

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Касумов Аяз Шахин Оглы

**ПЕНОБЕТОН С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
СВОЙСТВАМИ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Е.Г. Величко

Москва – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА	11
1.1. Состояние проблемы, перспективы развития производства и применения ячеистого бетона.....	11
1.2. Структурообразование ячеистого бетона.....	20
1.3. Свойства пены и пенообразователей для ячеистого бетона.....	25
1.4. Выводы по главе 1. Научная гипотеза.....	28
2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ	29
.....	
2.1. Методики исследований.....	29
2.2. Оборудование.....	31
2.3. Материалы.....	34
3. РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ СОСТАВА ПЕНОБЕТОНА	44
3.1. Физико-химические методы модифицирования пенобетона.....	44
3.2. Свойства цементного теста с ускорителем твердения.....	50
3.3. Рациональные параметры ускорителя твердения АС для смеси мелкозернистого бетона.....	53
3.4. Рациональные параметры тонкодисперсного шлака.....	57
3.5. Рациональные параметры микрокремнезема и модификатора МБ – Б - П -2.....	63
3.6. Оценка рациональных параметров компонентов пенобетона.....	68

3.7. Выводы по главе 3.....	76
4. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА С РАЦИОНАЛЬНЫМ ДИСПЕРСНЫМ СОСТАВОМ.....	78
4.1. Научные основы снижения теплопроводности пенобетона.....	78
4.2. Структура модифицированного пенобетона рационального дисперсного состава.....	91
4.3. Строительно-технические свойства модифицированного пенобетона рационального дисперсного состава: прочность, коэффициент теплопроводности.....	109
.....	
4.4. Строительно-технические свойства пенобетона: влажность, водопоглощение, водостойкость, деформации усадки во времени.....	113
4.5. Выводы по главе 4.....	116
5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	119
5.1. Внедрение результатов работы.....	119
5.2. Техническая и экономическая эффективность модифицированного пенобетона.....	119
...	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	125
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Неавтоклавный пенобетон получает все более широкое применение в жилищном строительстве в качестве ограждающих конструкций. Обладая высоким уровнем теплофизических свойств, надежностью, включая долговечность, простой технологией и невысокими производственными затратами ячеистый бетон неавтоклавного твердения характеризуется высокими деформациями усадки, приводящими к трещинообразованию, снижению прочности и морозостойкости, а также повышению теплопроводности и водопоглощения.

Очевидно, что получение пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами, в т.ч. с низким уровнем деформаций усадки достигается повышением концентрации твердой фазы в единице объема применением химико-минеральной модификации на различных структурных уровнях, а также ускорением сроков схватывания, стабилизирующих структуру, образовавшуюся в процессе приготовления пенобетонной смеси и формования изделий.

Решение означенной проблемы получения эффективного теплоизоляционного материала в виде пенобетона неавтоклавного твердения на основе цементного вяжущего вещества обеспечивается стабилизацией пенобетонной смеси полифункциональными с пролонгированным действием минеральными и химическими добавками-модификаторами с синергетическим эффектом действия.

Работа выполнена в рамках локального проекта № 12 НИУ МГСУ.

Объект исследования: теплоизоляционный цементный неавтоклавный пенобетон с повышенными эксплуатационными свойствами.

Предмет исследования: рациональный дисперсный состав компонентов теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами.

Степень разработанности. Проблеме получения эффективных теплоизоляционных цементных ячеистых бетонов средней плотностью менее 500 кг/м^3 посвящено большое число научных работ российских и зарубежных ученых. Перспективным направлением является модификация пенобетона неавтоклавного твердения путем введения в его состав минеральных и химических добавок для улучшения структуры и эксплуатационных свойств. Однако, вопрос получения теплоизоляционного цементного неавтоклавного пенобетона марки по средней плотности D400 за счёт обеспечения стабилизации пенобетонной смеси комплексными и полифункциональными минеральными и химическими модификаторами пролонгированного действия с синергетическим эффектом изучен недостаточно, является проблемным и актуальной задачей на современном этапе.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является разработка составов высококачественного модифицированного теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами с комплексной добавкой пролонгированного действия на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов. Для решения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи: - анализ научно-технических положений разработки модифицированного теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона с комплексными добавками на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов; - разработка методик исследования и модификации структуры теплоизоляционного

неавтоклавного пенобетона комплексными добавками пролонгированного действия на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов; - теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности многоуровневой модификации структуры теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона комплексными добавками пролонгированного действия на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов; - теоретическое обоснование низкой теплопроводности модифицированного теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона комплексными добавками пролонгированного действия на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов; - исследовании и разработке комплексной химико-минеральной добавки пролонгированного действия, значимо повышающей качество структуры и эксплуатационные свойства пенобетона; - исследовании реологических свойств модифицированных пенных, пеноцементных систем и разработке материаловедческих и технологических приемов их регулирования; - выполнении физико-химического анализа гидратного фазообразования и кинетики твердения цементного камня, модифицированного химическими и минеральными добавками; - оптимизации состава пенобетона, с повышенными эксплуатационными свойствами; - опытно-промышленное внедрение и разработка технических условий по изготовлению модифицированного пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами

Научная гипотеза. Исследования и анализ состояния настоящей проблемы позволил разработать следующую рабочую гипотезу. Основным недостатком ячеистых бетонов неавтоклавного твердения являются высокие усадочные деформации, формирующие в бетоне собственное поле растягивающих напряжений. Означенные негативные явления способствуют интенсивному трещинообразованию и приводят к ухудшению показателей качества пенобетона: прочности, теплопроводности, водопоглощения,

морозостойкости, паропроницаемости. Получение пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами возможно путём модифицирования пенобетонной смеси комплексными химическо-минеральными добавками: ускорителями твердения, обладающими расширяющим эффектом и разномодальными минеральными составляющими, обеспечивающими многоуровневую оптимизацию дисперсного состава.

