

На правах рукописи

Акимов Александр Владимирович

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

Специальность 05.23.05 - Строительные материалы и
изделия

АВТОРЕФЕРЕТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена на кафедре Строительного материаловедения, специальных технологий и технологических комплексов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: Чл.-корр. РААСН, доктор технических наук, профессор
Алоян Роберт Мишаевич

Официальные оппоненты: **Соков Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», профессор кафедры «Технология композиционных материалов и прикладная химия»

Христофорова Ирина Александровна, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», профессор кафедры «Химическая технология стекла и керамики»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль

Защита диссертации состоится «01» июля 2016 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, Иваново, ул. 8 Марта, 20, ИВГПУ, главный корпус, ауд. 204. тел. 8(4932)30-00-74; E-mail: prorekt-nr@igasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, Иваново, ул. 8 Марта, 20 (www.ivgpu.com).

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент

Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. 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 (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.

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. 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. Популярность газобетона и его широкое применение 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 газобетонов различными волокнами является наиболее перспективным и все более широко применяется во многих областях строительства.

Таким образом, для расширения номенклатуры эффективных стеновых материалов, разработка технологии автоклавного газобетона 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 газобетонов, высокая потребность рынка в более качественных ячеистых бетонах определяет актуальность, научную и практическую значимость выдвинутой проблемы.

Цель исследования – разработка составов и исследование физико-механических свойств автоклавного ячеистого бетона, модифицированного активными минеральными добавками и дисперсно-армированного микроволокном.

Для реализации поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- разработка составов 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 дисперсно-армированного газобетона.

Научная новизна работы.

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.

Практическая значимость и внедрение результатов 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.

Достоверность результатов исследования обеспечена:

- использованием при проведении экспериментальных исследований методик, регламентированных действующими стандартами, а также применением поверенного оборудования;

- большим объемом экспериментальных исследований, выполненных с применением современной электронно-вычислительной техники и программного обеспечения при статистической обработке результатов и опытно-производственными испытаниями.

На защиту выносятся:

- закономерности формирования основных физико-технических свойств газобетона под влиянием различных параметров технологии и состава;

- результаты экспериментальных исследований модифицирования газобетона активными минеральными добавками и микроармированием низкомодульной 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.

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.

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.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия» п. 2. Создание новых строительных материалов, обеспечивающих строительство быстровозводимых трансформируемых и долговечных зданий и сооружений; п. 7. Разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов исследований, даны цель и задачи основных направлений исследования, представлены данные о структуре работы. Показана целесообразность использования дисперсного микро-армирования газобетона и его модификация активными минеральными добавками с целью направленного повышения физико-механических, теплотехнических и эксплуатационных характеристик.

В первой главе диссертационной работы представлен критический анализ состояния зарубежной и отечественной теории и практики получения стеновых теплоизоляционных материалов, обладающих невысокой объемной массой. Установлено, что среди материалов стеновых материалов, особое место принадлежит группе ячеистых бетонов, среди которых наиболее востребованным на строительном рынке является газобетон автоклавного твердения, так как он обладает комплексом ценных физико-механических свойств: сравнительно высокой прочностью, при низкой средней плотности, низкой теплопроводностью и высокой морозостойкостью.

Проанализирован опыт исследования структуры и свойств газобетонов, полученных автоклавным методом, представленный в работах 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. Гимашева, Е.М. Чернышова и зарубежных ученых - Э. Ву, А. Келли, Дж. Купера, С.Т. Милейко, Г.С. Холистера. Анализ показал, что основные свойства газобетонов зависят от

его поровой структуры и прочности межпоровой перегородки. Определено, что автоклавные газобетоны, как и обычные ячеисто-заполненные бетоны, плохо работают на растяжение при изгибе. Газобетоны также характеризуются образованием усадочных трещин при твердении. Повысить прочностные характеристики, а также другие свойства газобетонов можно за счет введения оптимального количества активных модификаторов, вместе с армирующим волокном.

