система имеет большое технологическое значение. Имеются достоверные сведения о природных гидроалюмосиликатах кальция: плазолит (гидрогроссуляр), везувиан,

лавсонит, клиноциозит, пумпелиит (лотрит), пренит, маргарит (жемчужная слюда), стеллерит. Увеличение количества воды в минералах приводит к заметному снижению твердости и плотности. Существует значительное количество гидрогранатов переменного состава. Это твердые растворы гидроалюмосиликатов и гидроалюминатов кальция:  $C_3AH_6 + C_3ASH_2$ ;  $C_3AS_3 + C_3AS_{2,73}H_{0,5}$ ;  $C_3AH + CASH_2$ . Все эти пары составляют непрерывные ряды по растворимости.

У гидрогранатов нет определенной формулы, они имеют переменный состав, что трудно учитывать при технологии изготовления изделий. Поэтому алюмосиликатные смеси в зависимости от условий обработки и соотношения окислов  $CaO:SiO_2:Al_2O_3$  обеспечивают автоклавному материалу разнообразные свойства.

#### **4.2. Рентгеноструктурные исследования качественного и количественного состава межпоровой перегородки газосиликата**

Для установления минералогического состава новообразований в разработанном модифицированном ультрадисперсной добавкой автоклавного газобетона и сравнение его с исходным, был проведен рентгенодифракционный эксперимент на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием Mo-K $\alpha$ -излучения ( $\lambda=0,07107$  нм), монохроматизированного циркониевым  $\beta$ -фильтром, в диапазоне углов  $7-30^\circ$  ( $2\theta$ ) с шагом  $0,01^\circ$  по рентгенооптической схеме Брегга-Брентано. Интенсивность рассеяния от образцов регистрировалась позиционно-чувствительным детектором VÅNTEC-1 (Bruker). Время экспозиции в каждой экспериментальной точке составляло 0,5 сек. Испытывались образцы газосиликата полученные по принятой на Ивановском ООО «Газобетон» технологии WKB Systems GmbH (Германия) – контрольный образец, и образцы полученные из равных по подвижности смесей и той же плотности

конечного продукта, что и контрольный, но модифицированные 1% и 1,5% микрокремнезема.

Расшифровка проводилась при помощи программного комплекса HighScore Plus version 3.0 с использованием базы данных минералов PDF-2 Release 2004 Crystallography Open Database.

По результатам расшифровки, рис. 4.1-4.4, табл. 4.1-4.2, контрольный образец, не модифицированный микрокремнеземом, в качестве основных новообразований гидросиликатов кальция представлен гилебрандитом (Reference Code 00-042-0538, Hillebrandite - Calcium Silicate Hydroxide, Chemical Formula,  $\text{Ca}_2(\text{Si O}_3)(\text{OH})_2$ , Empirical Formula,  $\text{Ca}_2\text{H}_2\text{O}_5\text{Si}$ ) и гиrolитом (Reference Code 00-042-1452, Gyrolite - Calcium Silicate Hydroxide Hydrate, Chemical Formula,  $\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , Empirical Formula,  $\text{Ca}_4\text{H}_8\text{O}_{20}\text{Si}_6$ ). Кроме того, присутствуют различные соединения гидроалюминатов кальция и алюмогидросиликатов кальция, не прореагировавший кремнезем, а также недожог карбонатных пород.

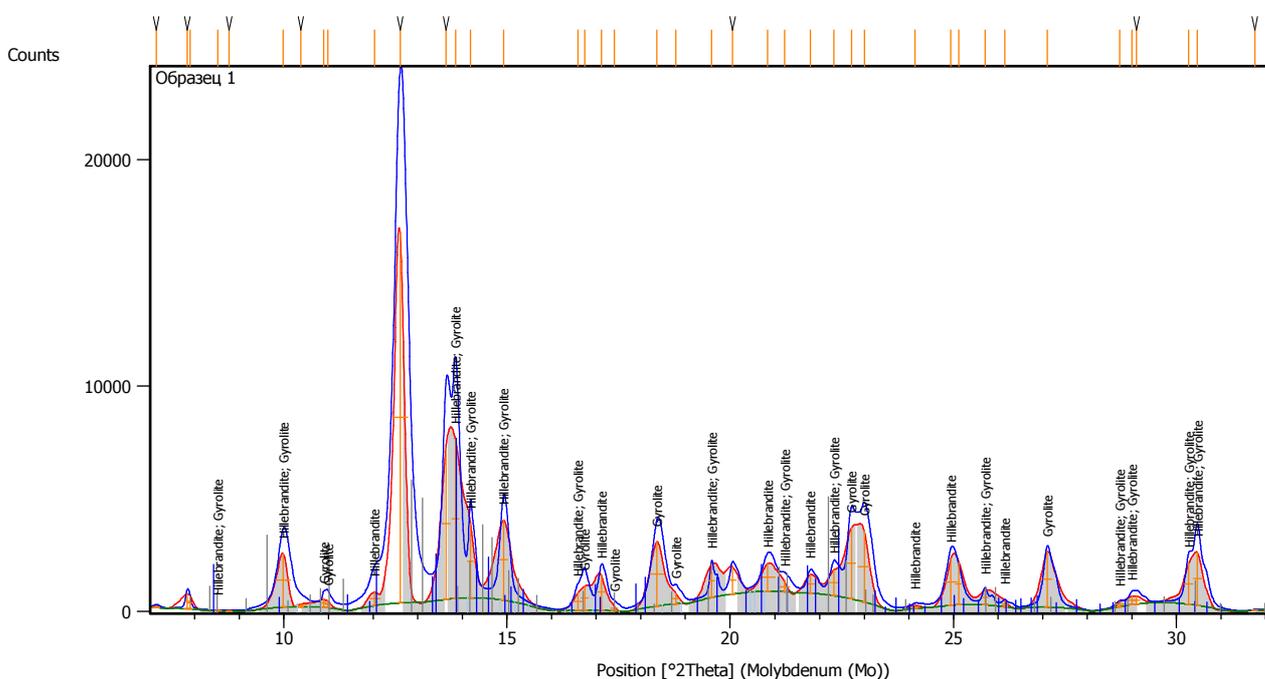


Рис. 4.1. Дифрактограмма контрольного образца

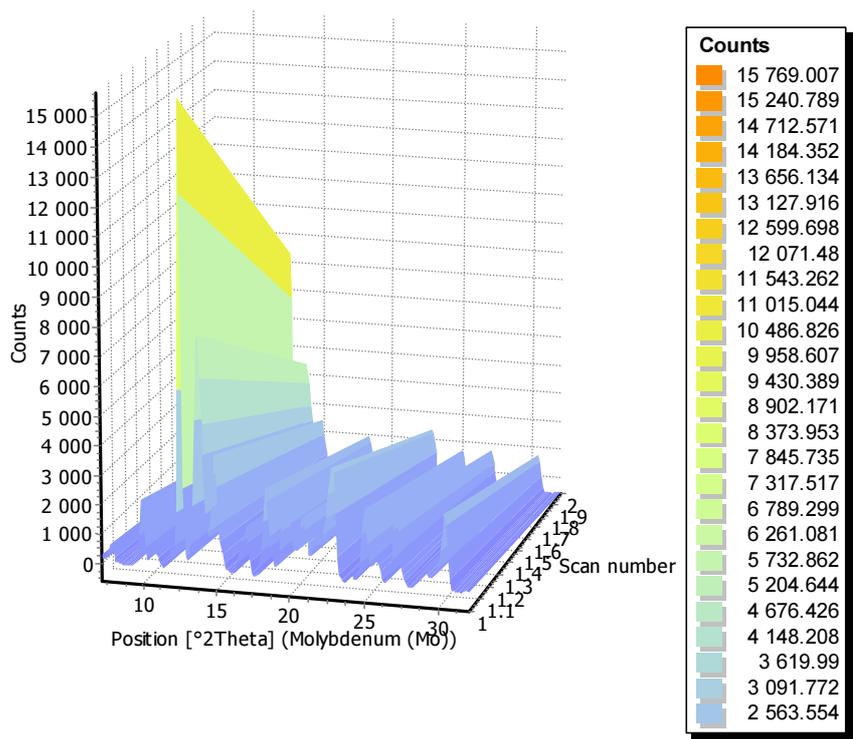


Рис. 4.2. Распределение изолиний дифрактограммы по интенсивности ПИКОВ

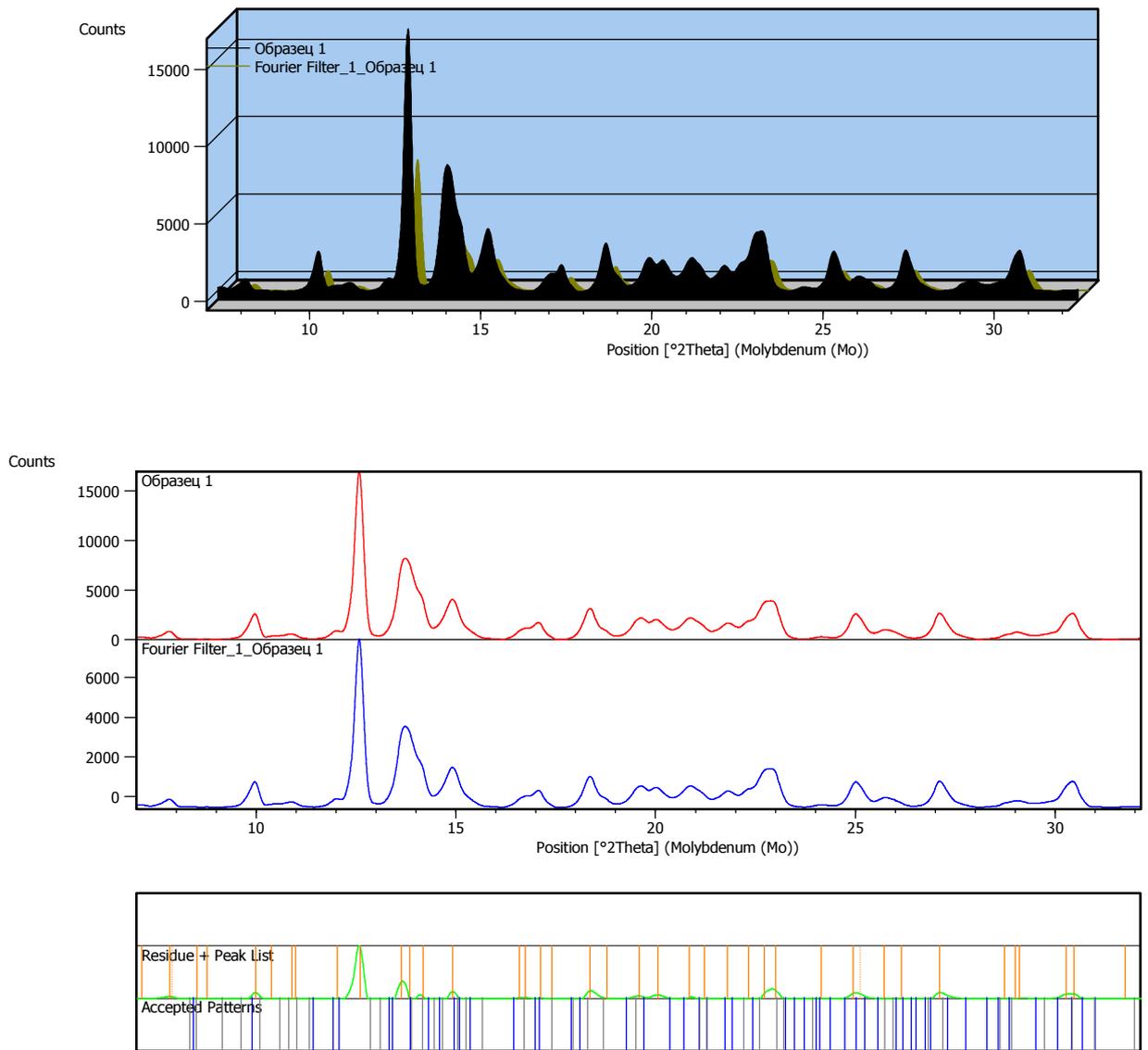


Рис. 4.3. Распределение пиков дифрактограммы до и после фильтрации Фурье

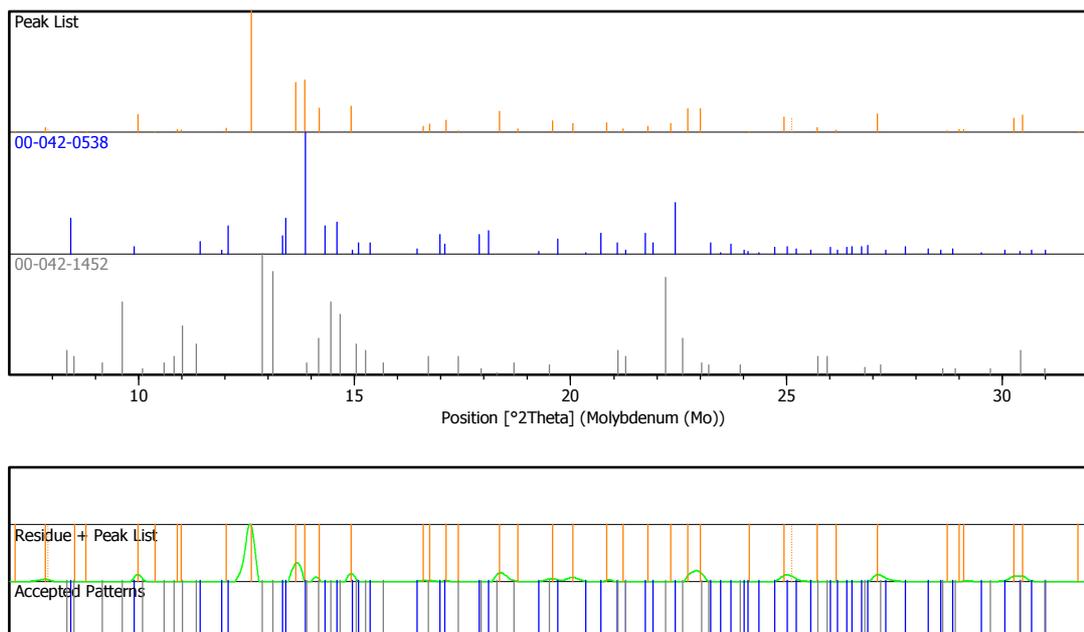


Рис. 4.4. Соответствие пиков дифрактограммы паттернам минералов

Таблица 4.1 – Позиция и интенсивность пиков дифрактограммы

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Matched by
7.1342	87.20	0.1602	5.71179	0.53	0.1922	
7.8329	677.88	0.0977	5.19255	4.13	0.1172	
7.8947	580.61	0.0799	5.18309	3.54	0.0959	
8.5183	6.84	0.1776	4.77542	0.04	0.2131	00-042-0538; 00-042-1452
8.7697	22.17	0.0888	4.63878	0.14	0.1066	
9.9869	2361.83	0.3197	4.07457	14.39	0.3836	00-042-0538; 00-042-1452
10.3765	113.28	0.2842	3.92198	0.69	0.3410	
10.8959	377.30	0.0977	3.73557	2.30	0.1172	00-042-1452
10.9845	298.42	0.1243	3.70552	1.82	0.1492	00-042-1452
12.0237	598.70	0.2309	3.38628	3.65	0.2771	00-042-0538
12.6004	16412.33	0.3374	3.23188	100.00	0.4049	
13.6293	6675.31	0.1865	2.98892	40.67	0.2238	
13.8406	7071.31	0.1598	2.94351	43.09	0.1918	00-042-0538; 00-042-1452
14.1822	3301.00	0.1066	2.87297	20.11	0.1279	00-042-0538; 00-042-1452
14.9169	3537.91	0.1865	2.73221	21.56	0.2238	00-042-0538; 00-042-1452
16.5926	787.37	0.2131	2.45792	4.80	0.2557	00-042-0538; 00-042-1452
16.7415	1065.20	0.1421	2.43622	6.49	0.1705	00-042-1452
17.1100	1569.87	0.1865	2.38412	9.57	0.2238	00-042-0538
17.4049	207.17	0.1421	2.34404	1.26	0.1705	00-042-1452
18.3574	2844.02	0.3019	2.22338	17.33	0.3623	00-042-1452
18.7864	460.60	0.1421	2.17304	2.81	0.1705	00-042-1452
19.5890	1497.59	0.1066	2.08482	9.12	0.1279	00-042-0538; 00-042-1452

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Matched by
20.0536	1201.86	0.1598	2.03699	7.32	0.1918	
20.8391	1236.23	0.3197	1.96102	7.53	0.3836	00-042-0538
21.2147	462.57	0.2131	1.92668	2.82	0.2557	00-042-0538; 00-042-1452
21.8000	828.76	0.1776	1.87556	5.05	0.2131	00-042-0538
22.3190	1154.99	0.1954	1.83248	7.04	0.2344	00-042-0538; 00-042-1452
22.7125	3148.26	0.1954	1.80113	19.18	0.2344	00-042-1452
23.0077	3152.65	0.2575	1.77833	19.21	0.3090	00-042-1452
24.1456	132.03	0.1954	1.69569	0.80	0.2344	00-042-0538
24.9508	2089.81	0.2753	1.64179	12.73	0.3303	00-042-0538
25.1307	1876.01	0.1598	1.64008	11.43	0.1918	
25.7102	678.13	0.1243	1.59408	4.13	0.1492	00-042-0538; 00-042-1452
26.1514	263.98	0.1421	1.56764	1.61	0.1705	00-042-0538
27.1049	2451.82	0.1954	1.51347	14.94	0.2344	00-042-1452
28.7359	216.30	0.1954	1.42923	1.32	0.2344	00-042-0538; 00-042-1452
29.0059	392.15	0.1421	1.41620	2.39	0.1705	00-042-0538; 00-042-1452
29.1126	358.47	0.1421	1.41113	2.18	0.1705	
30.2817	1829.95	0.1776	1.35785	11.15	0.2131	00-042-0538; 00-042-1452
30.4731	2335.56	0.1954	1.34952	14.23	0.2344	00-042-0538; 00-042-1452
31.7568	9.93	0.1243	1.29629	0.06	0.1492	

Таблица 4.2 – Идентификация паттернов минералов

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-042-0538	42	Calcium Silicate Hydroxide	-0.035	0.294	Ca <sub>2</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) ( O H ) <sub>2</sub>
*	00-042-1452	23	Calcium Silicate Hydroxide Hydrate	-0.035	0.224	Ca <sub>4</sub> ( Si <sub>6</sub> O <sub>15</sub> ) ( O H ) <sub>2</sub> !3 H <sub>2</sub> O

Образец соответствующий оптимальному по прочности составу – 1% МК, имеет в своем составе изменения в новообразованиях, рис. 4.5.-4.8, табл. 4.3-4.4. Так наряду с гилебрандитом, появляется более низкоосновная фаза – ксонотлит (Reference Code 00-029-0379, Xonotlite, Calcium Silicate Hydroxide, Chemical Formula, Ca<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>17</sub>(OH)<sub>2</sub>, Empirical Formula, Ca<sub>6</sub>H<sub>2</sub>O<sub>19</sub>Si<sub>6</sub>). Сохраняется присутствие различного рода гидроалюминатов и не прореагировавших пород.