Научная новизна. Разработаны научные решения создания рационального дисперсного состава неавтоклавного модифицированного пенобетона путем многоуровневой оптимальной упаковки частиц твёрдых компонентов с минимальной толщиной прослойки цементного камня, обеспечивавшего максимально стеснённые условия формирования структуры плотных межячеистых перегородок, а также высокие эксплуатационные свойства (прочность, низкие теплопроводность, усадку) неавтоклавного пенобетона.

Теоретически обосновано применение в составе пены микрокремнезёма, а в состав пенобетонной смеси тонкодисперсного шлака, комплексного модификатора с ускорителем твердения, обеспечивших повышение прочности неавтоклавного пенобетона более, чем в 2 раза, снижение теплопроводности на 25 %, усадки - более, чем в 4 раза.

Установлено, что использование микрокремнезема при получении пены повышает устойчивость и улучшает ее реологические свойства, которая после перемешивания с модифицированной ускорителем твердения пенобетонной смесью обеспечивает получение однородной массы, способной к оптимально быстрому схватыванию и темпу роста прочности с тонкими, плотными и прочными перегородками между тонкодисперсными воздушными ячейками.

Получены математические модели свойств и оптимизирован состав пенобетона в зависимости от количества тонкодисперсного доменного шлака и комплексного модификатора.

Теоретическая и практическая значимость работы. Определены параметры минеральных компонентов, обеспечивающие многоуровневую оптимизацию дисперсного состава пенобетона и значимое повышение его эксплуатационных свойств. При комплексной химико-минеральной модификации пенобетона наблюдаются максимально высокие его строительные-технические свойства. Разработаны технология получения и эффективный неавтоклавный модифицированный комплексной химико-минеральной добавкой пенобетон с рациональным дисперсным составом марки по средней плотности D400, имеющий в возрасте 28 суток следующие свойства: среднюю плотность – 389 кг/м³; предел прочности на сжатие – 3,22 МПа, класс по прочности - В2,5; марку по морозостойкости - F75; влажность по массе в возрасте 180 суток - 5,14 %; коэффициент теплопроводности, - 0,08 Вт / (м·С); усадку в возрасте 180 сут. - 0,64 мм/м; водопоглощение по массе – 29,2 %; коэффициент размягчения – 0,84. Содержание ускорителя твердения в пенобетоне определяется законом Шульце-Гарди.

Разработаны технические условия: «Модифицированный пенобетон с рациональными параметрами компонентов состава. ТУ 5741-005-29888514-2016», утвержденные ООО «Инновационный ресурс».

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологической основой исследования служат теоретические и эмпирические методы, строящиеся на обобщении, сравнении, эксперименте, методах системного подхода, математического планирования и обработки результатов эксперимента. Работа выполнена с применением методологических основ системно-структурного подхода строительного материаловедения: «состав, технология – структура – свойства». Экспериментальные исследования проводились на лабораторных образцах, изготовленных и испытанных на оборудовании НИУ МГСУ, при вероятности получения результатов - 0,95.

Положения, выносимые на защиту: - научные положения разработки рационального дисперсного состава неавтоклавного модифицированного пенобетона путем многоуровневой оптимальной упаковки частиц твёрдых компонентов, обеспечивающей значимое повышение качества структуры и его эксплуатационные свойства; - результаты исследования структуры и строительно-технических свойств; - результаты теоретического и экспериментального обоснования низкой теплопроводности пенобетона, модифицированного комплексной химико-минеральной добавкой, содержащей в своем составе микрокремнезём, тонкодисперсный шлак и ускоритель твердения; - обоснование введения в пену микрокремнезёма для повышения устойчивости и улучшения реологических свойств, которая после перемешивания с модифицированной ускорителем твердения пенобетонной смесью обеспечивает получение однородной массы, способной к оптимально быстрому схватыванию и темпу роста прочности с тонкими, плотными и прочными перегородками между тонкодисперсными воздушными ячейками; - математические модели свойств и оптимизированный состав неавтоклавного модифицированного пенобетона; - результаты опытного внедрения.

Степень достоверности и апробация результатов. Высокая степень достоверности обеспечивается проведением экспериментальных работ с использованием исследовательского оборудования мирового уровня с достаточной воспроизводимостью результатов исследований; применением стандартных методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов с вероятностью 0,95, в том числе применением статистических методов обработки данных и необходимого числа повторных испытаний; сопоставлением полученных результатов с аналогичными результатами других авторов; положительными результатами опытного внедрения модифицированных пенобетонных изделий.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных научных мероприятиях «Устойчивость,

безопасность и энергоресурсосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений» (Москва, МГСУ, 2014, 2015); научно-практических конференциях «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» (Москва, ВВЦ, 2013); международных научно-практических конференциях студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство-формирование среды жизнедеятельности» (Москва, МГСУ, 2013, 2014, 2015, 2016); Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, РАН, 2014); а также на семинаре кафедры строительных материалов «Лучшие публикации в журнале «Строительные материалы» (Москва, МГСУ, 2015).