На основании выполненных теоретических исследований была сформулирована рабочая гипотеза, положенная в основу работы: высокоэффективный газобетон может быть получен на основании оптимального управления механизмом формирования поровой структуры, микроармированием химически стойкими низкомолекулярными микроволокнами, и активными минеральными добавками, реагирующими с компонентами известково-кремнеземистого вяжущего, способные изменять на микроуровне степень насыщенности реагирующей смеси щелочным компонентом, и тем самым обеспечивать направленный гидротермальный синтез низкоосновных высокопрочных гидросиликатов кальция.

Во второй главе выбран объект и предмет исследования и даны подробные характеристики применяемых материалов. Определены методы исследования основных физико-механических свойств полученного материала.

В исследованиях применялись строительная известь в соответствии с ГОСТ 9179-77, из известняка Добрянтинского месторождения Владимирской области; песок в соответствии с ГОСТ 8736-2014, пробы № 2, карьера Тейковского района Ивановской области, портландцемент ЦЕМ I – 42,5 Н по ГОСТ 31108-2003, производства ОАО «Мордовцемент»; гипс сыромолотый производства ООО «Сандинский гипсоперерабатывающий комбинат», Республика Башкортостан, г. Кумертау по ТУ 5743-001-88100376-2013; щелочестойкие натуральные целлюлозные волокна "Армоцель"; микрокремнезем ОАО "Кузнецкие ферросплавы"; газообразователь в виде пасты пасты на основе диэтиленгликоля производства компании Schlenk Metallic Pigments GmbH.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния составов и технологии формования на формирование основных технико-эксплуатационных показателей газбетона как без применения модифицирующих добавок, так и с использованием активной минеральной добавки и дисперсного армирования.

Установлено, что 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 кварцевой составляющей с известью, от продолжительности воздействия и величины давления водяного пара, состава исходного сырья и соотношения компонентов.

На основании данных испытаний образцов газобетона показал, что значимыми факторами, при воздействии на которые можно эффективно управлять основными показателями – прочностью (R) и плотностью бетона (γ) без нарушения существующих параметров производства, являются удельная поверхность (x) и расход известково-кремнеземистого вяжущего (y_1), уравнения (1) и (2), рис. 1-2, а также водотвердое отношение (y_2) при постоянной подвижности смеси, уравнения (3) и (4), рис. 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.

$$R=0,89+0,143x+0,19y_1+0,05x^2+0,29xy_1+0,23y_1^2 \quad (1)$$

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

$$R=0,678+0,54x-0,69y_2-0,51x^2-0,53y_2^2+1,36xy_2 \quad (3)$$

$$\gamma = 358,09 + 81,11x - 70,61y_2 + 68,64x^2 - 45,33y_2^2 - 22,38xy_2 \quad (4)$$

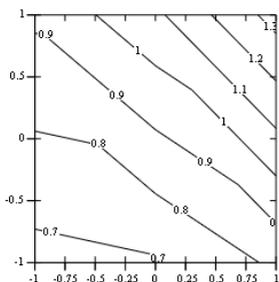


Рис. 1. Зависимость прочности от удельной поверхности (x) и расхода известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) (y_1)

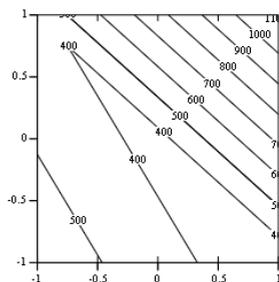


Рис. 2. Зависимость плотности от удельной поверхности (x) и расхода известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) (y_1)

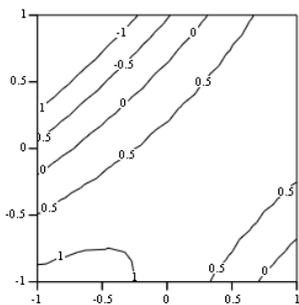


Рис. 3. Зависимость прочности от удельной поверхности (x) и водотвердого отношения (y_2)