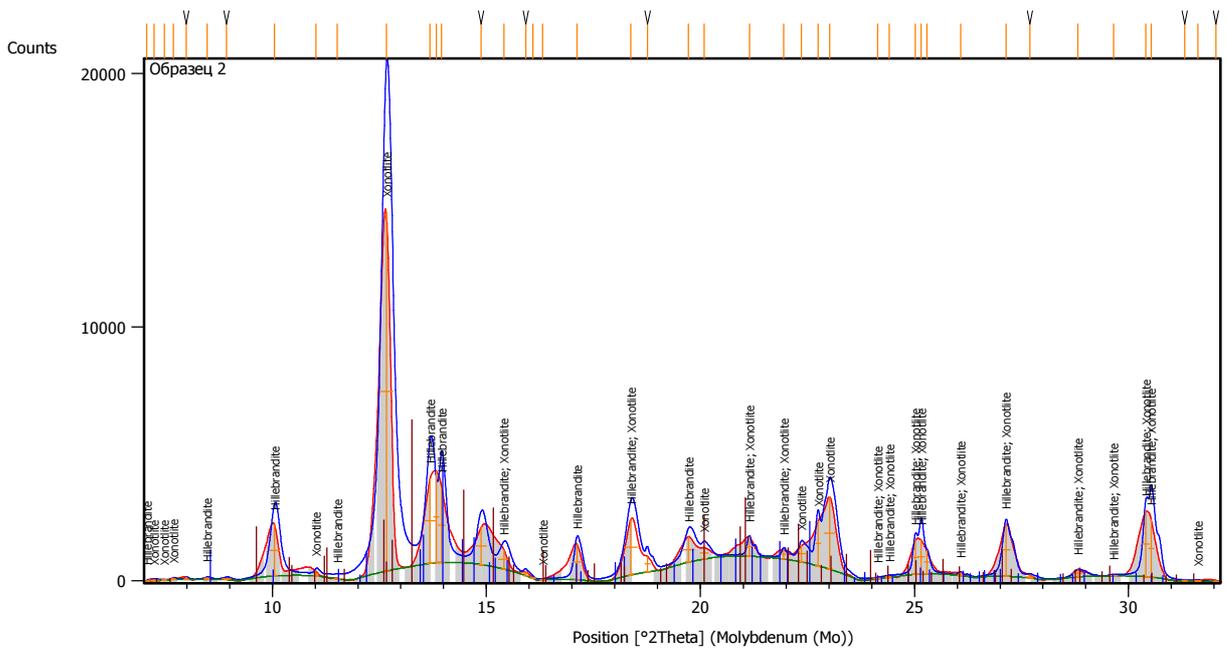


Рис. 4.5 Дифрактограмма образца с содержанием МК 1,0%

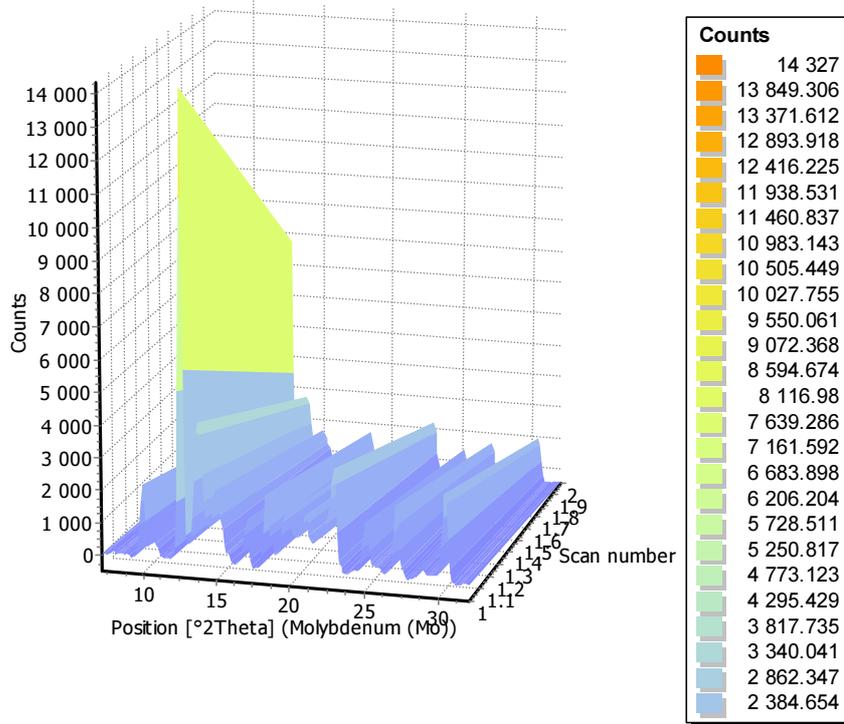


Рис. 4.6. Распределение изолиний дифрактограммы по интенсивности

ПИКОВ

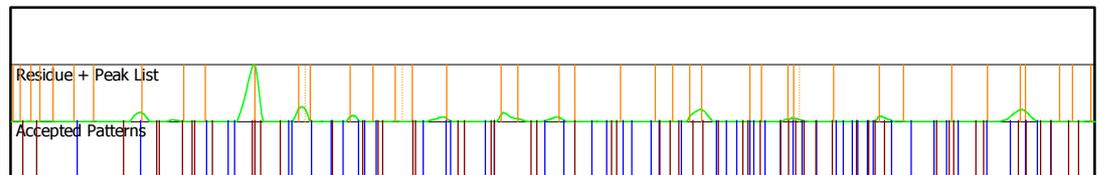
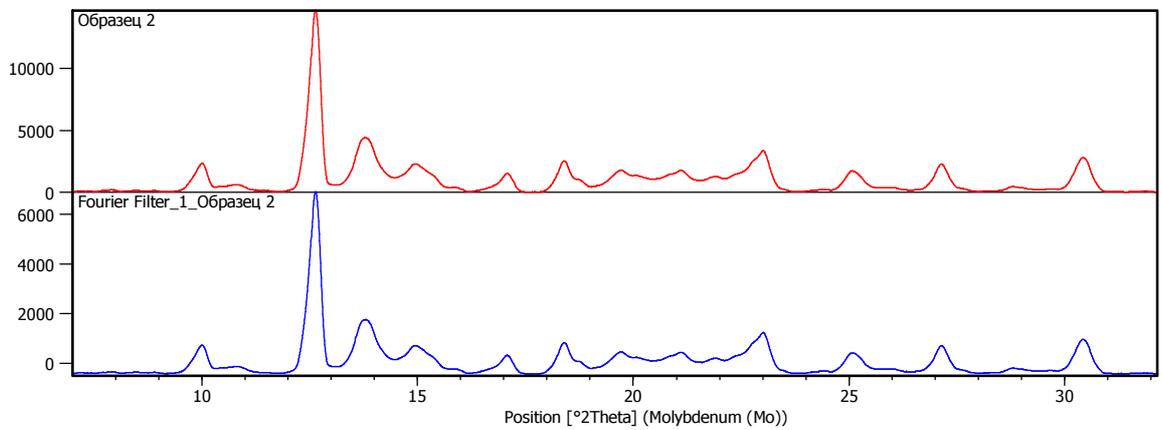
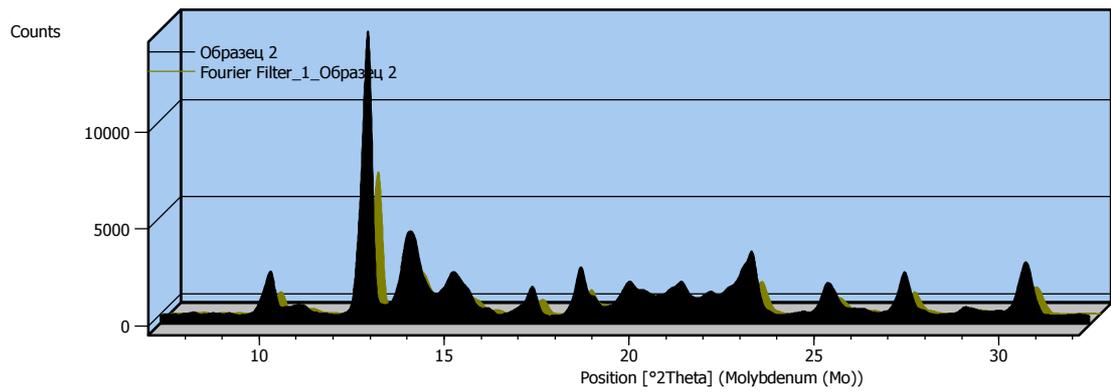


Рис. 4.7. Распределение пиков дифрактограммы до и после фильтрации Фурье

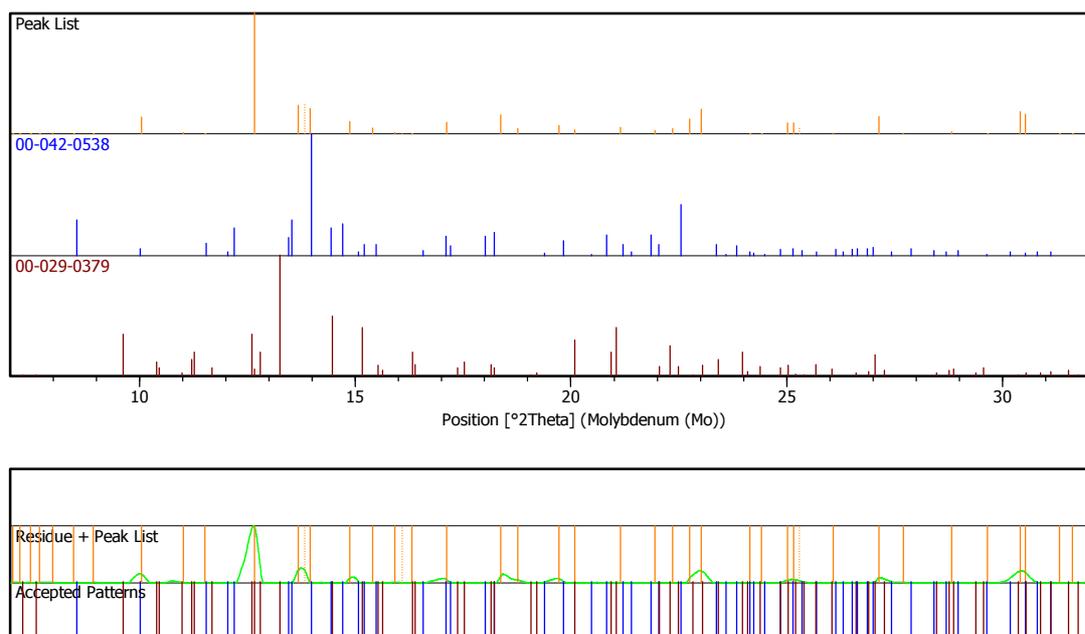


Рис. 4.8. Соответствие пиков дифрактограммы паттернам минералов

Таблица 4.3 – Позиция и интенсивность пиков дифрактограммы

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Matched by
7.0668	21.59	0.0437	5.76625	0.15	0.0524	00-042-0538
7.2334	52.07	0.2330	5.63361	0.37	0.2796	00-029-0379
7.4679	20.00	0.0510	5.45692	0.14	0.0612	00-029-0379
7.6870	59.80	0.0874	5.30164	0.42	0.1049	00-029-0379
7.9825	90.65	0.0583	5.10565	0.64	0.0699	
8.4699	60.18	0.1456	4.81235	0.43	0.1748	00-042-0538
8.9300	65.82	0.2039	4.56488	0.47	0.2447	
10.0471	1998.77	0.2403	4.05840	14.12	0.2884	00-042-0538
11.0204	185.65	0.1019	3.70095	1.31	0.1223	00-029-0379
11.5158	14.22	0.1165	3.54221	0.10	0.1398	00-042-0538
12.6583	14153.79	0.2913	3.22364	100.00	0.3495	00-029-0379
13.6834	3363.20	0.2398	2.97715	23.76	0.2877	00-042-0538
13.8370	3613.29	0.1154	2.96208	25.53	0.1385	
13.9569	2969.32	0.1421	2.91911	20.98	0.1705	00-042-0538
14.8773	1490.97	0.2486	2.73943	10.53	0.2984	
15.4088	744.98	0.2486	2.64548	5.26	0.2984	00-042-0538; 00-029-0379
15.9137	181.84	0.1066	2.56206	1.28	0.1279	
16.0816	6.76	0.0799	2.55083	0.05	0.0959	
16.3208	2.11	0.0710	2.49857	0.01	0.0852	00-029-0379
17.1156	1407.11	0.1687	2.38335	9.94	0.2025	00-042-0538
18.3741	2194.43	0.3108	2.22137	15.50	0.3730	00-042-0538; 00-029-

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Matched by
						0379
18.7672	601.27	0.1066	2.17524	4.25	0.1279	
19.7247	1012.35	0.2842	2.07062	7.15	0.3410	00-042-0538
20.0902	459.17	0.1776	2.03332	3.24	0.2131	00-029-0379
21.1442	757.69	0.1066	1.93304	5.35	0.1279	00-042-0538; 00-029-0379
21.9493	377.46	0.1243	1.86296	2.67	0.1492	00-042-0538; 00-029-0379
22.3602	668.47	0.1776	1.82914	4.72	0.2131	00-029-0379
22.7458	1753.58	0.1243	1.79854	12.39	0.1492	00-029-0379
23.0216	2875.11	0.2398	1.77727	20.31	0.2877	00-029-0379
24.1483	20.80	0.2131	1.69550	0.15	0.2557	00-042-0538; 00-029-0379
24.4076	48.74	0.1776	1.67775	0.34	0.2131	00-042-0538; 00-029-0379
25.0217	1338.62	0.1243	1.63721	9.46	0.1492	00-042-0538; 00-029-0379
25.1573	1339.96	0.1421	1.62853	9.47	0.1705	00-042-0538; 00-029-0379
25.2901	909.53	0.1066	1.62991	6.43	0.1279	
26.0763	131.21	0.1066	1.57208	0.93	0.1279	00-042-0538; 00-029-0379
27.1351	2059.80	0.1865	1.51182	14.55	0.2238	00-042-0538; 00-029-0379
27.7042	119.04	0.1776	1.48135	0.84	0.2131	
28.8219	271.67	0.2309	1.42505	1.92	0.2771	00-042-0538; 00-029-0379
29.6546	32.02	0.1776	1.38589	0.23	0.2131	00-042-0538; 00-029-0379
30.4124	2582.82	0.1510	1.35215	18.25	0.1812	00-042-0538; 00-029-0379
30.5359	2257.44	0.1332	1.34681	15.95	0.1598	00-042-0538; 00-029-0379
31.3176	4.78	0.0266	1.31400	0.03	0.0320	
31.6267	32.69	0.1421	1.30148	0.23	0.1705	00-029-0379
32.0466	13.00	0.0444	1.28487	0.09	0.0533	

Таблица 4.4 – Идентификация паттернов минералов

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-042-0538	38	Calcium Silicate Hydroxide	0.087	0.193	Ca <sub>2</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) ( O H ) <sub>2</sub>
*	00-029-0379	25	Calcium Silicate Hydroxide	0.057	0.280	Ca <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub> ( O H ) <sub>2</sub>

Перенасыщенный аморфным кремнеземом образец, соответствующий расходу МК = 1,5 % имеет в основе новообразований тоберморитоподобные гидросиликаты, рис. 4.9-4.12, табл. 4.5-4.6, (Reference Code 00-045-1479, Clinotobermorite - Calcium Silicate Hydrate, Chemical Formula,  $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_{18} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ , Empirical Formula,  $\text{Ca}_5\text{H}_{10}\text{O}_2\text{Si}_6$ . Reference Code, 00-033-0306, Calcium Silicate Hydrate, Chemical Formula,  $\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ), а также сулунит (Reference Code 00-026-0307, Suolunite - Calcium Silicate Hydroxide Hydrate, Chemical Formula,  $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , Empirical Formula,  $\text{Ca}_2\text{H}_4\text{O}_8\text{Si}_2$ ). По-прежнему присутствуют гидрогранаты и не прореагировавшие исходные минералы.