Внедрение результатов исследования. Результаты работы внедрены в виде опытной партии пенобетонных стеновых блоков в ООО «МЦМ-стоун». Объем опытной партии составил 28 тыс. шт. или 250 м³ пенобетонных блоков, использованных при строительстве жилого дома в Московской области.

Личный вклад соискателя в решение исследуемой проблемы заключается в обобщении, систематизации и развитии теоретических составляющих исследуемых вопросов, а также разработке и апробации полученных результатов. Соискателем самостоятельно получены, интерпретированы и апробированы результаты исследования.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 4-х научных статьях в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 145 страницах текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 204 наименований и 2 приложений, содержит 33 рисунка, 25 таблиц.

1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

1.1. Состояние проблемы, перспективы развития производства и применения ячеистого бетона

Ячеистый бетон, являющийся разновидностью лёгких бетонов, обладает уникальными строительно-техническими свойствами. Особенность его структуры - значительное количество (до 90 %) искусственно создаваемых воздушных полостей (ячеек), заполненных воздухом или газом, обеспечивающих саморегулирование относительной влажности воздуха и высокую комфортность жилых помещений. Поры или ячейки равномерно распределены в объеме, ограничены тонкими и прочными перегородками, образующими несущий каркас материала [1,2,3]. К основным факторам, определяющим качество ячеистого бетона можно отнести способ формирования пор; вид вяжущего вещества; условия твердения.

По способу формирования пор ячеистый бетон делят на пено-, газо-, газопенобетоны, а также поробетоны. При получении пенобетона сначала готовят пену из пенообразователей (ПО-6, ПБ-2000, неопора и т.п.), а затем вводят в бетонную смесь. В газобетоне поры создаются порообразующими веществами (алюминиевой пудрой или пастой и т.п.). Поробетон получается в высокоскоростном смесителе с добавлением кремнеземистого компонента, порообразователя (ПО-6, ПБ-2000, неопора и др.) и цемента. По аналогии с западными исследователями было введено новое название пенобетона - поробетон [4,5].

Бывают ячеистые бетоны портландцементных, известково-кремнеземистые (газо- или пеносиликаты), шлаковые (газо- и пеношлакобетоны), гипсовые (газо- и пеногипсобетоны), а также на основе многокомпонентных цементов.

По условиям твердения различают ячеистые бетоны автоклавного и неавтоклавного твердения. Бетоны неавтоклавного твердения набирают прочность при атмосферном давлении и температуре до 100 °С. Ячеистые бетоны автоклавного твердения - при повышенных температуре и давлении водяного пара в автоклавах [1,2,3,4,5].

Свойства ячеистых бетонов зависят от структуры, способа порообразования, их размера, вида вяжущего вещества и компонентов состава, условий твердения [1,5-8,9-11].

Пористость ячеистых бетонов характеризуется однородностью их распределения, однородностью их распределения, размерами пор и их количеством в объеме бетона. Общую пористость (Π) создают макропоры (Π_M), капиллярные (Π_K), контракционные ($\Pi_{ко}$) и гелевые ($\Pi_{ге}$) поры [12-14]. Поры имеют различный размер: макропоры $\Pi_M > 1 \cdot 10^{-3}$ м, капиллярные $\Pi_K = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ м. Контракционные $\Pi_{ко} = 5 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ м и гелевые $\Pi_{ге} = 15 \cdot 10^{-10} \dots 5 \cdot 10^{-9}$ м. Интегральная пористость равняется сумме означенных видов пор: $\Pi = \Pi_M + \Pi_K + \Pi_{ко} + \Pi_{ге}$.

Г.И. Горчаков [15] диаметры пор в цементных системах трактует несколько иначе: Макропорами или воздушными порами автор [15] называет поры с размерами более $5 \cdot 10^{-5}$ м. К капиллярным он относит поры с диаметрами от $1 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ м, а к гелевым – поры с диаметром менее $1 \cdot 10^{-7}$ м.

Макропоры образуются в материале за счёт образования газа (в газобетоне), при смешивании смеси с приготовленной пеной (в пенобетоне), воздухововлечении или при комбинации технологий. Капиллярные поры формируются в результате наличия объёмной, химически и адсорбционно несвязанной воды. Контракционные поры образуются при твердении за счёт уменьшения объема системы цемент плюс вода. Гелиевые поры являются самыми мелкими и распределены в цементном геле. Общая пористость бетона функционально связана с содержанием порообразователя и воды, видом и расходом вяжущего вещества и другими факторами [1,2,3,4,15,16].

Контракционная и гелиевая пористость менее значимо влияют на свойства ячеистого бетона, а капиллярная оказывает наиболее существенное влияние. Особенно это проявляется по его отношению к гидрофизическим характеристикам (сорбционное увлажнение, капиллярное всасывание, водопоглощение, коэффициент размягчения), а также морозостойкости [1,15,16]. Кроме того, поры крупных размеров, являясь концентраторами напряжений, в значимо большей степени снижают прочность бетона.