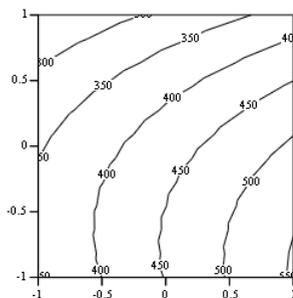


Рис. 4. Зависимость плотности от удельной поверхности (x) и водотвердого отношения (y_2)

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 (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 $20000 \text{ см}^2/\text{г}$) поверхностью и активностью за счет аморфной структуры.

Поисковые эксперименты, которые показали эффективность такой модификации, табл. 1. Заметен значительный рост прочности образцов близкой плотности уже при минимальных значениях расхода модификатора – до 1%. Однако при больших значениях расхода МК отмечается рост плотности за счет снижении подвижности при практически фиксированной прочности.

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.

Таблица 1. - Зависимость свойств бетонной смеси и газобетона 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

Признано, что 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. Были исследованы различные волокна на предмет установления их физико-механических характеристик и возможность применения в целях дисперсного армирования газобетона. Результаты представлены в табл. 2.

Из данных таблицы 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 80⁰С. 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.

Таблица 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

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 низкокомодульным волокнам – т.е. микроцеллюлозе.

Для определения оптимальных расходов модифицирующих компонентов был спланирован и проведен активный факторный эксперимент с равноподвижными смесями. В эксперименте варьировались расходы МК и МЦ от 0,5% до 1,5% и от 0,5% до 2,5% соответственно. Результаты моделирования описаны уравнениями зависимости прочности (5) и плотности (6) от расхода микрокремнезема - x и микроцеллюлозы – y:

$$R = 0.203 + 7.7337x - 0.686y - 4.0714x^2 + 0.352xy + 0.19592 \quad (5)$$

$$\Pi = 416.3956 + 178.5079x + 10.5937y - 84.7482x^2 - 6.6923xy + 1.6097y^2 \quad (6)$$

Анализ уравнений показывает, что максимальная прочность, при незначительном снижении плотности газосиликата соответствует расходу микрокремнезема в 1%. Сложнее зависимость характеристик газобетона от расхода армирующего волокна. 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 значительно нарастать плотность материала, что снижает его качественные характеристики. Поэтому оптимальными могут считаться составы с расходами микрокремнезема в 1% и микроцеллюлозы в 2,4%.

В четвертой главе представлены физико-химические и структурные исследования композита. Дано теоретическое обоснование возможности направленного синтеза высокопрочных низкоосновных гидросиликатов, показана их взаимосвязь с физико-механическими характеристиками газобетона. Определены методы исследования и эффективного управления поровой структуры композита.

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 α -излучения ($\lambda=0,07107$ нм), монохроматизированного циркониевым β -фильтром, в диапазоне углов 7–30° (2 θ) с шагом 0,01° по рентгенооптической схеме Брегга-Брентано. Интенсивность рассеяния от образцов регистрировалась позиционно-чувствительным детектором VANTEC-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 Plusversion 3.0 с использованием базы данных минералов PDF-2 Release 2004 Crystallography Open Database.

По результатам расшифровки, рис. 5, 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 гиролитом (Reference Code 00-042-1452, Gyrolite - Calcium Silicate Hydroxide Hydrate, Chemical Formula, $\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$, 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.

Образец соответствующий оптимальному по прочности составу – 1% МК, имеет в своем составе изменения в новообразованиях, рис. 6. Так наряду с гилебрандитом, появляется более низкоосновная фаза – ксонотлит (Reference Code 00-029-0379, Xonotlite, Calcium Silicate Hydroxide, Chemical Formula, $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$, Empirical Formula, $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{19}\text{Si}_6$). Сохраняется

присутствие различного рода гидроалюминатов и не прореагировавших пород.