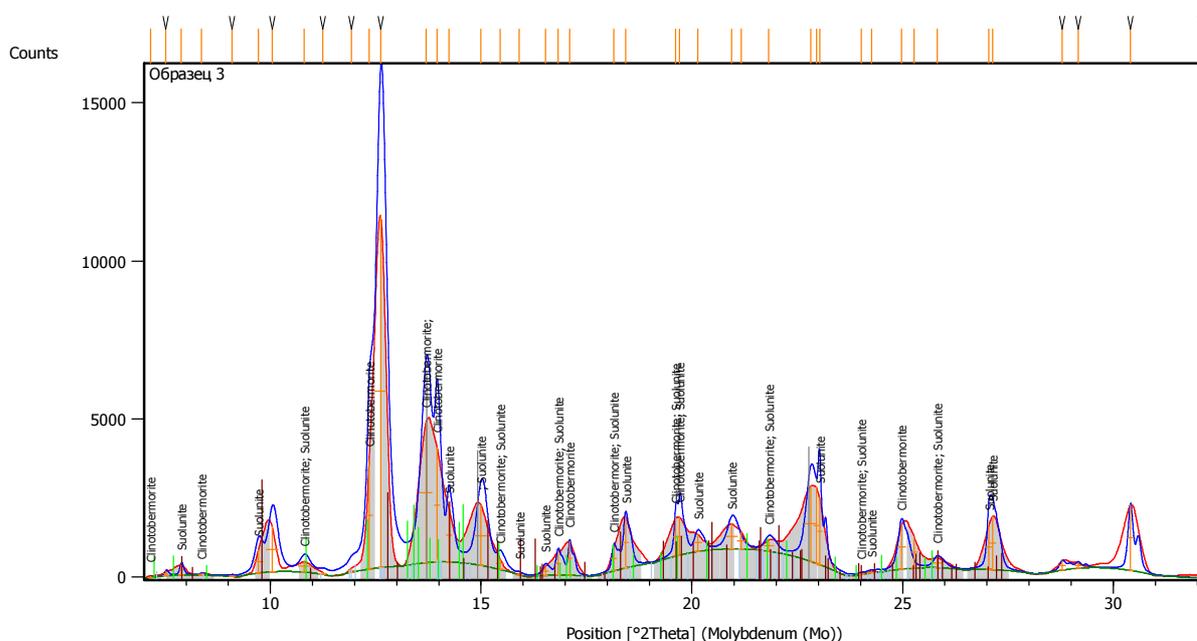


Рис. 4.9. Дифрактограмма образца с содержанием МК 1,5%

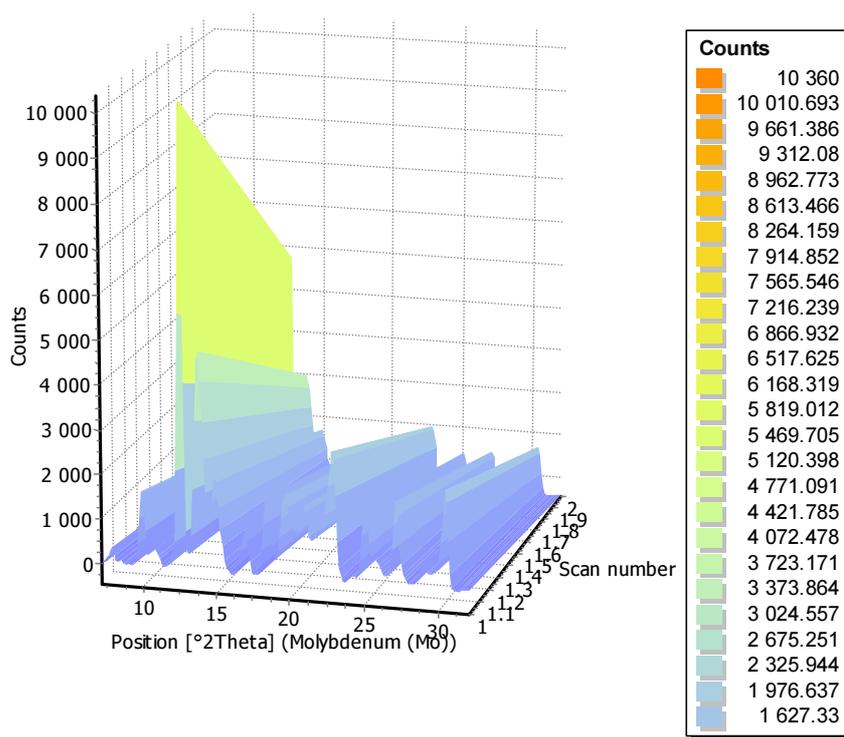
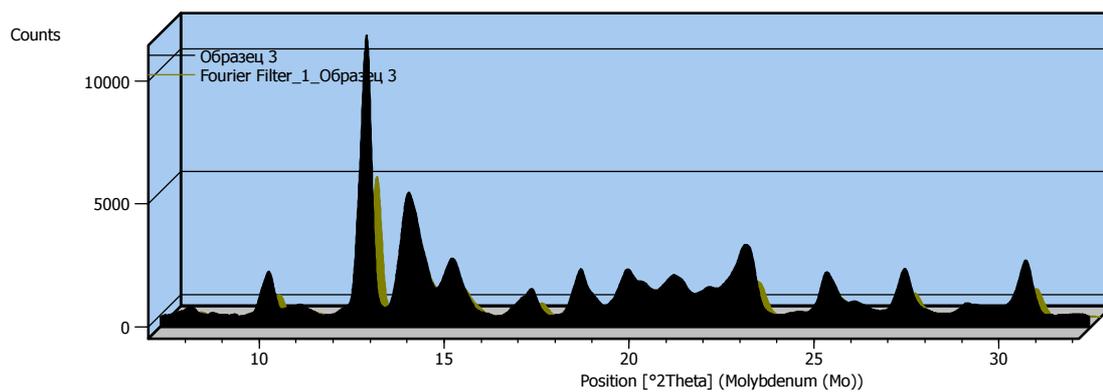


Рис. 4.10. Распределение изолиний дифрактограммы по интенсивности ПИКОВ



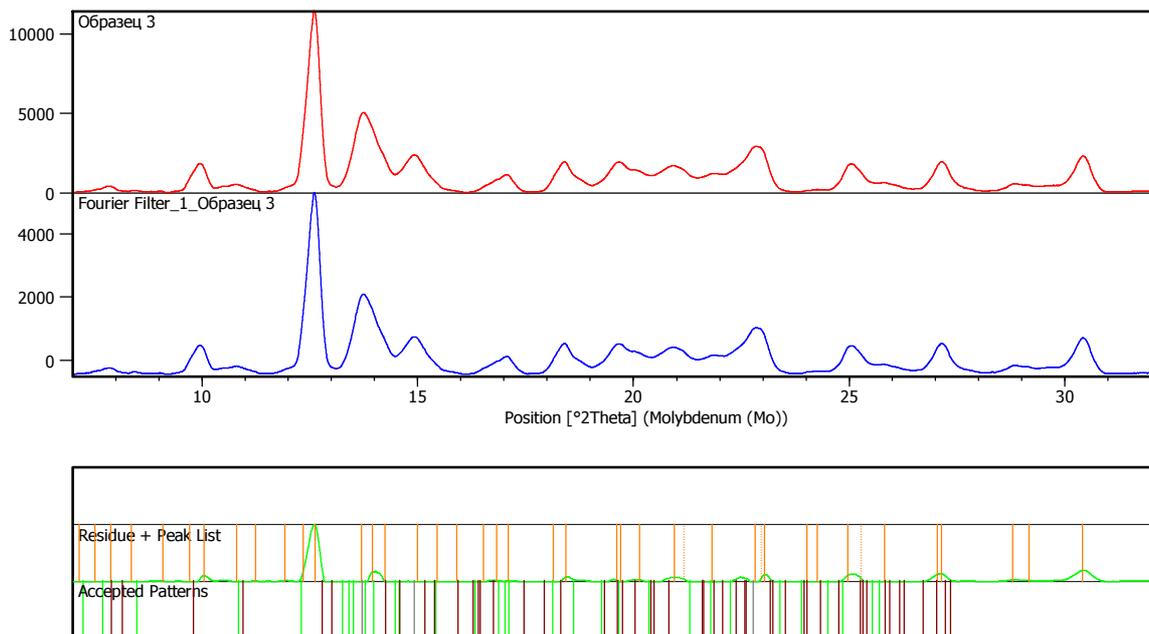


Рис. 4.11. Распределение пиков дифрактограммы до и после фильтрации Фурье

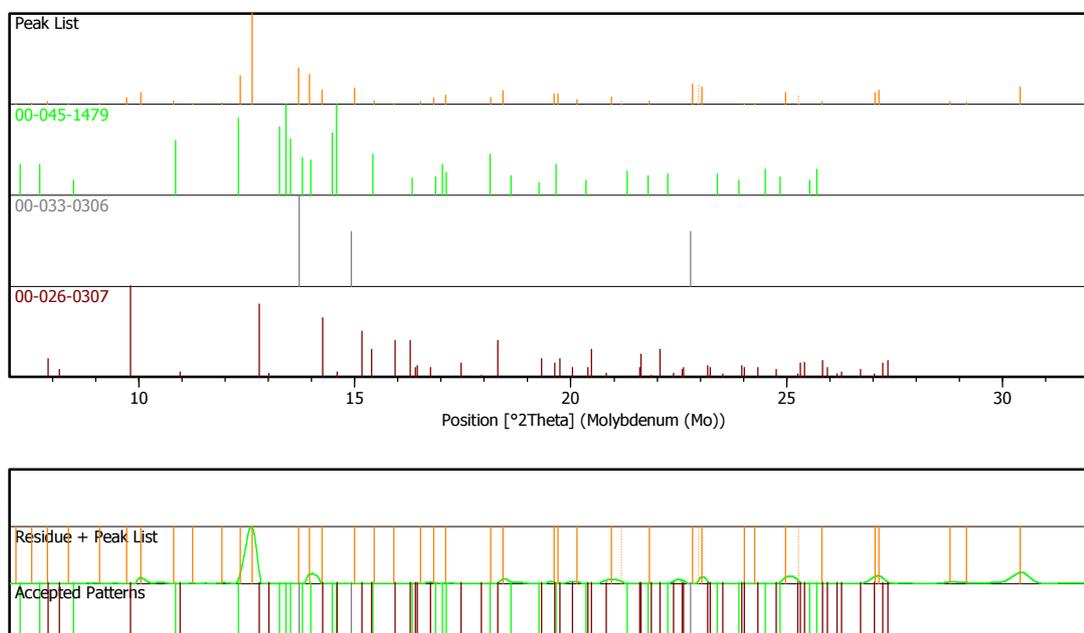


Рис. 4.12. Соответствие пиков дифрактограммы паттернам минералов

Таблица 4.5 – Позиция и интенсивность пиков дифрактограммы

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d- spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Matched by
7.1459	35.52	0.0437	5.70244	0.32	0.0524	00-045-1479
7.5223	135.86	0.0874	5.41751	1.22	0.1049	
7.8801	311.53	0.0874	5.17190	2.79	0.1049	00-026-0307
8.3700	39.83	0.0874	4.86969	0.36	0.1049	00-045-1479
9.0907	16.08	0.1165	4.48434	0.14	0.1398	
9.7105	721.15	0.2039	4.19874	6.46	0.2447	00-026-0307
10.0456	1412.04	0.2621	4.05898	12.66	0.3146	
10.8005	339.18	0.2621	3.77607	3.04	0.3146	00-045-1479; 00-026-0307
11.2362	54.84	0.1748	3.63007	0.49	0.2097	
11.9182	117.79	0.1456	3.42304	1.06	0.1748	
12.3454	3435.35	0.1456	3.30503	30.79	0.1748	00-045-1479
12.6125	11155.97	0.2621	3.23529	100.00	0.3146	
13.6880	4430.73	0.2840	2.98216	39.72	0.3408	00-045-1479; 00-033-0306
13.9557	3616.35	0.1311	2.92524	32.42	0.1573	00-045-1479
14.2396	1719.65	0.1165	2.86721	15.41	0.1398	00-026-0307
15.0013	1913.41	0.2767	2.72239	17.15	0.3320	00-033-0306; 00-026-0307
15.4475	352.23	0.1748	2.64421	3.16	0.2097	00-045-1479; 00-026-0307
15.9117	38.05	0.0874	2.56756	0.34	0.1049	00-026-0307
16.5192	289.69	0.1456	2.47374	2.60	0.1748	00-026-0307
16.8323	739.13	0.1165	2.42805	6.63	0.1398	00-045-1479; 00-026-0307
17.1047	1045.02	0.0947	2.38966	9.37	0.1136	00-045-1479
18.1529	755.61	0.1165	2.25274	6.77	0.1398	00-045-1479; 00-026-0307
18.4337	1599.53	0.1311	2.21871	14.34	0.1573	00-026-0307
19.6213	1217.49	0.0888	2.08142	10.91	0.1066	00-045-1479; 00-026-0307
19.7111	1204.01	0.1311	2.07621	10.79	0.1573	00-045-1479; 00-026-0307
20.1397	554.58	0.1748	2.03247	4.97	0.2097	00-026-0307
20.9453	799.85	0.2842	1.95118	7.17	0.3410	00-026-0307
21.1784	548.15	0.1776	1.94162	4.91	0.2131	
21.8287	377.53	0.2486	1.87312	3.38	0.2984	00-045-1479; 00-026-0307
22.8220	2409.69	0.2664	1.79261	21.60	0.3197	00-033-0306
22.9542	2419.31	0.1066	1.79320	21.69	0.1279	
23.0360	2121.14	0.0799	1.77618	19.01	0.0959	00-026-0307
24.0222	27.36	0.1421	1.70427	0.25	0.1705	00-045-1479; 00-026-0307
24.2606	52.94	0.2131	1.68776	0.47	0.2557	00-026-0307
24.9750	1414.91	0.1954	1.64022	12.68	0.2344	00-045-1479
25.2808	987.07	0.1421	1.63050	8.85	0.1705	

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Matched by
25.8201	317.54	0.2131	1.58740	2.85	0.2557	00-045-1479; 00-026-0307
27.0553	1419.55	0.1066	1.51619	12.72	0.1279	00-026-0307
27.1361	1692.61	0.1421	1.51176	15.17	0.1705	00-026-0307
28.7970	295.89	0.1598	1.42626	2.65	0.1918	
29.1644	177.49	0.1421	1.40867	1.59	0.1705	
30.4135	2075.59	0.1332	1.35210	18.61	0.1598	
32.0606	26.16	0.0888	1.28432	0.23	0.1066	

Таблица 4.6 – Идентификация паттернов минералов

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-045-1479	29	Calcium Silicate Hydrate	-0.019	0.190	Ca <sub>5</sub> Si <sub>6</sub> ( O , O H , F ) <sub>18</sub> ! <sub>5</sub> H <sub>2</sub> O
*	00-033-0306	23	Calcium Silicate Hydrate	0.312	0.370	Ca <sub>1.5</sub> Si O <sub>3.5</sub> ! <sub>x</sub> H <sub>2</sub> O
*	00-026-0307	31	Calcium Silicate Hydroxide Hydrate	-0.044	0.180	Ca <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>2</sub> ! H <sub>2</sub> O

Значительный рост прочности второго образца, содержащего 1% микрокремнезема, вероятнее всего объясняется синтезом устойчивого низкоосновного ксонотлита, относящегося, как и гилебрандит к группе волластонитов, но отличающегося большей твердостью (6,5 по шкале Мооса). По структуре он волокнист, в агрегатах очень вязок. Гиролит в составе контрольного образца имеет более низкую твердость (3,5) и в отличие от волокнистой структуры волластонитовой группы минералов имеет пластинчатое строение, чьи чешуйки слабо агрегируются в конгломераты.

Третий образец, синтезированный из малоизвестковой смеси, в связи с избыточным содержанием аморфного кремнезема, представлен тоберморитовой группой гидросиликатов кальция, имеет меньшую по сравнению со вторым – оптимальным образцом, прочность в связи с относительно низкой твердостью минералов 3,5-4,5 и пластинчатой слабосвязанной структурой новообразований.

Таким образом возможно повысить прочностные показатели газобетона на 70-75% направленным синтезом низкоосновных гидросиликатов без изменения существующих на предприятиях технологических переделов, путем модификации исходного состава смеси оптимальным количеством активной высокодисперсной кремнеземистой добавкой.

#### **4.3. Порометрические и структурные особенности композита и их влияние на физико-механические свойства ячеистого бетона**

Газосиликат являются гетерогенным пористым телом. Общая или эффективная теплопроводность подобных систем определяется теплопроводностями твердых тв и газовых газ. фаз или  $\lambda = \lambda_{тв.} + \lambda_{газ.}$

Учитывая тот факт, что тепловой поток является векторной величиной, его суммарное значение коэффициента теплопроводности для гетерогенных систем зависит не только от количественного соотношения фаз, но и от их взаимного расположения, характера пограничного слоя, степени непрерывности или дискретности фаз, т.е. от структуры материала.

Также неодинаковыми будут теплопроводности у материалов с непрерывной основной фазой и отдельных включений другой фазы, что соответствует структуре керамических материалов и бетонов с плавающей структурой или в материалах, где основная фаза является дискретной, соответствует структуре, подобной конгломератам и бетонам с контактной структурой.

Газобетоны имеют значительную долю газовой фазы, которая колеблется от нескольких процентов у теплоизоляционно-конструкционных материалов до 90% у искусственных теплоизоляционных материалов.