В высокопористых системах пористость может достигать уровня 90 %, а материал перегородок - небольшую долю. Поэтому, величина и характер распределения воздушных пор в объёме, то есть его микро- и макропористая структура, являются определяющими в процессе формирования комплекса свойств. При этом, технология и, конечно, способ поризации значимо характеризует качество поровой структуры и строительно-технические, а также экономические показатели изделий из ячеистого бетона [17-20].

Известно, что газобетон имеет закрытые и открытые поры, а пенобетон, чаще всего, закрытую пористость. Размеры отдельных пор у ячеистых бетонов эквивалентны, а средний их размер - от $(0,5...0,8) \cdot 10^{-3}$ до $(2...2,2) \cdot 10^{-3}$ м.

Пористость системы влияет на среднюю плотность ячеистого бетона в сухом состоянии. Она может находиться в достаточно широких пределах: конструкционные ($700-1200 \text{ кг/м}^3$), конструкционно-теплоизоляционные (500 и не выше 700 кг/м^3) и теплоизоляционные ($200 - 400 \text{ кг/м}^3$) [21-23]. Считается, что средняя плотность и пористость функционально связаны параметрами, определяющими прочность ячеистого бетона. Очевидно, что уменьшение диаметров пор и ячеек, повышение однородности распределения в системе, увеличение количества закрытых пор в виде сферы повысит прочность ячеистых бетонов и снизит теплопроводность за счет уменьшения конвективной составляющей. Классы прочности ячеистого бетона при сжатии равны от B0,35 до B20.

Их водопоглощение зависит от средней плотности, видов вяжущих веществ и минеральных компонентов. Для конструкционно-теплоизоляционных бетонов оно равно: для газобетона – 20...40 %, газосиликата – 25...45 % и газозолосиликата – 35...55 %. Водопоглощение увеличивается с повышением их открытой пористости [24]. С повышением влажности бетона прочность снижается, а коэффициент размягчения при этом равен 0,65.

Морозостойкость ячеистых бетонов значимо зависит от содержания в них резервных пор. На их долю в ячеистых бетонах приходится около 10 % пор. Они замкнуты и не заполнены водой. Такое их содержание является достаточным для расширения воды при ее фазовом переходе в лёд. Поэтому ячеистые бетоны имеют марки по морозостойкости от F15 до F100.

Их теплопроводность зависит, в основном, от их средней плотности, влажности и диаметров пор. Коэффициент их теплопроводности в сухом состоянии - 0,048-0,28 Вт/(м·°С) [1,2,15,20].

Свойства пено- и газобетонов определяются видом пористости и меньше - от способа порообразования. Поэтому, при равной марке по средней плотности они примерно одинаковы.

Однако, при заводском производстве крупных изделий опыт показывает, что газобетон лучше пенобетона. Производство автоклавного газобетона позволяет использовать в составе местные известь, шлаки, золы и изготовление таких газобетона, газосиликата и газошлакобетона было много лет основой развития производства ячеистых бетонов [25-27].

Сейчас повысился интерес к пенобетону, во-первых, неавтоклавному, как долговечному, экологически безопасному и дешевому материала. На организацию его производства требуются минимальные вложения финансов с получением различных классов бетона для наружных стен, внутренних перегородок, теплоизоляции [9-11,28-30].

Ячеистые бетоны на современном этапе имеют низкую теплопроводность, достаточный предел огнестойкости, экологическую

безопасность, простоту технологии, невысокий уровень производственных затрат. Применение новых поверхностно-активных добавок, многокомпонентных цементов, высокодисперсных минеральных добавок, в т.ч. нанометрового уровня создает условия формирования эффективной ячеистой структуры, обеспечивая производство высококачественных бетонов различной средней плотности с повышенной прочностью и низкой теплопроводностью на одном и том же оборудовании. Есть возможность исключить из технологии автоклавы и заменить их на более простую тепловую обработку. Ячеистый бетон обладает хорошей паропроницаемостью, что обеспечивает ему экологическую безопасность по санитарно-гигиеническим нормам.

На настоящее время разработаны варианты одно-, двух- и трехслойных наружных стен с использованием пенобетона [31-35].

Однослойные стены применяются как навесные панели после монтажа к несущим конструкциям. В малоэтажных домах такие стены могут быть самонесущими.

Двухслойные навесные конструкции ненесущие, несущие и самонесущие выполняются из пенобетона марки D200...D250 с наружной скорлупой из фибробетона толщиной 15-30 мм или наружным торкретированным слоем. Нагрузка от массы стены передается на перекрытие через выступающие консоли. С внутренней стороны ограждающая конструкция затирается или штукатурится цементно-песчаным раствором по стальной сетке. Сетка объединяется с наружным слоем гибкими оцинкованными стальными связями, которые проходят через слой пенобетона.

На трехслойные стены опираются перекрытия. Они также могут быть ненесущими навесными. Такие конструкции выпускаются с теплоизоляционным срединным слоем из лёгкого бетона с низкими средней плотностью, прочностью и теплопроводностью. Наружные слои выполняются из конструкционных бетонов.