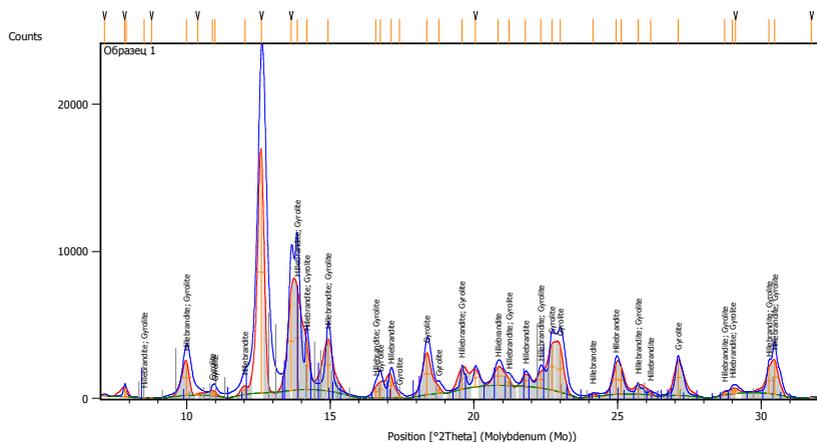


Рис. 5. Дифрактограмма контрольного образца

Перенасыщенный аморфным кремнеземом образец, соответствующий расходу МК = 1,5 % имеет в основе новообразований тоберморитоподобные гидросиликаты, рис. 7., (Reference Code 00-045-1479, Clinotobermorite - Calcium Silicate Hydrate, Chemical Formula, $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_{18} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 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.

Значительный рост прочности второго образца, содержащего 1% микрокремнезема, вероятнее всего объясняется синтезом устойчивого низкоосновного конотлита, относящегося, как и гилебрандит к группе волластонитов, но отличающегося большей твердостью (6,5 по шкале Мооса). По структуре он волокнист, в агрегатах очень вязок. Гиrolит 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.