С увеличением газовой фазы или пористости теплопроводность системы уменьшается, так как уменьшается доля объема более теплопроводной твердой фазы, а доля теплоизоляционной фазы возрастает. Кроме того при увеличении пористости теплопроводность системы

уменьшается еще и за счет уменьшения теплопроводности самой твердой фазы. Это объясняется тем, что поры, образуя новые поверхности в плотной структуре, становятся центрами рассеяния, примерно такими как дефекты решетки или границы зерен примеси. Это уменьшает среднюю длину свободного пробега частиц и снижает фононную теплопроводность системы.

Зависимость “теплопроводность – пористость” хорошо отвечает условию для непрерывной твердой фазы с изолированными порами. Однако, из-за того, что в теплообмене участвуют не только процессы кондукции, но и конвекции и радиации, то и теплопроводность материала будет зависеть не только количества пор, но и от их формы. При изменении вида и размера ячейки, изменяется не только коэффициент эффективной теплопроводности, для одного материала (керамики) при одних и тех же значениях пористости, но и закономерности изменения теплопроводности от пористости.

Значимыми факторами влияющими на эффективную теплопроводность при учете конвекции и излучения являются размер пор и температура. Так, влияние переноса теплоты излучением на теплопроводность пор пропорционально их условному диаметру и кубу температуры:

$$k_{и} = 4d n^2 s E T^3 ,$$

где  $n$  - показатель преломления среды;

$s$  - коэффициент лучеиспускания;

$E$  - константа, зависящая от свойств материала;

$T$  - абсолютная температура.

Отсюда следует, что наличие крупных пор приводит к повышению общей теплопроводности системы, особенно при высокой температуре, в то время как мелкие поры являются хорошим препятствием для переноса теплоты.

Это хорошо иллюстрирует, табл. 4.7., изменение теплопроводности воздуха в порах различного диаметра представлено в табл. следующего слайда. С увеличением размера пор теплопроводность воздуха растет.

Таблица 4.7. – Влияние размера пор на теплопроводность воздуха в них при 300<sup>0</sup>К

Диаметр пор, мм	$\lambda$ , Вт/(мК)
0,1	0,026
1	0,029
2	0,038
4	0,041
5	0,044
6	0,053
10	0,063

Таким образом, технические и эксплуатационные характеристики газобетона – его средняя плотность, прочность, теплопроводность, связаны не только со свойствами матрицы бетона, но и с его поровой структурой. От распределения пор по размерам, количества в единице объема, их формы, целостности структуры, закрытости или открытости зависят основные физико-механические свойства ячеистого бетона. В общем случае, наибольшая прочность и наименьшая теплопроводность газосиликата, при одинаковой средней плотности, будет у бетона с наименьшим размером закрытых однородных по размеру и распределению пор. В обеспечении создания оптимальной поровой структуры основную роль играет качество газообразователя – его свойствами для управления подъема массива и свойствами, влияющими на образования пор [133].

Важными параметрами для процесса подъема массива являются параметры процесса газовыделения. Процесс выделения водорода, который всегда характерен для алюминиевого газообразователя определяется максимумом реакции в мл/мин и характеризует подъемную силу

газообразователя и, соответственно, его пригодность для низкой, средней и высокой плотности в производстве ячеистого бетона.

Не менее важным является процесс затухания газовыделения, вследствие того, что для получения бетонов низкой плотности, необходимо быстрое затухание газовыделения после превышения максимального предела. В противном случае, процесс газообразования в массиве будет нестабильным, что может привести к разрушению вспученной бетонной смеси.

Для более плотных бетонов из смесей низкой подвижности, напротив, для обеспечения равномерности поровой структуры, требуются алюминиевые составы с замедленной реакционной способностью. Благодаря этому можно существенно уменьшить количество крупных пор (макропор), представляющих собой серьезный недостаток. Замедленное газовыделение также позволяет на начальном этапе оптимизировать В/Т соотношение в рецептуре ячеистого бетона, вследствие чего снижается риск «склеивания» автоклавированного массива, особенно в системе вертикальной резки. Кроме того, следует учесть энерготехническое преимущество массивов с низким содержанием воды в процессе автоклавирования.

Непосредственное влияние на распределение размеров пор и опосредованное, через кинетику газовыделения, – на протекание процесса вспучивания оказывает тонкость измельчения алюминиевых паст и порошков. Тонкость измельчения в свою очередь характеризуется верхним размером 50% частиц на графике распределения их по крупности –  $d_{50}$ . В алюминиевых пастах и порошках общая ширина диапазона продукции включает значения  $d_{50}$  от 10 мкм до 120 мкм.

Другие показатели тонкости помола – являются удельная поверхность в  $\text{см}^2/\text{г}$  и насыпная плотность в  $\text{г}/\text{см}^3$ . Эти характеристики позволяют различать газообразователи одинаковые по значению  $d_{50}$ , но имеющие различную форму частиц. Так для частиц пластинчатой формы при одинаковых параметрах  $d_{50}$  при уменьшении толщины пластин происходит увеличение

его удельной поверхности. Если поверхности частиц при этом остаются без изменений, то приращение удельной поверхности означает увеличение количества частиц. Количество частиц на единицу массы увеличивается экспоненциально с уменьшением толщины частиц. Поскольку каждая алюминиевая частица генерирует один или более газовый пузырек на единицу объема ячеистого бетона, то количество пор на единицу объема в массиве зависит от размера алюминиевых частиц. Таким образом маленькие и тонкие алюминиевые частицы способствуют образованию большего количества более мелких пор.

Различие размеров пор бетона, произведенного на основе различных газообразователей, можно оценить на основании среднего размера пор и распределении пор по крупности. Такая оценка называется порометрией. Основными методами порометрии являются адсорбционный метод, применимый для исследования пор в диапазоне 0,35-100 нм, и ртутная порометрия, используемая для анализа пор с размерами 3-300 000 нм. Ограниченное применение в порометрии имеют также газовая и жидкостная пикнометрия, калориметрия, газовая хроматография, электронная просвечивающая микроскопия, оптические и рентгеноструктурные методы. Однако эти методы трудоемки, требуют специального оборудования, что делает невозможным их применение для оперативной оценки качества газообразователей и газобетона в заводских условиях.

С нашей точки зрения достойной альтернативой вышеуказанных методов является применение статистического метода анализа неоднородностей изображений, т.е. возможность получения статистической информации о распределении пор по оцифрованному изображению фотографии шлифа массива бетона.

Так оцифрованное в градациях серого изображение может быть представлено в виде матрицы целых чисел, лежащих в интервале от 0 до 255, где 0 соответствует нулевой интенсивности, а 255 - максимальной интенсивности. Таким образом, алгоритмы получения характеристик

неоднородностей основаны на некоторых операциях с данными числовыми матрицами [4].

Простейшей мерой неоднородности всего изображения либо произвольной его части может служить среднеквадратическое отклонение яркостей пикселей относительно среднего значения яркости (3.1):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{ij} - \langle I \rangle)^2}{M \cdot N}} \quad (4.1)$$

В этой формуле:  $I_{ij}$  – матрица яркостей пикселей изображения,  $\langle I \rangle$  – среднее значение яркости изображения,  $M$  и  $N$  – соответственно число строк и столбцов матрицы  $I_{ij}$ ,  $S$  – искомое среднеквадратическое отклонение.

Однако, такая характеристика ничего не говорит о размерах и других особенностях неоднородностей. Предлагаемые Яшеним В.В. [134] алгоритмы заключаются в анализе статистических характеристик массивов среднеквадратических отклонений яркостей для достаточно большого количества областей определенной формы, произвольного размера и ориентации, выделяемых из изображения случайным образом.

Алгоритм преобразования пиксельного изображения реализован в среде MathCAD Марычев М.О., ННГУ им.Н.И. Лобачевского, физический факультет, кафедра кристаллографии и экспериментальной физики. Нижний Новгород, был нами адаптирован для целей порометрии, что позволило установить закономерности распределения пор по изображениям шлифов, рис. 3.8.

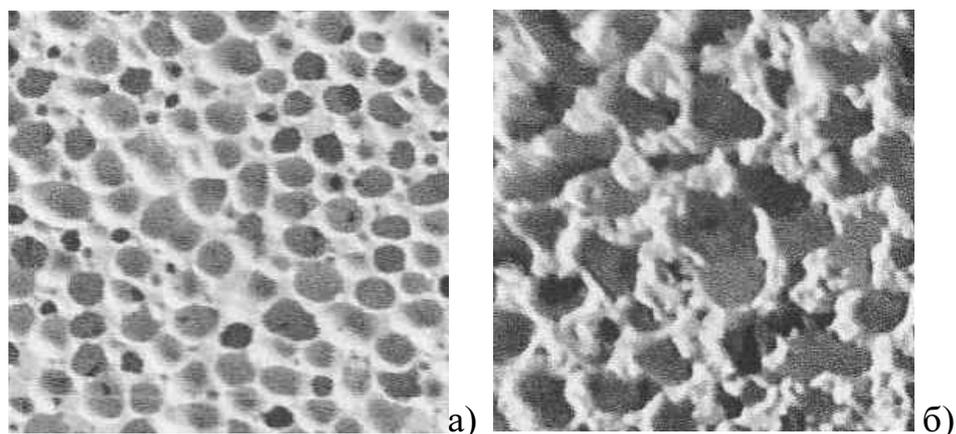
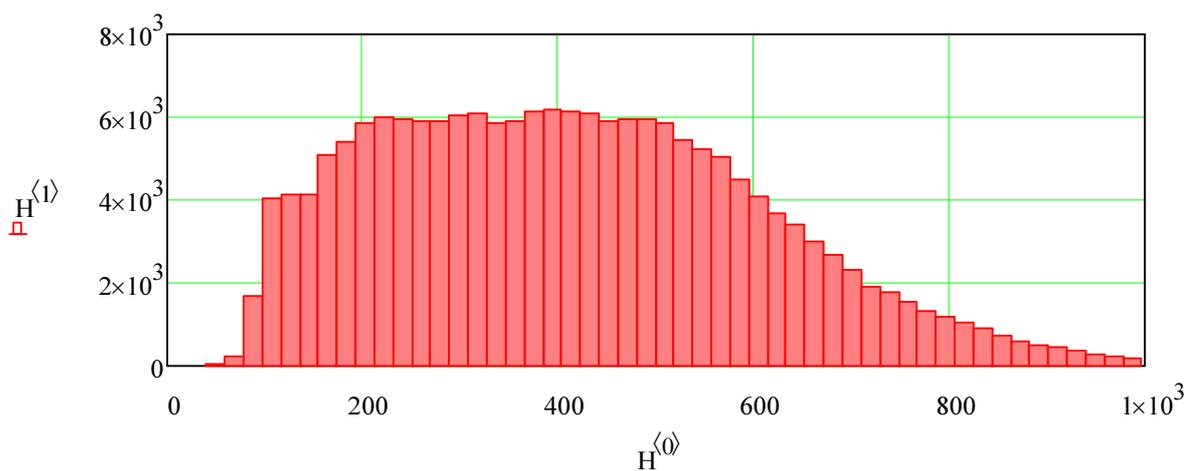


Рис. 4.13. Цифровое изображение пор в массиве газобетона, а) для мелкого порообразователя, б) для крупного порообразователя

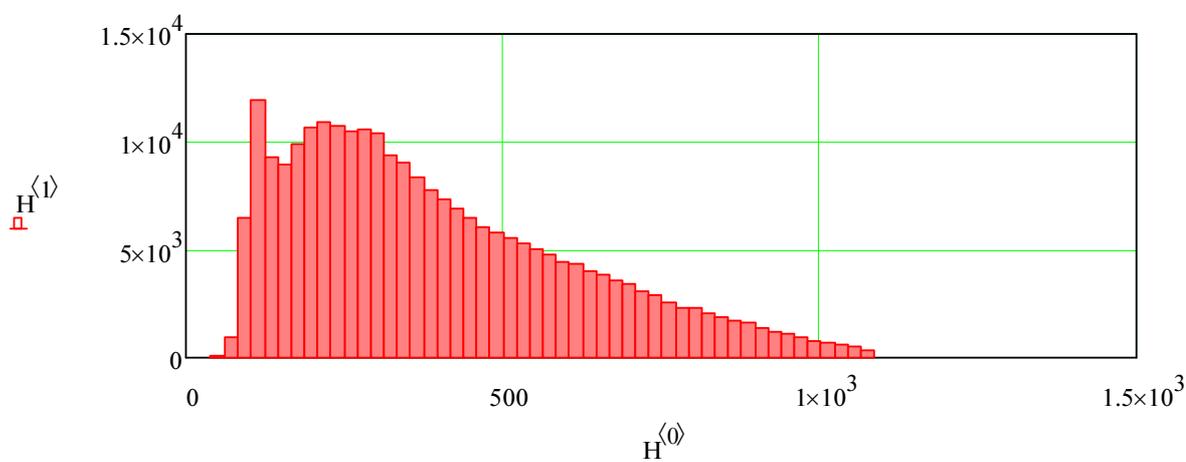
После фильтрации определяются точки смены знака функции яркости для конкретного столбца матрицы, вычисляется количество элементов сложного вектора, соответствующих каждому столбцу, определяются его статистические характеристики.

Для пересчета значений элементов столбцов матрицы из пикселей в размерные значения – в микрометры, вводится масштабный коэффициент, который можно определить с помощью контрольного фотоснимка с изображением стандартного объект-микрометра, полученного при тех же параметрах, что и анализируемое изображение слоёв, и оцифрованного с тем же разрешением.

После этого возможно построить гистограммы распределения числа пор на единицу площади снимка, который и будет искомой характеристикой, рис. 2.



а)



б)

Рис. 4.14. Гистограмма распределения пор по размерам, мкм.

а) для мелкого порообразователя, б) для крупного порообразователя

Как видно из графиков, для более мелких порообразователей характерно близкое количество равномерно распределенных более мелких пор и незначительное содержание крупных пор, в то время как для более грубомолотого крупного порообразователя наличествует выраженная положительная асимметрия, существенное различие между средней пористостью и модой, присутствует большее количество крупных пор размером более 1 мм.

В любом случае, характеристикам газообразователя необходимо уделять такое же большое внимание, как, например, вяжущим веществам: извести и цементу.

Для установления зависимости изменения распределения пор от концентрации кремнеземистого модификатора и количества армирующих микроволокон, при реализации активного эксперимента, была дополнительно проведена фазоконтрастная порометрия образцов. Результаты сканирования и гистограммы распределения приведены на рис. 4.10-4.11.