Известно, что ячеистые бетоны имеют высокую прочность сцепления с тяжелым бетоном, но для этого требуется последовательная укладка слоев в едином технологическом цикле с образованием монолитного сечения. Такая технология исключает установку любых межслойных связей. Есть трехслойная навесная стена с наружным и внутренним штукатурными слоями или из торкретбетона толщиной более 20 мм по металлической сетке. Внутренний слой выполнен из пенобетона марки D200...D250,

Трехслойная навесная стена с теплоизоляцией из пенобетона марки D200 и менее между внутренним и наружным слоями из кирпичной кладки в полкирпича, которые соединяются оцинкованными металлическими стержнями.

Трехслойные несущие стены могут иметь внутренний несущий слой железобетона; конструкционного легкого бетона; сборных железобетонных панелей; из кирпичной кладки.

А наружный защитный слой - из железобетонных скорлуп; из кирпичной кладки или других материалов.

Применение пенобетона в наружных стенах зданий обеспечивает улучшение воздухообмена, влагомассопереноса и теплозащитных характеристик стены, а также экологичности конструкции, повышающей комфортность жилища и существенное повышение пожаростойкости, долговечности и надежности в эксплуатации стеновых конструкций и здания в целом.

Однако, улучшение воздухообмена и влагомассопереноса через стену. по мнению авторов [36-38] приводит к дополнительным потерям тепла и плохо влияет на парниковый эффект.

Теплоизоляцию из пенобетона можно применять: для утепления кровли зданий, резервуаров, при реконструкции зданий [34].

Пенобетон в строительстве должно не развивается из-за склонности к расслоению при формировании массивов и неустойчивости структуры смесей

при изменениях относительной влажности воздуха и температуры в окружающей среде.

Разработка новых теплоизоляционных материалов определяется следующими 3 факторами. Во-первых, - это федеральная целевая программа «Жилище» до 2020 года. Во-вторых, повышение требований к тепловой защите зданий. В-третьих, принятие закона «Об энергосбережении и энергоэффективности» [9-11,39,40,41,42].

Общий объем производства ячеистых бетонов в 2008 и 2009 годах вырос на 25-30% [41,43] за счёт индивидуального и малоэтажного строительства.

Указанные Федеральные программы направлены на: внедрение новых современных, энергоэффективных технологий в производство строительных материалов и жилищное строительство [44].

Требования по энергоэффективности определяют объемы производства теплоизоляционных материалов для снижения энергопотерь [45].

Для реализации Указа Президента РФ № 889 от 4 июня 2008 года был принят «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» № 384-ФЗ. Он включает СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (редакция СНиП 23-02-2003). Этот свод правил принят по постановлению Правительства РФ № 18 от 25 января 2011 года. По этим документам должен быть уменьшен удельный расход энергоресурсов на каждое здание по сравнению с базовым (по нормам 2003 - 2010 годов) на 30 % с 2016 года и на 40 % - с 2020 года. По новым нормативам приведённое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций увеличивается на 20-75 % по сравнению с предыдущим этапом. А по сравнению с с нормами 2000 года - в 3-3,5 раза. Очевидно, что означенные требования и условия приведут к пересмотру существующих конструктивных решений.

Программа «Жилище» на 2016-2020 годы даёт развитие жилью экономкласса и энергоэффективным и экологичным технологиям при цене 1 м² общей площади, определённой Минрегионразвития РФ, до 30 тысяч

рублей [41,46]. По мнению экспертов, малоэтажное домостроение способно предложить качественное и недорогое жильё.

В 2010 году было выпущено мелких стеновых блоков из ячеистого автоклавного бетона около 6,1 млн. м³, а из неавтоклавного ячеистого бетона - 2,6 млн. м³. В сумме - около (6,1+2,6 =8,7 нужно уточнить)14,1 млн. м² или 23,5 % от общей площади (60 млн. м²), введенной в 2010 году в РФ. В 2015 году объём производства автоклавного и неавтоклавного ячеистого бетона был 9,1 млн. м³ и 5,5 млн. м³ соответственно и составил 14,6 млн. м³ или 23,7 млн. м², т.е. 20,1 % от общей площади (85 млн. м²), построенной в стране. По данным [47,48] производство ячеистого бетона в 2020 году достигнет 15 млн. м³ автоклавного твердения (включая 20 % армированного) и 8,1 млн. м³ - неавтоклавного, что в пересчете на квадратные метры общей площади составит 36,16 млн. м² или 25 % от общего объема ввода жилья.

Почти всем предприятиям, на которых производятся ячеистые бетоны в настоящее время, не более 10-15 лет. Крупнейшие предприятия РФ производят свыше 100 тыс. м³ изделий в год. Также работают заводы меньших мощностей. По информации «Агентства строительной информации», в России - более 150 крупных и мелких предприятий по производству изделий из ячеистого бетона [49]. Заводы ячеистых бетонов высокой мощности работают в Беларуси, Казахстане.

Необходимо отметить, что существующий объём выпуска ячеистого бетона является недостаточным для осуществления строительства малоэтажного жилья эконом класса в объеме 60 % от общего объема, предусмотренном программой «Жилище».

Существующие конструктивные решения ограждающих конструкций из дерева, кирпича, лёгких и ячеистых бетонов со средней плотностью 700...800 до 1000...1200 кг/м³ не годятся по новым теплотехническим нормам: их толщина при этом должна составлять 1,45...2,05 м. Это делает несостоятельными технико-экономические показатели зданий. Очевидно, что средняя плотность стеновых материалов должна быть 400-500 кг/м³ с

сохранением прочностных и др. показателей или наружные стены необходимо изготавливать в виде многослойных конструкций с применением в их конструктивном решении слоёв из материалов низкой теплопроводности [48].