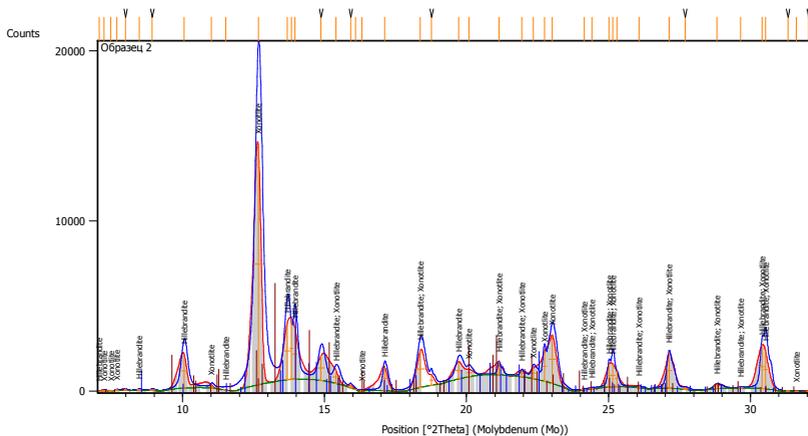


Рис. 6. Дифрактограмма образца с содержанием МК 1,0%

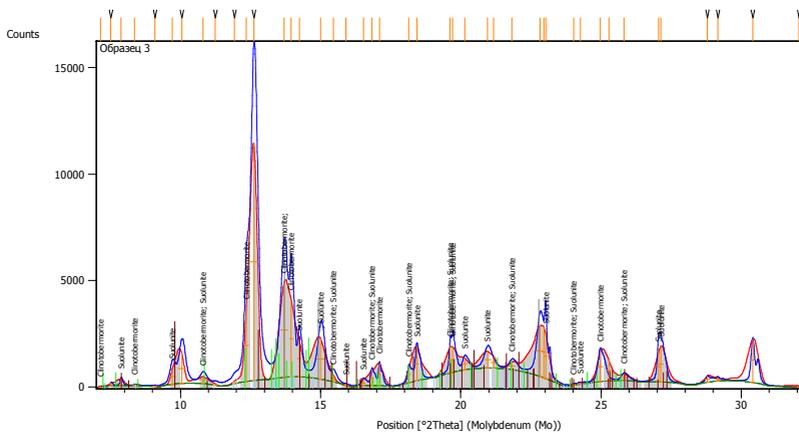


Рис. 7. Дифрактограмма образца с содержанием МК 1,5%

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.

Также изучались и структурные особенности ячеистого бетона. Установлено, что газобетон является гетерогенным пористым телом. Общая или эффективная теплопроводность подобных систем определяется теплопроводностями твердых и газовых фаз. С увеличением газовой фазы или пористости теплопроводность системы уменьшается. 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. Это уменьшает среднюю длину свободного пробега частиц и снижает фононную теплопроводность системы.

От распределения пор по размерам, количества в единице объема, их формы, целостности структуры, закрытости или открытости зависят основные физико-механические свойства ячеистого бетона. Доказано, что в общем случае, наибольшая прочность и наименьшая теплопроводность газобетона, 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.

Фазоконтрастным методом анализа неоднородностей изображений была получена статистическая информация о распределении пор по оцифрованному изображению фотографии шлифа массива бетона. Результаты сканирования и гистограммы распределения приведены на рис. 8.

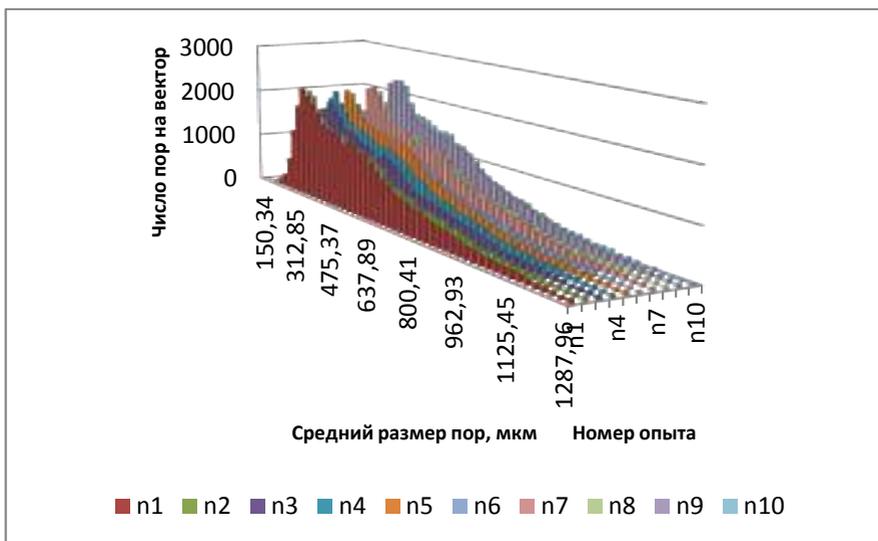


Рис. 8. Гистограмма распределения пор по размеру

Из анализа гистограмм распределения пор, установлено 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.

В пятой главе представлены результаты исследования физико-механических, теплотехнических и эксплуатационных показателей разработанного газобетона в сравнении с контрольными образцами. Сравнивались газобетоны автоклавного твердения марки D500 и класса B2,5. Установлены зависимости прочностных и теплофизических показателей материала от его влажности.

Анализ результатов позволяет утверждать, что оптимальный по составу образец разработанного газобетона, не только более прочный, при той же плотности, но и имеет более пологую кривизну графика потери прочности от влажности, что говорит о менее интенсивном снижении прочности при насыщении образца влагой. Кроме того, данные показывают, 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.