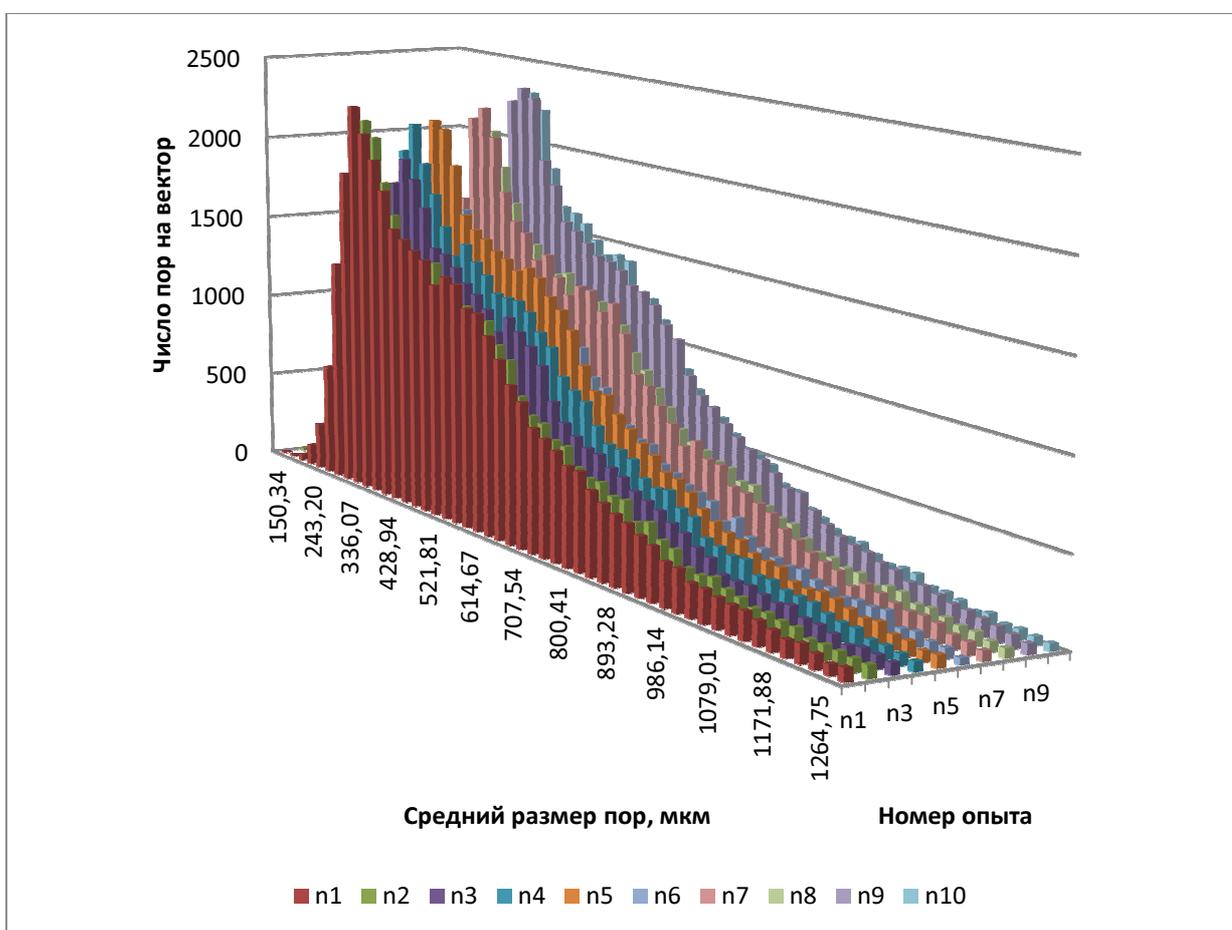


Рис. 4.15 Гистограмма распределения пор по размеру

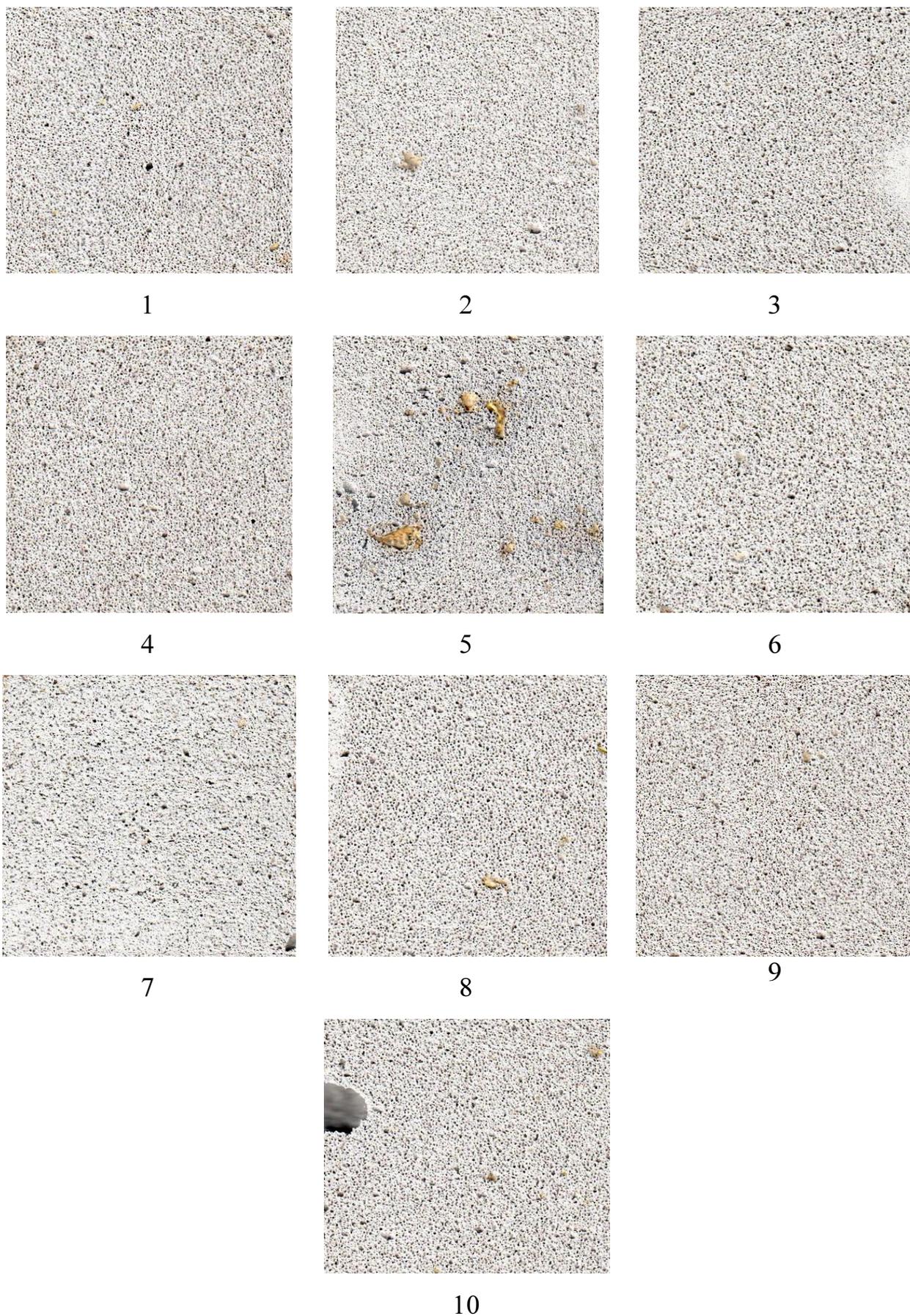


Рис. 4.16. Цифровое изображение распределения пор в массиве газосиликтата

Рак видно из анализа гистограмм распределения пор, влияние модифицирующего кремнеземистого компонента и микроармирующего волокна носит незначимый характер, при сохранении равноподвижности смеси и применении одного и того же газообразователя. Основной размер массива пор колеблется в интервале от 250 до 700 мкм, что обеспечивает минимальную теплопроводность, при оптимальной морозостойкости, так как поры с размерами выше 200 мкм относятся к безопасным.

## **ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОБЕТОНА**

Согласно требованиям ГОСТ 31359-2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия, у газосиликата попределяют следующие физико-механические и теплофизические характеристики:

- среднюю плотность;
- прочность на сжатие;
- морозостойкость;
- теплопроводность;
- усадку при высыхании;
- паропроницаемость.

Ниже представлены результаты сравнительных испытаний характеристик разработанного оптимального состава газобетона автоклавного твердения марки D500 и класса B2,5 с аналогичным материалом, выпускаемым на заводе ООО «Газобетон» г. Иваново.

### **5.1. Физико-механические характеристики газосиликата**

Согласно требованиям ГОСТ 31359-2007 ячеистые бетоны должны иметь следующие классы по прочности на сжатие: B0,35; B0,5; B0,75; B1,0; B1,5; B2,0; B2,5; B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5; B15; B17,5; B20. Фактическое значение прочности на сжатие ячеистого бетона (кроме теплоизоляционного) должно быть не ниже требуемой прочности, определенной по ГОСТ 18105.

Ячеистые бетоны должны иметь следующие марки по средней плотности: D200; D250; D300; D350; D400; D450; D500; D600; D700; D800; D900; D1000; D1100; D1200. Фактическое значение средней плотности ячеистого бетона не должно быть выше требуемой, определенной по ГОСТ 27005. Ячеистые бетоны в зависимости от назначения должны быть:

- теплоизоляционный: класса по прочности на сжатие не ниже В0,35, марки по средней плотности - не выше D400;

- конструкционно-теплоизоляционный: класса по прочности на сжатие не ниже В1,5, марки по средней плотности - не выше D700;

- конструкционный: класса по прочности на сжатие не ниже В3,5, марки по средней плотности - D700 и выше.

Прочностные характеристики газобетона сильно зависят от влажности. Учитывая, что после автоклавирования газобетон имеет влажность 35%, а отпускается газобетон с влажностью до 25%, то важной характеристикой является исследования изменения прочности от влажности. На рис. 5.1 приведены результаты исследований прочностных показателей аналогичных по классам (D500) и марки (В2.5) газобетона выпускаемого на ООО «Газобетон» Иваново и разработанным оптимальным составом газобетона с расходом микрорекемнезема равным 1% и расходом микроцеллюлозы 2%.

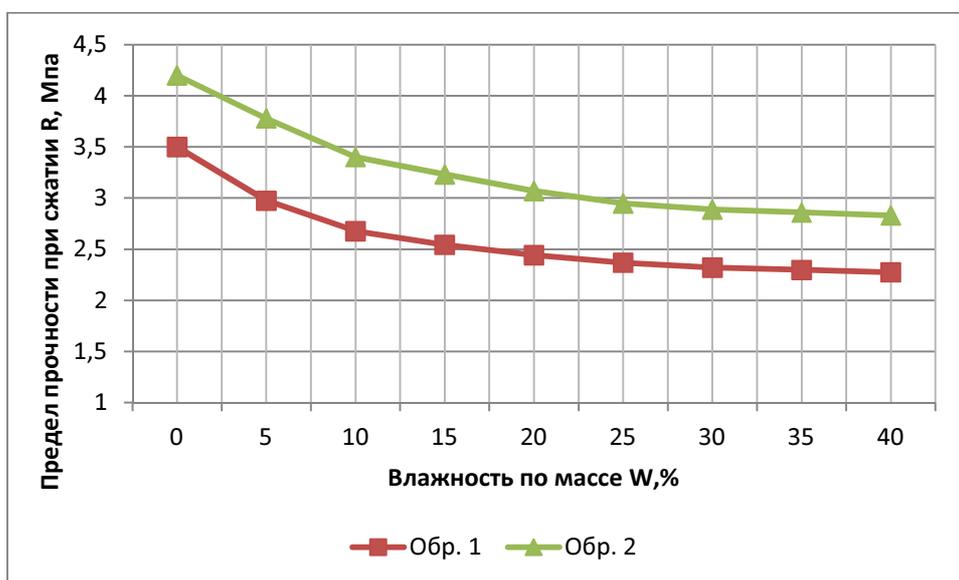


Рис. 5.1. Зависимость прочности газобетона от его влажности,  
Обр.1 – образец производства ООО «Газобетон» г. Иваново,  
Обр. 2 – образец оптимального состава

Анализ графиков позволяет утверждать, что оптимальный по составу образец разработанного газобетона, не только имеет более высокую

прочность, при той же плотности, но и имеет более пологую кривизну графика, что говорит о менее интенсивном снижении прочности при насыщении образца влагой.

Параллельно проводились исследования по определению усадки при полном высыхании образцов. Установлено, что усадка заводского образца составляет от 0,4 до 0,5 мм/м, а армированным микроцеллюлозой образцы имеют усадку менее 0,4 мм/м.

## 5.2. Теплотехнические характеристики газосиликата

Теплотехнические характеристики газобетона также сильно зависят от его влажности. Повышение влажности любого строительного материала приводит к росту его теплопроводности. Аналитическую зависимость между влажностью и коэффициентом теплопроводности можно выразить следующей формулой:

$$\lambda = 0,062 + 0,21\gamma(\gamma + 10\omega) \quad (5.1)$$

где:  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  – плотность в сухом состоянии в т/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – содержание влаги в т/м<sup>3</sup>.

Однако, в отличие от теоретического значения изменения теплопроводности газобетона, реальная зависимость имеет более сложный характер, так как на реальные теплотехнические характеристики влияет размер и форма пор, вариативность их распределения, градиент температуры. На рис. 5.2 представлены данные по результатам исследования параметров теплопроводности равных по плотности и прочностным лабораторных образцов газобетона, произведенного на ООО «Газобетон» Иваново и полученных из предложенных оптимальных составов.

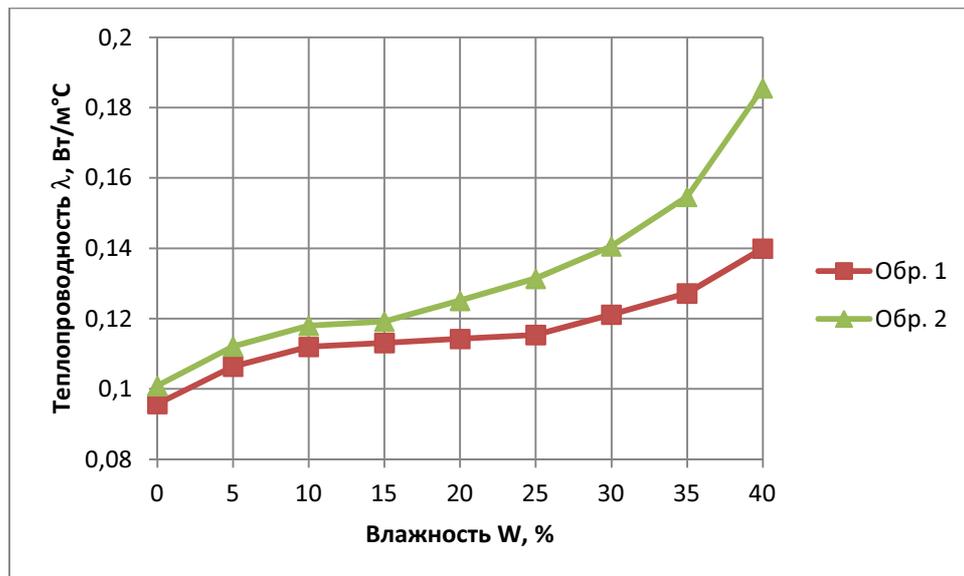


Рис. 5.2. Зависимость теплопроводности газобетона от его влажности

Обр.1 – образец производства ООО «Газобетон» г. Иваново,

Обр. 2 – образец оптимального состава

Из анализа графика следует, что изменение теплопроводности от влажности носит нелинейный характер и значительно теплопроводность нарастает при увеличении влажности более 30%. Это явление предположительно обусловлено аддитивным увеличением объема заполненных водой пор, когда увлажняются не только открытые поры поверхности и капилляры, но через осмотический подсос заполняется поровое пространство в глубине образца.

Кроме того, график показывает, что теплопроводность образцов из оптимизированного газобетона несколько выше контрольного, а скорость нарастания теплопроводности превышает контрольный образец. По всей видимости это обусловлено фактором изменения минералогического состава новообразований, которые дают более теплопроводную межпоровую перегородку, а также наличием микроармирования из относительно более высокогигроскопичной микроцеллюлозы, которая выступает средой массопереноса влаги по телу газобетона.

При этом паропроницаемость образцов остается практически равным и слабо изменяется в пределах от 0,2 до 0,16 мг/(м<sup>2</sup>·ч·Па).

### 5.3. Эксплуатационные характеристики газосиликата

Особое место при эксплуатации изделий из газобетона в конструкциях имеет морозостойкость. Учитывая, что основное направление использования газобетона – это возведение ограждающих конструкций в каркасно-монолитных зданиях и при малоэтажном строительстве, вопросы сохранения физико-механических характеристик при попеременном замораживании и оттаивании встает на первое место.

Особое свойство газобетона – множество замкнутых пор, заполняющихся водой только при особых условиях. Вследствие этого даже после продолжительного замачивания газобетона в воде центральная часть тестовых образцов остается сравнительно сухой. Система не сообщающихся, не заполняемых водой ячеек, формирует буферные полости, куда перемещается излишек замораживаемой воды. Таким образом, газобетон благодаря своему строению создает условия для высокой морозостойкости.

Влажность газобетона непосредственно после изготовления составляет приблизительно 0,3-0,6 влажности стандартных испытаний. В стандартных эксплуатационных условиях насыщенность влагой изделий из газобетона всегда ниже его влажности сразу же после автоклавирования. Исходя из этого, образцы газобетона при лабораторных испытаниях на попеременное оттаивание и замораживание обладают такой влажностью, которую не должна иметь строительная конструкция из газобетона в реальных условиях.

Важным фактором, обуславливающим стойкость газобетона при попеременном замораживании и оттаивании, считаются характеристики структуры пористости. Поры по влиянию на морозостойкость делятся на 3 вида: резервные (более 200 мкм); опасные (от 200 до 0,1 мкм); безопасные (менее 0,1 мкм). Экспериментально установлено, что в случае если отношение объема пор с диаметром больше 200 мкм к объему пор с диаметром от 200 до 0,1 мкм будет больше 0,09, то газосиликатный блок будет иметь высокую морозостойкость.

Таблица 5.1 – Распределение пор в образцах газобетона

mkm	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	n10
150.34	5	16	1	11	1	11	2	2	2	2
173.55	9	52	3	26	7	22	7	6	5	4
196.77	34	143	15	61	33	63	18	40	16	22
219.99	116	373	39	186	83	219	48	132	71	72
243.20	270	828	136	512	291	502	169	417	195	244
266.42	651	1389	345	1006	651	958	433	875	474	691
289.64	1304	1914	813	1558	1264	1423	1018	1528	960	1356
312.85	1875	2186	1347	1990	1846	1730	1673	1888	1673	1988
336.07	2291	2096	1816	2164	2179	1837	2180	2092	2271	2313
359.29	2141	1839	1974	1937	2136	1639	2253	1885	2360	2219
382.51	1998	1657	1865	1766	1931	1444	2086	1677	2312	1871
405.72	1828	1518	1708	1586	1649	1374	1770	1433	1945	1655
428.94	1615	1431	1484	1428	1575	1296	1607	1457	1807	1628
452.16	1570	1393	1463	1512	1534	1276	1554	1359	1601	1581
475.37	1521	1438	1401	1425	1479	1250	1406	1310	1562	1499
498.59	1482	1328	1325	1362	1449	1186	1455	1333	1507	1425
521.81	1352	1254	1278	1273	1398	1135	1338	1180	1447	1443
545.02	1417	1236	1208	1265	1431	1111	1253	1128	1428	1421
568.24	1392	1166	1096	1265	1391	1141	1320	1218	1394	1250
591.46	1271	1188	1198	1219	1298	1061	1313	1164	1323	1232
614.67	1261	1067	1133	1120	1239	1008	1208	1117	1302	1127
637.89	1151	1002	1069	1053	1139	855	1274	975	1242	974
661.11	1037	813	979	904	956	815	1118	891	1148	877
684.32	912	726	794	845	830	680	903	810	1080	778
707.54	838	703	695	802	827	641	856	719	892	690
730.76	713	631	640	685	739	584	764	617	798	657
753.98	675	618	597	604	677	576	685	562	753	587
777.19	630	523	585	596	618	487	578	537	680	524
800.41	570	488	532	566	575	460	629	499	626	514
823.63	564	490	504	482	504	418	550	487	578	480
846.84	483	437	449	453	489	400	541	435	544	392
870.06	438	439	421	464	438	376	444	437	492	378
893.28	403	344	393	390	372	288	432	346	431	305
916.49	378	369	349	368	327	334	400	304	431	275
939.71	337	296	320	277	292	254	372	297	357	237
962.93	309	274	268	258	278	217	310	241	305	219
986.14	250	200	239	235	233	192	275	192	265	216
1009.36	242	189	175	242	217	175	232	189	243	177
1032.58	191	205	168	181	212	183	209	161	231	149
1055.80	187	169	172	185	161	153	189	160	200	159
1079.01	170	153	151	158	149	140	131	119	188	153
1102.23	159	126	134	153	163	116	172	145	151	109
1125.45	157	128	152	150	153	130	151	143	158	111
1148.66	135	116	112	120	130	124	127	105	139	95
1171.88	115	112	109	104	109	135	112	115	119	65
1195.10	96	80	91	103	121	68	118	93	113	83
1218.31	106	83	62	74	83	82	108	79	100	55
1241.53	83	79	79	73	81	61	78	77	88	58
1264.75	62	73	73	62	61	58	71	58	75	49
1287.96	74	72	65	53	69	38	57	53	59	43
<b>Соотношение пор</b>	<b>223</b>	<b>59</b>	<b>551</b>	<b>123</b>	<b>288</b>	<b>96</b>	<b>478</b>	<b>182</b>	<b>404</b>	<b>343</b>

Проведенный порометрический анализ образцов по результатам активного эксперимента, табл. 5.1, показывает, что реальное соотношение

объема пор с диаметром больше 200 мкм к объему пор с диаметром от 200 до 0,1 мкм на порядки больше.