Однослойные стены проектируются в настоящее время из автоклавных ячеистых бетонов и в меньшей степени из неавтоклавных пено- и полистиролбетонов средней плотностью 400-500 кг/м³. Отсутствие качественного и дешёвого пенобетона ограничивает его применение в строительстве. Многослойные конструкции дороже, менее надёжны, но более доступны на рынке. Поэтому их более широко применяют в строительстве. Слабым звеном таких стен является утеплитель. От его свойств и места нахождения в конструкции зависит толщина, стоимость, надёжность, включая долговечность.

Наиболее высокой эффективностью обладают неавтоклавные газо- или пенобетоны. Но для их производства требуется последовательная модернизация заводов и технологий изготовления этих изделий. Это будет способствовать увеличению производительности работающих заводов, снижению стоимости выпускаемой продукции и строительства в целом.

Неавтоклавный пенобетон получил широкое распространение в России. Исследования в области пенобетона. проводились Ю.П. Горловым, А.П. Меркиным, У.Х. Магдеевым, Ю.Д. Чистовым, Е.В. Королёвым, В.А. Перфиловым, В.Ф. Коровяковым, Б.М. Румянцевым, В.С. Лесовиком, Г.П. Сахаровым, Л.Д. Шаховой, Е.Г. Величко; В.В. Верстовым, Т.А. Уховой; Ш.М. Рахимбаевым; Л.В. Моргун; В.Т. Перцевым; В.Г. Хозиным и др. Но до сих пор не разработаны решения по кардинальной интенсификации получения (производства) неавтоклавного пенобетона со стабильными характеристиками.

Таким образом, получение пенобетона низкой средней плотности может быть достигнуто ускорением сроков схватывания и твердения, а также стабилизацией структуры, полученной в процессе приготовления

пенобетонной смеси и формования изделий. Очевидно, что решение проблемы получения эффективного теплоизоляционного материала на основе цементного вяжущего вещества может быть достигнуто за счёт стабилизации пенобетонной смеси полифункциональными минеральными и химическими добавками-модификаторами.

1.2. Структурообразование ячеистого бетона

Производство теплофизически эффективного пенобетона низких марок по средней плотности имеет свои проблемы. Это связано с обеспечением стабильной ячеистой структуры и высокой прочности. Отмечается [50], что повышение прочности при постоянной плотности может быть обеспечено только за счет увеличения прочности матрицы пенобетона: во-первых, благодаря повышению активности вяжущего вещества, снижению водотвердого отношения; во-вторых, использованию минеральных и химических модификаторов пролонгированного действия, механохимической активации вяжущего вещества и др. Применение означенных технологических приемов, естественно, усложняет технологический процесс. Потому их внедрение должно обосновываться технико-экономической необходимостью [50].

В исследованиях последних лет было уточнено влияние технологических факторов на строительно-технических свойств (СТС) ячеистых бетонов. Были выявлены производственные возможности улучшения их характеристик [51]. Структурные изменения пористости бетона оказывают большое влияние на его прочность и усадочные деформации. Одними из основных факторов являются дисперсность и вид вяжущего вещества. Применение высокомарочного портландцемента, как правило, увеличивает прочность ячеистых бетонов. Поскольку прочность цементного камня в большой степени определяет микроструктуру и прочность межпоровых перегородок [1,4,25,52 и др.]. Повышению прочности поризованного бетона способствует увеличение тонкости помола сырьевых материалов, особенно кремнезёмистых и шлаковых, а также уменьшение отношения содержания кремнезёмистого материала к содержанию вяжущего вещества. Так, при замене 50-ти % портландцемента немолотым песком, причём вне зависимости от его гранулометрического состава) однородность пористой структуры ухудшается. При этом наблюдается седиментация

крупных зёрен песка, которые разрушают и укрупняют поры в структуре бетона. Форма пор переводит из прочной сферической в менее прочную – овальную с утоньшением перегородок. Каркас такого пенобетона состоит из межпоровых перегородок, пронизанных зёрнами немолотого песка.

Прочность неавтоклавного ячеистого бетона обычно ниже прочности автоклавного бетона в среднем на 1 класс. Прочность на сжатие неавтоклавного пенобетона может быть существенно повышена путем гидромеханической активации вяжущего вещества [53,54]. При этом, активацию вяжущего вещества целесообразно проводить совместным помолом песка и цемента в присутствии воды с последующей поризацией смеси. Водотвердое отношение (В/Т) также оказывает большое влияние на СТС ячеистого бетона: в частности, на его прочность. При этом, увеличение В/Т не уменьшает средней плотности пенобетона, т.к. столько же пены находится в увеличенном объёме. Увеличивается подвижность раствора и снижается вероятность слияния пор. Поэтому воздухопроницаемость пенобетона с повышением В/Т уменьшается в отличие от газобетона [55]. Это зависит от макроструктуры пенобетона. В нём наблюдается большее количество замкнутых пор. С увеличением В/Т поры становятся мельче и более приближаются по форме к сфере.