Также была установлена зависимость влажности материалов от характеристик паропроницаемости внешней отделки стен из газобетона. Установлено, что, 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. Определено, что 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 м²/г, что приводит к повышению прочности газобетона 75-90%, однако также приводит к росту плотности материала на 25-40%.

5. Доказана эффективность применения армирующих волокон для повышения прочности бетонной матрицы. Установлено, что наиболее перспективно применение низко модульной микроцеллюлозы с длиной волокна от 20 мкм до 2500 мкм и диаметром волокна примерно 25 мкм, устойчивой щелочной среде и температуре до 220°C и обеспечивающую, в отличие от высоко модульных, 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 B0.5 до B2,5 - B3.5.

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 поробразователя 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.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

**Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных
ВАК РФ:**

1. Алоян Р.М., Овчинников А.А., **Акимов А.В.** Исследования оптимальных методов модификации газобетона автоклавного твердения с целью повышения его прочности // Научное обозрение – 2014. №11 – С. 33-37.

2. Алоян Р.М., Овчинников А.А., **Акимов А.В.**, Семин О.А. Исследование структуры ячеистых бетонов на основе статистического

метода анализа неоднородности изображения // Научное обозрение – 2014. № 11- С. 37-41.

3. Алоян Р.М., Овчинников А.А., **Акимов А.В.** Исследование влияния кремнеземистого модификатора на минералогический состав и прочностные свойства газобетона // Научное обозрение – 2016. №2 – С. 6-14.

Научные статьи, доклады:

4. Алоян Р.М., **Акимов А.В.**, Овчинников А.А. Вяжущие на высококальциевой золе для газосиликатного бетона (статья) // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XIX международной научно-технической конференции. – Иваново, 2012. – 904 с. С. 228-231.

5. Алоян Р.М., Овчинников А.А., **Акимов А.В.** Производство неавтоклавного газобетона с различными наполнителями // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XIX международной научно-технической конференции. –Иваново, 2012. – 904 с. С. 226-228.

6. **Акимов А.В.**, Овчинников А.А., Матинян С.С., Чужбинкина И.Е. Управление качеством ячеистых бетонов // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XX международной научно-технической конференции. – Иваново, 2013. – 860 с. С. 211-216.

7. Алоян Р.М., **Акимов А.В.**, Овчинников А.А. Современные способы изготовления газобетона с минимальными затратами // Ученые записки факультета экономики и управления. Выпуск 24. Иваново, 2013 – 208 с. С. 87-90

8. Алоян Р.М., **Акимов А.В.**, Овчинников А.А. Исследование методов управления прочностными свойствами газобетона автоклавного твердения // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XXI международной научно-технической конференции. –Иваново, 2014. – 660 с. С. 80-84.

9. Алоян Р.М., Овчинников А.А., **Акимов А.В.** Применение статистического метода анализа неоднородностей изображения с целью порометрии газобетона // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XXI международной научно-технической конференции. – Иваново, 2014. – 660 с. С. 84-90.

10. Овчинников А.А., Акимов А.В., Касаткина Н.К., Никитина И.В. Кластерный анализ структуры композиционных материалов // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XXI международной научно-технической конференции. – Иваново, 2014. – 660 с. С.570-579.

11. Алоян Р.М., **Акимов А.В.**, Овчинников А.А., Матинян С.С. Оптимизация составов модифицированного газобетона автоклавного твердения // Информационная Среда ВУЗа. Сборник статей XXII международной научно-технической конференции. – Иваново, 2015. – 860 с. С. 215-222.

Подписано в печать 28.04.2016 г.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. 2,58
Тираж 100 экз. Заказ № 559.

Отпечатано с оригинал-макета
В типографии ООО «Энтер. Ком»
153037. г. Иваново, ул. 8 Марта, 32, корпус «Б», 3 уровень па. №1.
Тел/факс (4932) 59-02-02