Анализируя вышеизложенное, приходим к выводу о том, что в сравнении с традиционными материалами газобетон обладает повышенной морозостойкостью, причем высокий уровень морозостойкости ячеистых бетонов обеспечивается при неблагоприятном с точки зрения обеспечения морозоустойчивости фазовом состоянии новообразований стенового блока. При сокращении влажности газосиликатных блоков морозостойкость значительно возрастает.

Проведенные испытания показывают обеспеченность морозостойкости разработанных образцов газобетона не менее 100 циклов замораживания-оттаивания.

Важной эксплуатационной характеристикой является влажность газобетона при работе в конструкции. Через два–три отопительных сезона газосиликат наружных стен приобретет установившуюся, или равновесную эксплуатационную влажность.

Скорость изменения влажности материалов в стенах зависит в первую очередь от соотношения их паропроницаемости и сорбционной влажности при равных режимах эксплуатации помещений и климатических условиях. Чем выше паропроницаемость и ниже сорбционная влажность, тем активнее происходит высушивание, так как коэффициент паропроницаемости газобетона имеет высокие значения (0,16-0,2 мг/м<sup>2</sup>\*ч\*Па), а сорбционной влажности низкие (от 3% до 5%). Газобетонные блоки в равных условиях высыхают до равновесной влажности быстрее, чем древесина.

Медленное высыхание будет в том случае, если конструкцию из газобетона с наружной стороны облицевать материалом с низкой паропроницаемостью, – например, утеплить пенополистирольными плитами или облицевать кирпичом без оставления воздушного зазора, рис. 5.3.

В случае же паропроницаемой отделки (кирпич с вентилируемой воздушной прослойкой, тонкослойная штукатурка, окраска или

гидрофобизация поверхности) высыхание будет происходить с высокой скоростью, и конструкция выйдет на расчетный режим эксплуатации к началу второго отопительного сезона, рис. 5.3.

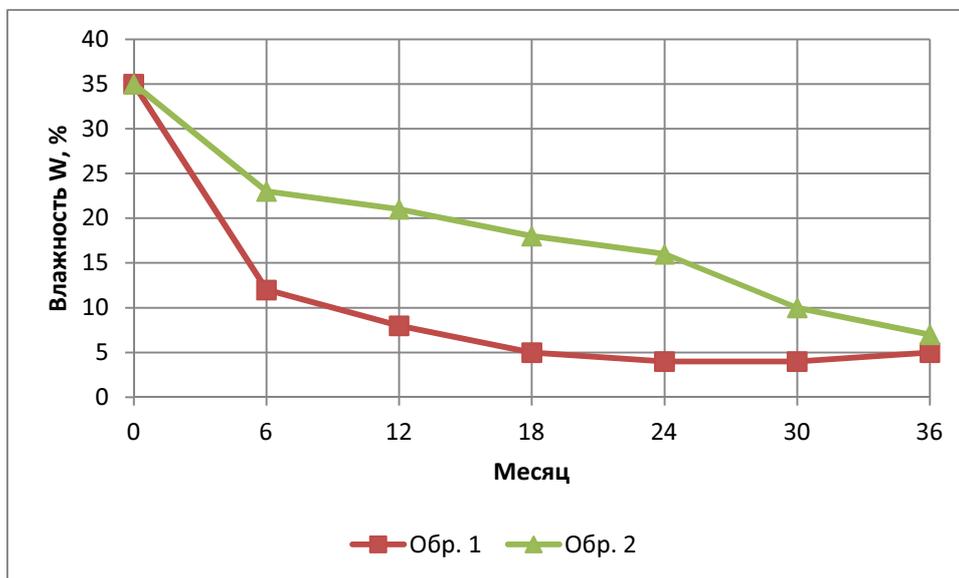


Рис. 5.3. Изменение влажности газобетона в ходе эксплуатации  
Обр. 1 – паропроницаемая отделка, Обр. 2 – паронепроницаемая отделка

Таким образом, характеристики влажности конструкций из газобетона, а стало быть и теплопроводности и прочности, зависят не только от первоначальных характеристик газосиликата, но и от условий эксплуатации и вида отделки. В любом случае к концу третьего сезона эксплуатации, влажность конструкции приобретает равновесный характер, а его теплофизические и механические характеристики стабилизируются.

## ВЫВОДЫ

1. Для разработки ячеистого дисперсно-армированного газобетона автоклавного твердения был произведен анализ требований предъявляемых к ограждающим конструкциям из легких теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных материалов, изучены данные по применению в их качестве ячеистых бетонов различной природы, определены материалы и методы для их изготовления. Установлено, что при высоких теплотехнических характеристиках газобетон обладает относительно невысокими прочностными показателями, которые приводят к снижению его эксплуатационных характеристик и повышению доли брака при производстве.

2. Установлено, что наиболее значимыми факторами, при воздействии на которые можно эффективно управлять прочностью и плотностью газобетона являются удельная поверхность и расход известково-кремнеземистого вяжущего, а также водотвердое отношение при постоянной подвижности смеси, оптимальное значение которого составляет 0,48-0,50. Увеличение расхода вяжущего и его удельной поверхности прямо пропорционально ведет к увеличению прочности и плотности газобетона.

3. Выявлено, что повысить прочностные характеристики газобетона автоклавного твердения можно путем увеличения прочности межпоровой перегородки направленным синтезом низкоосновных гидросиликатов кальция высокой прочности, повышением общей связанности композита методом микроармирования бетона низко модульной фиброй, а также оптимизацией поровой структуры за счет рационального выбора газообразователя и подвижности бетонной смеси.

4. Исследованы методы модификации известково-кремнеземистого вяжущего с целью направленного синтеза высокопрочных новообразований. Установлено, что наиболее эффективным является введение в состав

вяжущего от 1 до 5% по массе микрокремнезема с удельной поверхностью не менее 20 м<sup>2</sup>/г, что приводит к повышению прочности газобетона 75-90%, однако также приводит к росту плотности материала на 25-40%.

5. Доказана эффективность применение армирующих волокон для повышения прочности бетонной матрицы. Установлено, что наиболее перспективно применение низкомолекулярной микроцеллюлозы с длиной волокна от 20 мкм до 2500 мкм и диаметром волокна примерно 25 мкм, устойчивой щелочной среде и температуре до 220°С и обеспечивающую, в отличие от высокомолекулярных, более равномерное распределение волокон по объему композита. Показана эффективность применения микроцеллюлозы в количестве до 2,4% от массы твердых компонентов смеси, приводящая к увеличению прочности ячеистого газобетона 40-60%.

6. Путем реализации активного факторного эксперимента определены оптимальные значения расходов микроармирующей фибры и кремнеземистого модификатора, установлены закономерности их влияния на физико-механические характеристики газобетона. Определен, что для марок газобетона D400-D600 расход микрокремнезема составляет 1%, а микроцеллюлозы 2%, что обеспечивает повышение класса композита с В0.5 до В2,5 - В3.5.

7. Установлена зависимость теплотехнических характеристик газобетона от количества и размера пор. Исследовано влияние газообразователя на поровую структуру газобетона. Фазоконтрастным методом проведена порометрия образцов газобетона полученного с использованием различного газообразователя. Показано, что для более мелких порообразователей характерно близкое количество равномерно распределенных более мелких пор и незначительное содержание крупных пор, а для более грубомолотого крупного порообразователя присутствует большее количество крупных пор размером до 1,5 мм.

8. Рентгенофазовые исследования показали, что значительный рост прочности газобетона, содержащего 1% микрокремнезема, связан с синтезом

устойчивого низкоосновного ксонотлита, относящегося к группе волластонитов, но отличающегося большей твердостью – 6,5 по шкале Мооса. По структуре он волокнист, в агрегатах очень вязок. Основной минерал контрольных составов – гиролит имеет более низкую твердость – 3,5 и имеет пластинчатое строение, чьи чешуйки слабо агрегируются в конгломераты. Состав с избыточным содержанием аморфного кремнеземистого модификатора (более 1%), представлен тоберморитовой группой гидросиликатов кальция, имеет меньшую прочность в связи с относительно низкой твердостью минералов 3,5-4,5 и пластинчатой слабосвязанной структурой новообразований.

9. Исследованы физико-механические и теплотехнические свойства разработанных составов модифицированного микроармированного газобетона. Выявлена зависимость характеристик от влажности материала. Установлено, что оптимизированный состав газобетона обеспечивает сохранение прочностных показателей на 25-30% выше контрольных. Обнаружено превышение теплопроводности разработанного газобетона относительно контрольного на 5-10% и более значимое нарастание теплопроводности при влажности более 30%, связанное с изменением минералогического состава межпоровой перегородки, а также с наличием микроармирования из более высокогигроскопичной микроцеллюлозы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишнеvский, А.А. Итоги работы предприятий по производству автоклавного ячеистого бетона в 2013 г. / А. А. Вишнеvский, Г. И. Гринфельд, А.С.Смирнова // Технологии бетонов. - 2014. - № 4. - С. 44-47.
2. Вишнеvский, А.А. Анализ рынка автоклавного газобетона России / А.А.Вишнеvский, Г.И. Гринфельд, Н.О. Куликова // Строительные материалы. - 2013. - № 7. - С. 40-44.
3. Коровкевич, В.В.. Малоэтажные дома из ячеистых бетонов. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации / В. В. Коровкевич, В. А. Пинскер - Ленинград, ЛенЗНИИЭП, 1989. - 284 с.
4. Граник, Ю.Г. Ячеистый бетон в жилищно-гражданском строительстве / Ю.Г. Граник // Строительные материалы. - 2003. - № 3. - С. 2-6.
5. Сокольский, В.А. Принципы экономичности и их выражение в современном строительстве. СПб., 1910. 538 с.; Иллюстрированное урочное положение: пособие при составлении и проверке смет, проектировании и исполнении работ. 6 испр. издание. Под ред. Н.И. де Рошефора. Петроград: Типография Петроградской Одиночной тюрьмы, 1916. 694 с.
6. Гринфельд, Г.И. Диалектика нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2012. №1. С. 22-24.
7. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (Директива 2010/31/ЕС Европейского парламента и Совета от 19 мая 2010 по энергетической эффективности зданий)
8. Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные

законодательные акты Российской Федерации» ; Постановление Правительства г. Москвы № 900-ПП О повышении энергетической эффективности жилых, социальных и общественно-деловых зданий в городе Москве и внесении изменений в постановление Правительства Москвы от 9 июня 2009 г. № 536-ПП

9. Заренков В.А. Особенности объемно-пространственной организации многоэтажных жилых зданий последнего десятилетия XX века (на примере проектирования и строительства в СПб.) // Мобильные и быстровозводимые здания, сооружения и комплексы: Тез. докл. 1999. — СПб., Стройиздат. — С. 105-112
10. Гагарин, В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 1 // АВОК. 2004. №2. С. 20-26; Немова Д.В. Навесные вентилируемые фасады: обзор основных проблем // Инженерно-строительный журнал. 2010. №5(15). С. 7-11;
11. Протасевич, А.М., Крутилин А.Б. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 57-62;
12. Солощенко, С.С. Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 10-15;
13. Гагарин, В.Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем. Температурно-влажностные воздействия и долговечность систем с тонким штукатурным слоем (По материалам статьи Н. М. KQnzел, Н. KQnzел, К. Sedelbauer «Hidrotermische Beanspruchung und Lebensdauer von Warmedamm-Verbundsystemen», Bauphysik, 2006, Bd. 28, Н. 3) // АВОК. 2007. №6. С. 82-90;
14. Кузьменко, Д. В., Ватин Н. И. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» - термопанель // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13-21;

15. Сомов, Н.В. Проблемы развития российской силикатной промышленности // Строительные материалы. 2013. №3. С. 76-78
16. Жиронкин, П.В., Геращенко, В.Н., Гринфельд, Г.И. История и перспективы промышленности керамических строительных материалов в России // Строительные материалы. 2012. №5. С. 13-18.
17. Левченко В.Н., Гринфельд Г.И. Производство автоклавного газобетона в России: перспективы развития подотрасли // Строительные материалы. 2011. № 9. С. 44-47.
18. Коровкевич, В.В., Пинскер, В.А и др. Малоэтажные дома из ячеистых бетонов. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации. Ленинград: ЛенЗНИИЭП., 1989. 284 с.
19. Семченков, А.С., Семечкин, А.Е., Литвиненко, Д.В., Антонов, И.М. Проектирование ЛЭЭНДТ стеновых ограждений для условий России // Строительные материалы. 2004. №1. С. 62-66;
20. Семченков, А.С., Ухова, Т.А., Сахаров, Г.П. О корректировке равновесной влажности и теплопроводности ячеистого бетона // Строительные материалы. 2006. №6. С. 3-7.;
21. Гринфельд, Г.И. Производство автоклавного газобетона в России: состояние рынка и перспективы развития // Строительные материалы. 2013. №2. С. 76-78.
22. Сахаров, Г.П. Ячеистые бетоны в посткризисный период // Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2011. №1. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://www.nso-journal.ru/images/stories/NS0/2011/01\\_8.pdf](http://www.nso-journal.ru/images/stories/NS0/2011/01_8.pdf) (Дата обращения: 04.05.2013)
23. Ухова, Т.А., Паплавский, Я.М., Гринфельд, Г.И., Вишневский, А.А. Разработка межгосударственных стандартов взамен ГОСТ 21520-89 и ГОСТ 25485-89 в части ячеистых бетонов автоклавного твердения // Строительные материалы. 2007. № 4. С. 26-30

24. Граник, Ю.Г. Ячеистый бетон в жилищно-гражданском строительстве // Строительные материалы. 2003. № 3. С. 2-6;
25. ГОСТ 31359-2007 Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия
26. Литвиненко Д.В. Наружные несущие стены из ячеистого бетона плотностью D400-D600 в виде блоков для многоэтажных монолитных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М. 2005. 178 с;
27. Горшков А.С., Гладких А.А. Влияние растворных швов кладки на параметры теплотехнической однородности стен из газобетона // Инженерно-строительный журнал. 2010. №3. С. 39-42;
28. Руководство по теплотехническому расчету наружных стеновых конструкций жилых и общественных зданий с применением изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения в Российской Федерации. Ватин Н.И. и др. СПб: ГОУ «СПб ГПУ», 2011. 40 с.
29. Коровкевич, В.В. Применение ячеистого бетона в жилищном строительстве // Жилые дома из ячеистого бетона: Сб. науч. тр. Л. 1963. С. 57-62.;
30. Пинскер, В.А., Вылегжанин, В.П. Газобетон в жилищном строительстве с максимальным его использованием // Ячеистые бетоны в современном строительстве. Сборник докладов. Выпуск 5. СПб: НП «Межрегиональная северозападная строительная палата», Центр ячеистых бетонов. 2008. С. 10-32.;
31. Миронов, С.А., Кривицкий, М.Я., Малинина, Л.А., Малинский, Е.Н., Счастный А.Н. Бетоны автоклавного твердения. М.: Изд-во литер, по строительству, 1968. 279 с.
32. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П., Гринфельд Г.И. Прочность и деформативность стен из газобетона низкой плотности // Ячеистые бетоны в современном строительстве. Сборник докладов. Выпуск 5 СПб: НП «Межрегиональная северозападная строительная палата», Центр ячеистых бетонов. 2008. С. 6-9

33. Проекты домов из газобетона: каталог проектов plans.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://plans.ru/list.php?new&mat=3> (Дата обращения: 04.05.2013)
34. Боженов, П. И., Технология автоклавных материалов: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Производство строительных изделий и конструкций». Л.: Строй-издат, Ленингр. отделение, 1978,— 368 с.;
35. Баутина, Е.В. Оценка состояния ячеистого силикатного бетона в ограждающих конструкциях жилых зданий с длительным сроком эксплуатации // Дисс. на соиск учен. степ. к.т.н, Воронеж, 2006. 222 с.;
36. Гойкалов, А.Н. Прочность и деформативность сжатых элементов кладки из мелких ячеистобетонных блоков с косвенным армированием. Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Воронеж, 2005. 161 с.;
37. Кузнецов, Д.В. Методы защиты наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков // Дисс. на соиск учен. степ. к.т.н. Уфа. 2006. 153 с.].
38. Миронов, С.А. Применение газобетона в Швеции // Строительные материалы. 1964. № 2. С. 38-39; Автоклавный ячеистый бетон: Пер. с англ./ Ред.совет: Г.Бове (пред.) и др. М.: Стройиздат, 1981. 88 с
39. Автоклавный ячеистый бетон: Пер. с англ./ Ред.совет: Г.Бове (пред.) и др. М.: Стройиздат, 1981. 88 с.
40. Кудряшев, И.Т., Куприянов, В.П. Ячеистые бетоны. М.: Госстройиздат, 1959. 182 с.;
41. Силаенков, Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.;
42. Коровкевич, В.В., Гурьев, О.И. Применение ячеистого бетона в жилищном строительстве // Жилые дома из ячеистого бетона: Гос. изво литер. по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1963. С. 33-45.
43. Гензлер, М.Н., Линдеберг, С.А. Пенобетонщик. М., 1936. 157 с.