С целью формирования необходимой дисперсной структуры обязательным условием является возникновение прочных индивидуальных контактов между взаимодействующими частицами [56,57,58-61,62-65]. Коагуляционные контакты между твёрдыми частицами, разделёнными прослойками жидкой среды, формируются при затворении водой цемента. Это определяет технологические свойства цементного раствора и сводит коагуляционное действие к минимуму. Условия структурообразования цементного камня необходимо регулировать для обеспечения максимальной прочности фазовых контактов и создание прочной дисперсной структуры [66].

Известно, что в высокоразбавленных суспензиях минеральных веществ самопроизвольное оседание столба седимента может происходить быстрее или медленнее. Всё зависит от агрегативной неустойчивости системы. Агрегативно неустойчивые системы с сильным коагуляционным взаимодействием оседают быстрее, а агрегативно устойчивые - медленнее. Поэтому, при одном и том же количестве вещества при различных условиях занимается различные объемы. Следовательно, в зависимости от величины образованных агрегатов меняется плотность упаковки твёрдых частиц в единице объёма осадка [14,52,53]. Скорость оседания дисперсных частиц растёт с увеличением доли цемента в сухой смеси с 10 до 40 %. Происходит снижение агрегативной устойчивости песчаной суспензии [22]. При содержании цемента от 40 до 60 % в системах показатель скорости оседания является постоянной величиной. Увеличение в дальнейшем содержания цемента приводит к повышению агрегативной неустойчивости системы.

Очевидно, что степень коагуляции цементно-песчаного раствора зависит от соотношения цемент-песок в твердой фазе и показателя В/Т [13,67,68]. В смеси с В/Т, равным 0,45...0,6, степень коагуляции изменяется по следующему сценарию. При количественном содержании в смеси цемента в 10...40 % степень коагуляции увеличивается вместе с количеством цемента. При этом, степень коагуляции тем больше, чем ниже В/Т. В системах, содержащих от 40 до 60 % цемента, показатель степени коагуляции не зависит от состава твердой фазы. Основным фактором регулирования степени коагуляции в этом интервале составов является содержание воды (при повышении В/Т степень коагуляции снижается). С увеличением доли песка от 60 до 100 % степень коагуляции увеличивается со снижением количества воды в системе. Степень коагуляции растворов цемента с песком с ВТ 0,45...0,6 % адекватна степени агрегирования соответствующих систем с высоким разбавлением (1:10). С другой стороны, системы с высокой концентрацией дисперсной фазы (В/Т= 0,45...0,6) имеют отличия от них по сопротивлению сдвигу, а также течению. Составы с одинаковой степенью

коагуляции отличаются прочностью, вязкостью и консистенцией. При переходе от систем с малым содержанием цемента (40 %) к системам с содержанием (60 %) прочность растёт медленнее, чем вязкость. При повышении В/Т она уменьшается быстрее [35].

Консистенция пенобетонных смесей с массой цемента до 40 и выше 60 % легко регулируется при обеспечении минимальной степени агрегирования. Это может происходить за счёт добавок ПАВ, изменения состава сухой смеси и водотвёрдого отношения. С другой стороны, в системах с количеством 40...60 % цемента – благодаря изменению только водотвёрдого отношения. Пенобетоны, получаемые по литьевой технологии, имеют в составе малосвязанную воду. Поэтому после укладки пенобетонной смеси в форму начинается процесс её перераспределения. Она группируется в нижней части пор и увеличивает обводненность частиц твердой фазы, находящихся в этой части межпоровой перегородки. Следовательно, поле напряжений в структуре пенобетонной смеси разное. Максимальные растягивающие напряжения возникают в перегородках, расположенных перпендикулярно силе тяжести. Поэтому, при напряжении, достаточной для сдвига отдельной твёрдой частицы, вода выдавливается из промежутков между частицами и агрегаты разрываются. Происходит объединение пор и увеличение их среднего диаметра, а затем - расслоение и осадка пенобетонной смеси.

Одним из главных недостатков неавтоклавного бетона при твердении и сушке является усадка. Она связана, во-первых, с размером образующихся воздушно-пенных пузырьков в пенобетонной смеси. С уменьшением их размеров увеличивается их удельная поверхность при равном воздухововлечении. Соответственно, чем большим количеством частиц цемента и мелких зерен песка армируются пузырьки пены, тем устойчивее пенобетонная смесь.

Устойчивость смеси зависит от давления внутри пузырька. Она обратно пропорциональна квадрату радиуса пузырька. Известно, что избыточное давление газа в порах газобетона является причиной их прорыва

и дальнейшего трещинообразования в перегородках. Однако, в пенобетонах этого не происходит. Избыточное давление в пузырьках пены компенсируется увеличением сил поверхностного натяжения жидкости. Они являются причиной возникновения этого давления.

Для уменьшения усадки бетона применяют дисперсные наполнители, обладающие высокой адсорбционной активностью и стабилизирующие пену [53]. Для повышения качества в технологии пенобетона применяются ускорители твердения, а также быстросхватывающиеся вяжущие вещества и др., что не требует больших затрат для внедрения [50,69-71].