44. Кудряшев И.Т., Куприянов В.П. Ячеистые бетоны. М.: Госстройиздат, 1959. 182 с.; Кауфман Б.Н. Производство и применение пенобетона в строительстве. М.: «СтройЦНИЛ», 1940. 130 с.
45. Сажнев, Н.П. Производство ячеистых бетонов в Беларуси на современном этапе // Белорусский строительный рынок. 2011. №5. С. 8-16.;
46. Чернышов, Е.М. Управление процессами структурообразования и качеством силикатных автоклавных материалов (вопросы методологии, структурное материаловедение, инженерно-технологические задачи): Автореф. Дисс. докт. техн. наук.: Л., 1988. 45 с.;
47. Федин, А.А. Исследования Воронежского инженерно-строительного института в области технологии ячеистых бетонов // Производство и применение в строительстве ячеистых материалов на минеральных вяжущих. 1964. С. 27-49.;
48. Федин, А.А., Чернышов, Е.М. Совершенствование технологии и устранение брака в производстве газосиликатных изделий // Строительные материалы. 1962. № 4. С. 25-28.;
49. Муст, Х., Крейс, У. Воздействие  $\text{CO}_2$  на газосиликат с объемной массой 500-600 кг/м<sup>3</sup>, изготовленный на смешанном вяжущем // Сб. науч. тр. НИПСиликатобетон. 1971. № 6. С. 220-235.;
50. Левин, Н.И. Механические свойства блоков из ячеистых бетонов. М.: Госстройиздат, 1961. 118 с.
51. Пинскер, В.А., Писарев, В.С. Опытная проверка пластичности автоклавного ячеистого бетона при кратковременном нагружении. - В кн.: «Применение ячеистых бетонов в жилищно-гражданском строительстве». Л.: ЛенЗНИИЭП, 1991. с. 31-44.;
52. Герловин, И.Л., Пинскер, В.А. Теоретические основы физики прочности ячеистых бетонов. - В кн.: «Применение ячеистых бетонов в жилищно-гражданском строительстве». Л.: ЛенЗНИИЭП, 1991. с. 23-30.

- 53.– Брилинг, Р.Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Стройиздат, 1948. 90 с.;
54. Ушков, Ф.В. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен // Строительная промышленность. 1951. №8. С. 16-19.;
55. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 289 с.;
56. Кузнецов, Г.Ф. Тепловая изоляция. М.: Стройиздат, 1985. 430 с.;
57. Васильев, Б.Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. 215 с.;
58. Франчук, А.У. Теплопроводность строительных материалов в зависимости от влажности. Стройиздат Наркомстроя СССР, 1941. 146 с.
59. Сомов, Н.В. Проблемы развития российской силикатной промышленности // Строительные материалы. 2013. №3. С. 76-78.
60. Силаенков, Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.;
61. Пинскер В.А., Писарев В.С. Опытная проверка пластичности автоклавного ячеистого бетона при кратковременном нагружении. - В кн.: «Применение ячеистых бетонов в жилищно-гражданском строительстве». Л.: ЛенЗНИИЭП, 1991. с. 31-44.;
62. Гаевой, А.Ф., Качура, Б.А. Качество и долговечность ограждающих конструкций из ячеистого бетона. Харьков :Вища школа, 1978. 224 с.
63. Галкин, С.Л. и др. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика. Минск: Стринко, 2006. 448 с.
64. Макаричев, В.В., Левин, Н.И. Расчет конструкций из ячеистых бетонов. М.: Госстройиздат, 1961. 154 с.
65. Левин, Н.И. Механические свойства блоков из ячеистых бетонов. М.: Госстройиздат, 1961. 118 с.

- 66.Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций..  
Москва, Ленинград.: Главная редакция строительной литературы, 1937,  
564 с.
- 67.Гайовник, Р., Сечковски, Я. Сопротивление сжатию стены из автоклавного газобетона согласно ЕС6 в избранных странах // Справочник для проектирующих и строящих из газобетона. Варшава. 2011. №1.
- 68.EN 772-1:2000 Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength (Методы испытаний изделий для каменной кладки. Часть 1. Определение прочности при сжатии.
- 69.EN 771-4: 2003 Specification for masonry units. Part 4: Autoclaved aerated concrete masonry units. (Требования к изделиям для каменной кладки. Часть 4. Изделия для каменной кладки из автоклавного ячеистого бетона).
- 70.Галкин, С.Л. и др. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика. Минск: Стринко, 2006. 448 с.
- 71.Jager, W., Schops, P. Confined masonry - a chance to improve the load bearing capacity // 5th International conference on Autoclaved Aerated Concrete «Securing a sustainable future»: Bydgoszcz, Poland, September, 14-17, 2011. Pp. 225-237
- 72.Kreft, O., Straube, B., Schoch, T. Internal thermal insulation with light weight autoclaved aerated concrete // 5th International conference on Autoclaved Aerated Concrete «Securing a sustainable future»: Bydgoszcz, Poland, September, 14-17, 2011. Pp. 251-257;
- 73.Scheffler, G.A. Introduction of a full range model for liquid and vapour transport properties of AAC // 5th International conference on Autoclaved Aerated Concrete «Securing a sustainable future»: Bydgoszcz, Poland, September, 14-17, 2011. Pp. 311-323.
- 74.Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (Директива 2010/31/ЕС

Европейского парламента и Совета от 19 мая 2010 по энергетической эффективности зданий)

75. Смирнов, В.А., Грановский, А.В., Джамуев, Б.К. Научно-технический отчет по теме: «Проведение исследований конструкций из ячеистобетонных блоков Ytong производства ЗАО «Кселла-Аэроблок-Центр» на клею марки Ytong для сейсмостойких стен зданий». М.: 2009. 90 с.
76. Грановский, А.В., Джамуев Б.К. Испытания стеновых конструкций из ячеистобетонных блоков на сейсмические воздействия // Современное производство автоклавного газобетона: сборник докладов научн.-практ. конференции. СПб, 16-18 ноября 2011 г. С. 104-108.
77. Рудченко, Д.Г. Совершенствование технологии производства автоклавного газобетона с повышенным коэффициентом конструктивного качества // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 7-й Международной научно-практической конференции. Брест, Малорита, 22-24 мая 2012 г. С. 49-54
78. Славчева, Г.С. Структура высокотехнологичных бетонов и закономерности проявления их свойств при эксплуатационных влажностных воздействиях // Автореф. дисс. докт. техн. наук. Воронеж. 2009. 43 с
79. Киселев Д.А. Прочность и деформативность анкерного крепежа при действии статической и динамической нагрузок. дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н.. м. 2010. 158 с
80. Гринфельд, Г.И. Практика применения автоклавного ячеистого бетона в наружных ограждениях каркасных зданий Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2008. №6. С. 28-31
81. Гринфельд, Г.И. Значимость автоклавного газобетона для рынка стеновых материалов Санкт-Петербурга и области. Роль завода «Аэрок СПб» в удовлетворении и формировании спроса // IV научно-

- практическая конференция «Ячеистые бетоны в современном строительстве», сборник докладов. СПб. 2007. С. 17-19
82. Гроздов, В.Т. О недостатках существующих проектных решений навесных наружных стен в многоэтажных монолитных железобетонных зданиях. Дефекты зданий и сооружений. СПб.: ВИТУ, 2006. С. 15-21.; Ищук М.К. Причины дефектов наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки // Жилищное строительство. 2008. №3. С. 28-31.;
83. Лобов, О.И., Ананьев, А.И. Долговечность наружных стен современных многоэтажных зданий // Жилищное строительство. 2008. №8. С. 48-52.
84. Кузнецов, Д.В. Методы защиты наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков // Дисс. на соиск учен. степ. к.т.н. Уфа. 2006. 153 с.
85. Горшков, А.С., Попов, Д.Ю., Глумов, А.В. Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 5-9
86. Гринфельд, Г.И. Ограждающие конструкции с применением автоклавного газобетона в Санкт-Петербурге: проблемы, пути решения. ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2010. №1. С. 76-82.
87. Проекты домов из газобетона: каталог проектов plans.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://plans.ru/list.php?new&mat=3> (Дата обращения: 04.05.2013)
88. СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81.;
89. СТО 501-52-01 Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. Ч. I.
90. Гроздов, В.Т. О недостатках существующих проектных решений навесных наружных стен в многоэтажных монолитных

- железобетонных зданиях. Дефекты зданий и сооружений. СПб.: ВИТУ, 2006. С. 15-21;
- 91.Ищук, М.К. Причины дефектов наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки // Жилищное строительство. 2008. №3. С. 28-31;
- 92.Гроздов, В.Т. Как обеспечить качество фасадов в условиях Северо-Запада. // Вестник строительного комплекса. 2007. №3 (43);
- 93.Деркач, В.Н., Орлович, Р.Б. Вопросы качества и долговечности облицовки слоистых каменных стен // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 42-47
- 94.СТО НААГ 3.1-2013 Конструкции с применением автоклавного газобетона в строительстве зданий и сооружений.
- 95.Горшков А.С. Условия устойчивости поэтажно опертых стен, выполненных кладкой из ячеистобетонных блоков, при учете воздействия на них ветровых нагрузок // Современный автоклавный газобетон: сборник докладов науч.-практ. конференции. Краснодар, 15 - 17 мая 2013 г. С. 17-33
- 96.Гринфельд, Г.И., Сытова, Е.Н., Лисунов, П.Н, Хведченя О.В. Сравнительные испытания анкерных креплений в автоклавном газобетоне в зависимости от формы дюбеля и плотности, прочности и влажности основания // Современный автоклавный газобетон: сборник докладов науч.-практ. конференции. Краснодар, 15 - 17 мая 2013 г. С. 64-70.;
- 97.Грановский, А.В., Киселев, Д.А. К оценке надежности крепления к стенам из ячеистобетонных блоков // Крепеж, клеи, инструмент. 2007. №1. С. 57-59.
- 98.СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003;
- 99.СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий.
100. Паплавскис, Я.М. Требования к штукатурным составам для наружной отделки стен из ячеистобетонных блоков // VI научно-

- практическая конференция «Ячеистые бетоны в современном строительстве», сборник докладов. СПб. 2009. С. 30-35
101. Росс, Х., Шталь, Ф. Штукатурка. Практическое руководство: Материалы, техника производства работ, предотвращение дефектов / пер. с нем. Под общ. ред. П.В. Зозуля. СПб.: РИА «Квинтет», 2006. 274 с.
102. Гринфельд, Г.И. Инженерные решения обеспечения энергоэффективности зданий. Отделка кладки из автоклавного газобетона: учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 90 с.
103. Горшков, А.С., Попов, Д.Ю., Глумов, А.В. Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 5-9, Круглый стол «Ячеистобетонные и пустотные стеновые материалы в многоэтажном строительстве» // Технология строительства. №7 (62). 2008. С. 7-20
104. Орлович, Р.Б., Рубцов, Н.М., Зимин, С.С. О работе анкеров в многослойных ограждающих конструкциях с наружным кирпичным слоем // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1. С. 3-10
105. Круглый стол «Ячеистобетонные и пустотные стеновые материалы в многоэтажном строительстве» // Технология строительства. №7 (62). 2008. С. 7-20.
106. Грановский, А.В., Киселев Д.А. К оценке надежности крепления к стенам из ячеистобетонных блоков // Крепеж, клеи, инструмент. 2007. №1. С. 57-59.
107. Грановский, А.В., Киселев Д.А. О методике испытаний анкеров на вырыв из различных стеновых материалов и возможных областях их применения // Жилищное строительство. 2010. №2. С. 7-8.
108. Технический отчет по теме «Прочностные испытания различных типов анкерных креплений в газобетонные блоки «Ytong», изготовленные ЗАО «Кселла-Аэроблок-Центр», с учетом их влажности». М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2009, 82 с.

109. СТО 501-52-01 Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. Ч. II.
110. Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В., Грановский, Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1971. — 186 с.
111. Налимов, В.В. Теория эксперимента // Сб. Новые идеи в планировании эксперимента. М.: Наука, 1969. — с. 24-36
112. Налимов, В.В., Чернова, Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука, 1965. — 146 с.
113. Смирнов, Н.В., Дунин-Барковский, И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики (для технических приложений) — М.: Наука, 1969. — 240 с.
114. Финн, Д. Введение в теорию планирования экспериментов — М.: Наука, 1970. — 120 с.
115. Алоян, Р.М. и др. Исследования оптимальных методов модификации газобетона автоклавного твердения с целью повышения его прочности . // Научное обозрение – 2014. №11 – С. 33-37
116. Алоян, Р.М. и др. Исследование структуры ячеистых бетонов на основе статистического метода анализа неоднородности изображения // Научное обозрение – 2014. № 11- С. 37-41.
117. Рабинович, Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 174 с.
118. Пащенко, А.А., Сербин, В.П., Клименко, В.С., Паславская, А.П. Физико-химические основы композиции неорганическое вяжущее – стекловолокно. – Киев: Наука думка, 1979. – 223 с.
119. Шейкин, А.Е., Рабинович Ф.Н. Прочность цементного камня на гшлиноземистом цементе и факторы ее определяющие // Доклады Академии наук СССР. – 1967. – Е. 177, №6 – с. 1407-1410.

120. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 174 с.
121. Козлов, В.В., Ахмеднабиев, Р.М. Исследование цементных композиций, наполненных полимерными волокнами // Строительство и архитектура: Изв. Вузов. – 1987, №2. – С. 51-55.
122. Григорьева, Л.С., Рабей, М.Б., Сулейман, О.В. и др. Цементно-волоконистые изделия с частичной заменой асбеста целлюлозным волокном // Строительство и архитектура: Изв. Вузов – 1992, №10. С. 25-26.
123. Воробьев, В.А. Эффективные теплоизоляционные материалы на основе целлюлозных волокон // Строительство и архитектура: Изв. Вузов – 1997, №5. – 165 с.
124. Материалы армированные волокнами / Пер. с англ. Л.И. Сычевой, А.В. Воловина. – М.: Стройиздат, 1982. – 180 с.
125. Малинина, Л.А., Королев, К.М., Рыбасов, В.П. Опыт изготовления изделий из фибробетона в СССР и за рубежом: Обзор ВНИИЭСМ. – М.: - 1981. – 35 с.
126. Собакина, С.А. Исследование некоторых технологических переделов для изготовления тонкостенных конструкций из стеклофибробетона. Сб.-Л.: ЛенЗНИИЭП, 1982.
127. Собакина, С.А., Тревашова, В.В. Влияние суперпластификатора С-3 на формирование плит из стеклофибробетона. / Сборник научных трудов / Л.: ЛенЗНИИЭП, 1984. – С 67-78.
128. Торопов, Н.А. и др. Диаграммы состояния силикатных систем./ Н. А. Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Лаин, Н. И. Курцева, А. И. Бойкова. Справочник, вып. 3. Тройные системы. Л., 1972
129. Тейлор, Х. Ф. У. Химия цементов. М., 1969,
130. Белов Н. В. Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. Л., 1967.

131. Бабушкин, В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. Термодинамика силикатов. М., 1965.
132. Бутт, Ю. М., Рашкович Л. Н. Твердение вяжущих при высоких температурах. М., 1961.
133. Шпикер Герхард. Свойства алюминиевых пигментов и их влияние на процесс производства ячеистого бетона // Научно-практическая конференция «Современное производство автоклавного газобетона»: сборник докладов / под редакцией научно-технического совета Национальной Ассоциации Производителей Автоклавного Газобетона. – СПб, 2011 – 173 с.
134. Яншин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение. 1994. – 112 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р  
АНО «ИВАНОВОСТРОЙИСПЫТАНИЯ»  
ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ «ИВАНОВОСТРОЙИСПЫТАНИЯ»  
РОСС RU.0001.21СМ44  
153029, г. Иваново, ул. Минская, 3 т/ф (4932) 37-95-46



Утверждаю  
Руководитель ИЛ «Ивановостройиспытания»  
С.Ю. Колесова  
2013 г.

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 521 - ИЛ

на 1 странице

от «1» ноября 2013 г.

Основание для проведения испытаний: договор № 105 от 15.08.2013 г.

{тип, марка, код ОКР, КД на продукцию}

Заявитель: ООО «Газобетон», 153029, г. Иваново, ул. Минская, д. 3

(наименование, адрес, ИНН)

Сведения о представленных образцах: песок для строительных работ (природный) – 1 проба - 1 кг (г.Тейково); ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ. ТУ»; представлен Заявителем  
(тип, марка, обозначение)

Цель испытаний: определение химического состава

Методики испытаний: ГОСТ 8735-88, ГОСТ 2642.3-97, ГОСТ 2642.4-97, ГОСТ 2642.5-97, ГОСТ 2642.7-97, ГОСТ 2642.8-97

(шифр НД или наименование методик)

Дата получения образцов: 24.10.2013 г.

(дата и номер Акта отбора образцов)

Дата испытания образцов: 28.10. - 01.11.2013 г.

Условия проведения испытаний: Т воздуха –  $(22 \pm 2)$  °С, относительная влажность –  $(65 \pm 5)$  %

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Таблица 1

Химический состав								
Содержание, %								
SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> несвяз.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Потери при прокаливании
90,96	76,10	1,33	0,30	0,56	1,60	2,00	0,15	3,10

### Примечания:

1. Данный протокол касается только образцов, подвергнутых испытаниям
2. Полное или частичное воспроизведение протокола допускается только с разрешения руководителя ИЛ

Инженер химик-аналитик  Е.Ф.Пырзу

**СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р**  
**АНО «ИВАНОВОСТРОЙИСПЫТАНИЯ»**  
**ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ «ИВАНОВОСТРОЙИСПЫТАНИЯ»**  
**РОСС RU.0001.21СМ44**

153029, г. Иваново, ул. Минская, 3

т/ф (4932) 37-95-46

Утверждаю  
 Руководитель ИЛ «Ивановостройиспытания»  
 \_\_\_\_\_ С.Ю.Колесова  
 «21» 10 2013 г.  
 МП

**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 495 - ИЛ**

на 1 странице

от «21» октября 2013 г.

**Основание для проведения испытаний:** договор № 105 от 15.08.2013 г.  
 (тип, марка, код ОКП, НД на продукцию)

**Заявитель:** ООО «Газобетон», 153029, г. Иваново, ул. Минская, д. 3  
 (наименование, адрес, ИНН)

**Сведения о представленных образцах:** песок для строительных работ (природный) – 2 пробы № 1 и № 2 по 1 кг; ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ. ТУ»; представлены Заявителем  
 (тип, марка, обозначение)

**Цель испытаний:** определение химического состава

**Методики испытаний:** ГОСТ 8735-88, ГОСТ 2642.3-97, ГОСТ 2642.4-97, ГОСТ 2642.5-97, ГОСТ 2642.7-97, ГОСТ 2642.8-97  
 (шифр НД или наименование методик)

**Дата получения образцов:** 08.10.2013 г.  
 (дата и номер Акта отбора образцов)

**Дата испытания образцов:** 14.10. - 18.10.2013 г.

**Условия проведения испытаний:** T воздуха – (22 ± 2) °С, относительная влажность – (65 ± 5) %

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

Таблица 1

Номер пробы	Химический состав								
	Содержание, %								
	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> несвяз.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Потери при прокаливании
№ 1	89,57	81,24	2,77	0,50	0,55	2,43	3,15	0,25	0,78
№ 2	77,52	68,24	5,61	0,50	1,25	5,11	4,33	0,29	5,39

**Примечания:**

1. Данный протокол касается только образцов, подвергнутых испытаниям
2. Полное или частичное воспроизведение протокола допускается только с разрешения руководителя ИЛ

Инженер химик-аналитик Пырзу Е.Ф.Пырзу



Документ о качестве

ПЦ 500-Д0-Н



Портландцемент без минеральных добавок марки 500  
на основе клинкера нормированного состава ПЦ 500-Д0-Н  
ГОСТ 10178-85, ГОСТ 30515-97

ОАО «Мордовцемент»  
Республика Мордовия  
п. Комсомольский

Партия № 2306

Отгружена 2/11-18 № вагона \_\_\_\_\_  
 Нормальная густота цементного теста, %..... 26,45  
 Удельная поверхность, м<sup>2</sup>/кг ..... 338  
 Содержание технологических добавок, %..... нет  
 Начало схватывания, (мин)..... 140  
 Массовая доля щелочных оксидов R<sub>2</sub>O, %..... 0,74  
 Содержание оксида магния MgO, %..... 1,34  
 Содержание оксида серы (IV) SO<sub>3</sub>, %..... 2,41  
 Содержание хлор - нона Cl<sup>-</sup>, %..... 0,203  
 Средняя активность при пропаривании ..... 39,7 МПа  
 Прочность на сжатие в возрасте 3/28 суток за предыдущий месяц ..... 33,2/53,8 МПа  
 Признаки ложного схватывания..... нет  
 Группа по эффективности пропаривания..... первая  
 Значение удельной эффективной активности естественных радионуклидов \_\_\_\_\_ 73±11 Бк/кг  
 Гарантийный срок..... 60 суток

Расчетный минералогический состав клинкера

C<sub>3</sub>S (трехкальциевый силикат)..... 60,83 %  
 C<sub>2</sub>S (двухкальциевый силикат)..... 16,25 %  
 C<sub>3</sub>A (трехкальциевый алюминат)..... 7,21 %  
 C<sub>4</sub>AF(четырекальциевый алюмоферрит)..... 15,71 %

Начальник ОТК \_\_\_\_\_



Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ  
«ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН»  
АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР**

Аттестат аккредитации испытательной лаборатории (центра) № РОСС RU.0001.510408.

Срок действия аттестата аккредитации с 22.07.2013г. по 22.07.2018г.

Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Шафиева д.7, тел 237-64-00, Факс 237-42-48

ОКПО: 75824463, ОГРН: 1050204212255, ИНН/КПП: 0276090570/027601001



**Экспертное заключение № 05-3977  
на продукцию**

от « 04 » октября 2013 г.

**1. Протокол рассмотрения**

1. Наименование продукции: Гипс сыромолотый.

2. Заявитель: ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат»,  
453300, Республика Башкортостан, г.Кумертау, ул.2-й пере-  
улок Советский, 2.

**3. Представленные документы**

- 1) ТУ 5743-001-88100376-2013 «Гипс сыромолотый. Технические условия».
- 2) Договор на поставку камня гипсового № 3/1 от 01.01.2009г. между ООО «Сандин» и ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат»
- 3) Акт отбора проб от 28.08.2013г. ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат».
- 4) Протокол № Р-701 от 26.09.2013 г. ИЛЦ ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Респу-  
блике Башкортостан».
- 5) Выписка из Единого государственного реестра юридических лиц.

4. Сопроводительное письмо (дата, №) 29.08.2013г. № 115

5. Материалы получены 23.09.2013г. № 4445

**6. При рассмотрении материалов установлено: (соответствие или несоответствие СанПиН или НД)** Гипс сыромолотый изготавливается предприятием ООО «Сандинский гипсоперерабаты-  
вающий комбинат» согласно требованиям ТУ 5743-001-88100376-2013 способом размола и сушки  
гипсового камня фракции от 0 до 10 мм. Камень гипсовый добывается предприятием ООО «Сан-  
дин» в процессе разработки Сандинского месторождения (Куяргазинский район), расположенным  
в 9,0 км юго-западнее с.Ермолаево Куяргазинского района Республики Башкортостан и поставля-  
ется предприятию ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат» согласно договору №  
3/1 от 01.01.2009г.

Гипс сыромолотый применяют для производства сухих строительных смесей, автоклавного  
и неавтоклавного газобетона и пенобетона.

Санитарно-эпидемиологическая экспертиза гипса сыромолотого проводилась на соответ-  
ствие Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежа-  
щим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) (Глава II Раздел 11. «Требования к  
продукции, изделиям, являющимся источником ионизирующего излучения, в том числе генери-

рующего, а также изделиям и товарам, содержащим радиоактивные вещества»), СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

По результатам проведенных исследований проб гипса сыромолотого гамма-спектрометрическим методом в соответствии с требованиями ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные», установлено, что анализируемые пробы относятся к материалам 1-го класса (эффективная удельная активность составляет  $22,1 \pm 8,0$  Бк/кг и не превышает 370 Бк/кг) и данный материал может быть использован согласно области применения для производства строительных материалов, применяемых во всех видах строительства.

Гипс, по характеру воздействия на организм человека, обладает слабым кумулятивным, сенсibilизирующим действием, вызывает раздражение слизистой оболочки глаз. Наиболее поражаемые органы и системы: дыхательная, центральная нервная система, желудочно-кишечный тракт, печень, почки. При длительном воздействии – катаральный бронхит, эмфизема, диффузно-склеротическая форма пневмокониоза. Гипс (кальций сульфат дигидрат), зарегистрирован в Российском регистре потенциально опасных химических и биологических веществ (РПОХВ) (свидетельство о государственной регистрации серия АТ № 000430 от 03.04.1995г.).

Нормирование в воздухе рабочей зоны, в атмосферном воздухе осуществляется в соответствии с ГН 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны», ГН 2.1.6.2309-07 «Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» по следующему веществу: Кальций сульфат дигидрат - 3 класс опасности, ПДК в.р.з. 2,0мг/м<sup>3</sup>, ОБУВ а.в. (по пыли неорганической гипсового вяжущего из фосфогипса с цементом) 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

В результате термодеструкции кальция сульфата дигидрата образуются оксиды серы, оксиды кальция, кальций. Кальций сульфат дигидрат не трансформируется в окружающей среде.

При производстве и применении гипса сыромолотого организация технологических процессов должна быть предусмотрена в соответствии с требованиями СП 2.2.2.1327-03 «Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственного оборудования и рабочему инструменту», СанПиН 2.2.3.1385-03 «Гигиенические требования к предприятиям производства строительных материалов и конструкций», СанПиН 2.2.3.1384-03 «Гигиенические требования к организации строительного производства и строительных работ».

Производственные помещения должны быть оборудованы общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией, места локального выделения вредных веществ - местной вытяжной вентиляцией. Технологическое оборудование (при производстве) должно быть герметизировано в целях исключения попадания пыли в рабочую зону. Работающие должны быть обеспечены спецодеждой согласно типовым отраслевым нормам, средствами индивидуальной защиты органов дыхания (респиратор «Лепесток», У-2К), глаз (защитные очки по ГОСТ Р 12.4.230.1), кожи рук (рукавицы, средства дерматологические защитные по ГОСТ 12.4.068). ..

Гипс сыромолотый отгружают упакованным в мешках по ГОСТ Р 53361 или в другой таре или без нее (по согласованию с заказчиком). При поставке без упаковки гипс сыромолотый отгружается в специализированном транспорте (специальных вагонах-цементовозах, автоцементовозах).

Гипс сыромолотый транспортируют всеми видами транспорта в крытых транспортных средствах в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на данном виде транспорта, предохраняя от попадания влаги и загрязнений. Гипс сыромолотый должен храниться в силосах или других крытых емкостях. В упаковке изготовителя гипс сыромолотый хранят в неотапливаемых закрытых складских помещениях, предохраняя от увлажнения и загрязнения посторонними примесями.

ООО "САНДИНСКИЙ ГИПСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ КОМБИНАТ"  
453300, Башкортостан, г.Кумертау  
2-ой пер.Советский, д. 2.

ПАСПОРТ № 552 ..

Гипс сыромолотый

Партия №	552
Дата выдачи документа	22.10.2013 г.
Масса партии, кг.	20124
Дата отправки	22.10.2013 г
Наименование и адрес получателя	ООО «Газобетон»
Номера вагонов (транспортных средств)	АС 1670 56
Содержание гидратной воды, %	..17,42
Содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , %	83,24
Влажность, %	0,36
Степень помола (остаток на сите 0,2 мм), %	5,84

Технолог



А.С.Попова



**SCHLENK**  **Inspection Certificate 3.1 according to EN 10 204**

Certificate-No.:95 D0600200

Page 1 of 1

Albo Schlenk s.r.o. • Továrni 532 • CZ-667 71 Bojkovice

GAZOBETON Ivanovo

**Product Name:**

Aluminium Paste DEG 4513

RUSSIA

**Our Delivery No.:****Batch No.:**

661

**Quantity:**

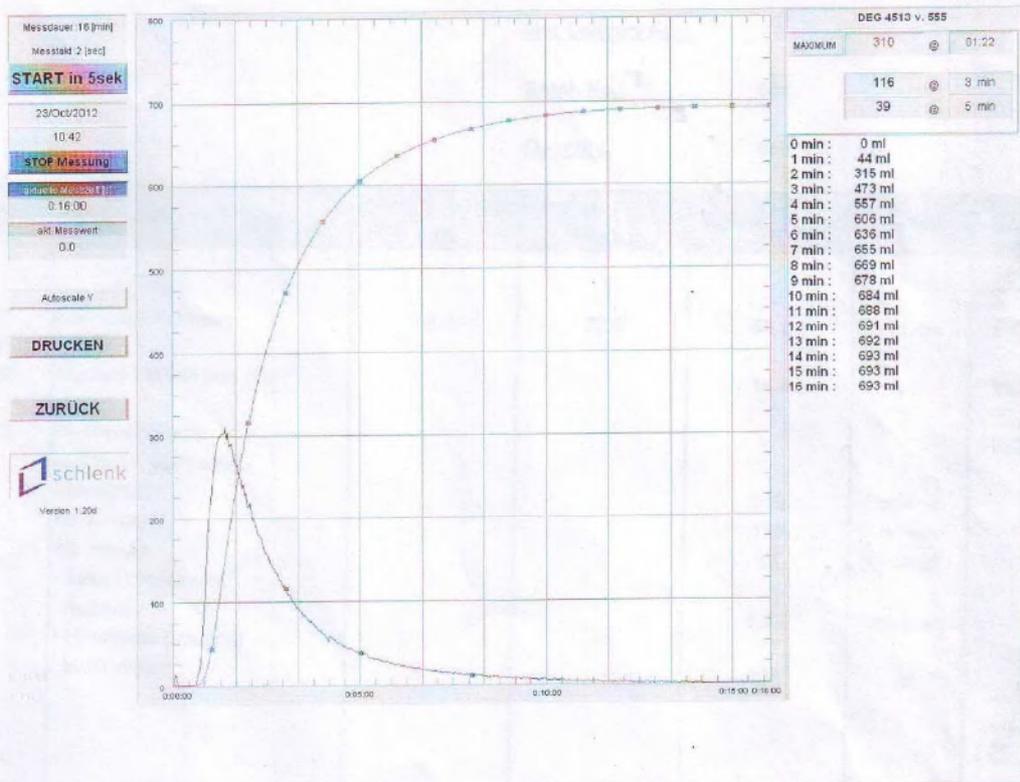
650 kg

No.	Test marking	Nominal value		Actual value	Unit	Method
		min.	max.			
01	Non volatile content:	68,0	72,0	69,2	wt.-%	PKK-015
02	Medium particle size ( $D_{50}$ ):			18,6	$\mu\text{m}$	PKK-044
03	H <sub>2</sub> -reactivity with gas mass flow meter:					PKK-039
	• Maximum:			319	ml/min	
	• 3. minute:			120	ml/min	
	• 5. minute:			38	ml/min	
	• Time of maximum reactivity:			1:22	min:sec	
	• H <sub>2</sub> -volume (Integral) to 16. min.:			703	ml	

Quality assurance: Salvat

machine printed form, valid without signature

25.3.2013



# Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach EN 10 204

Attest-Nr. F4580003

Seite 1 von 1



Schlenk Metall-Elemente GmbH | Demstoder Hauptstr. 5 | 46114 Essen

Kundenadresse

Produktbezeichnung:  
Aluminiumpulver 8013

Unsere Lieferung WA-Nr.:

Chargennummer:

Menge: kg

Nr.	Prüfmerkmal	Sollwert		Istwert	Einheit	Methode
		min.	max.			
01	<b>Benetzbarkeit:</b>		50	50	sec	AQSB-009
02	<b>Teilchengröße:</b>					AQSB-044
	D <sub>10</sub> :			9,9	µm	
	D <sub>50</sub> :	23,0	28,0	27,0	µm	
	D <sub>90</sub> :			57,7	µm	
03	<b>H<sub>2</sub>-Reaktivität mittels Gasmassenflußzähler (GFM)</b>					AQSB-039
	• <b>im Maximum:</b>	350		386	ml/min	
	• <b>in der 3. Minute:</b>	70	120	99	ml/min	
	• <b>in der 5. Minute:</b>		18	17	ml/min	
	• <b>Zeitpunkt des Reaktionsmaximums:</b>	1:00	1:30	1:06	min:sec	
	• <b>H<sub>2</sub>-Volumen (Integral) bis zur 16. Minute:</b>	730		739	ml	
04	<b>Blaine-Oberfläche:</b>	24.000		24.100	cm <sup>2</sup> /g	AQSB-010
05	<b>Metallgehalt:</b>	92,0		93,1	%	AQSB-012

Qualitätsicherung: Dr. Friesenhan

Maschinell erstellter Ausdruck, ohne Unterschrift gültig

27.09.2011


 Общество с ограниченной ответственностью  
 «Газобетон»  
 ул. Минская 3, 153029, г. Иваново, Россия  
 ИНН/КПП 3702587177/370201001  
 Рег. № ПФР 047-024-072499  
 ОКПО 60680751 ОКВЭД 26.6  
 ОКОПФ/ОКФС 65/16  
 р/счет 40702810600000001388  
 к/счет 30101810200000000738  
 в АКБ КРАНБАНК ЗАО г. Иваново  
 БИК 042406738  
 Тел/факс: 8(4932)37-95-29

**АКТ**  
**внедрения в производство ячеистого дисперсно-армированного бетона автоклавного твердения модифицированного активными минеральными добавками**

Настоящий акт составлен о том, что на предприятии ООО «Газобетон», г. Иваново была выпущена опытная партия ячеистого дисперсно-армированного бетона автоклавного твердения модифицированного активными минеральными добавками. Составы и технология разработаны соискателем ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» Акимовым А.В. на кафедре «ГИИСИ».

В результате внедрения получен теплоизоляционный материал со средней плотностью 400-600 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сжатии не менее 3,5-5,5 МПа и теплопроводностью 0,138 Вт/м<sup>0</sup>С. Предложенные Акимовым А.В. составы газобетона имеют преимущества по сравнению с выпускаемыми на заводе изделиями, заключающиеся в том, что при сохранении паритетных теплоизоляционных свойств, имеют большую на 30-50% прочность при сжатии для одинаковых марок бетона по средней плотности. Расчетный экономический эффект от полного внедрения составит до 300 рублей за 1 м<sup>3</sup>, за счет снижения брака при распиловки изделий и повышения его класса по прочности.

Инженер-технолог  Баранов А.А./

Инженер-лаборант  Кabanов Д.О./