На СТС пенобетона большое влияние оказывает технология, которая включает в себя: приготовление устойчивой пены и мелкозернистой смеси на основе портландцемента с добавлением песка или золы, их перемешивание [3,22,51,72]. Наиболее сложным и трудноуправляемым процессом является перемешивание пены с мелкозернистой смесью. Происходит разрушение пены с потерей 15...30 % объема. Появляются участки с неиспользованным пенообразователем. Они являются зародышами разрушения, плохо влияющие на однородность пенобетона по средней плотности и прочности [50].

Одной из основных причин разрушения пены является разница средней плотности растворной смеси и пены. Это отличие составляет 20...25 раз. Разрушение пены происходит, в основном, на границе раздела между системами: исходная смесь - пена и атмосферным воздухом. Поэтому, для повышения устойчивости пены в пенобетонной смеси была разработана технология с названием «баротехнология» [50]. Также известен способ приготовления пенобетона путем сухой минерализации. При этом происходит приготовление низкократной пены и постепенное введение в нее цемента и песка (золы) [71].

1.3. Свойства пены и пенообразователей для ячеистого бетона

Выбор ПАВ для получения технической пены представляет собой не простую задачу. По классификации П.А. Ребиндера ПАВ подразделяются на 4 группы [73]. Для получения технической пены могут быть использованы вещества из 1 и из 3 групп.

В 1 группу входят низшие спирты, анилин, кислоты и др. Пены из их растворов распадаются достаточно быстро.

В 3 группу входят пенообразователи: мыла, синтетические и природные ПАВ, способные образовывать в воде коллоидные системы, а пены из них, имеют высокую устойчивость. Кратность и стойкость – главные свойства пены. Они зависят от природы и вида ПАВ, концентрации ПАВ в водном растворе и метода вспенивания.

ПАВ по виду адсорбции и механизму стабилизации дисперсных систем подразделяются на низкомолекулярные и высокомолекулярные [3,14,74,75].

Главным фактором, определяющим состав ПАВ, является химическая природа их молекул. Не все ПАВ молекулярно растворимы в воде, т.е. не все образуют истинные растворы. Часть веществ образует агрегаты молекул или мицелл, защищаемых от действия воды гидрофильными группами. Внутри них собираются гидрофобные части молекул. В этом случае говорят о коллоидных, или мицеллярно-растворимых ПАВ. Фундаментальным свойством ПАВ является гидрофильность их молекул.

ПАВ делят по растворимости: на водорастворимые и маслорастворимые; по способности- образования в воде истинные или коллоидные растворы [68,76-79].

По пенообразующей способности ПАВ разных классов сравнение научных данных [80-105] затруднительно. В последнее время стали учитывать экологическую безопасность: биологическую разлагаемость ПАВ, воздействия на окружающую среду.

Известно, что процесс пенообразования сложен из-за совместного влияния физико-химических, физико-технических факторов [74,75]. Закономерности процесса образования пены существенно зависят от конкретных условий проводимого технического процесса или научного эксперимента. Большое количество переменных параметров, сложность их влияния на процесс затрудняет возможность строгого математического описания протекающих процессов. Следовательно, изучение каждого фактора, их влияние позволит предсказать рациональные параметры процесса пенообразования в конкретных условиях.

Пенообразующая способность во многом зависит от строения молекул ПАВ и устойчивость пены связано с повышением поверхностной активности, температуры, концентрация раствора [14,17, 68,72-77, 79,80,106,107,108]

Единой теории по этому вопросу не существует. Есть разные точки зрения [17, 67,68, 103,105, 108,109, 110,111,112, 113,114-120],

До 70-х годов в качестве активной основы пенообразующих составов применялись гидролизаты белков, продукты лесохимического производства и нефтяные сульфокислоты. По данным авторов [14,17,74] хорошо изучены: ГК, смолосапониновый, клееканифольный и алюмосульфонафтенный пенообразователи. Например, пенообразователь ГК получали при гидролизе крови крупного рогатого скота в присутствии щелочи с последующей нейтрализацией и стабилизацией раствором железного купороса. Наибольшей кратностью пены обладал алюмосульфонафтенный пенообразователь, но он имел низкую стойкость во времени. СТС изделий, полученные на основе перечисленных пенообразователей, почти не отличались. Эти пенообразователи не устойчивы при хранении, имеют низкократную пену и ограниченную (по сравнению с требуемым объёмом производства) сырьевую базу. Однако, интерес к пенообразователям на основе природного сырья продолжает сохраняться, поскольку это позволяет утилизировать техногенные отходы.

Активной основой синтетических пенообразователей в начальной стадии разработок служили алкиларилсульфонаты, получаемые из нефтяного сырья. Алкил имел - С₄...С₁₈Ю выпускались пенообразователи ПО-1Д, ПО-1, ПО-6К, на основе алкилсульфатов и алкилэтоксисульфатов, которые давали достаточно стабильные пены с диапазоном кратности от 7 до 1000, олефинсульфонаты разных фракций.

Сейчас имеется широкий выбор пенообразователей. В показанных исследованиях [17] установлено, что хорошей пенообразующей способностью обладает «пенообразователь № 1», «Пеностром», у солей насыщенных жирных кислот - соли пальмината натрия.

Синтетические пенообразователи «Каскад», «Поток» и «ТЭАС» [80-85] дают качественную техническую пену: для производства гипсовых изделий, а для цементных пенобетонов - пенообразователь ПБ-2000. Этот пенообразователь является биологически безопасным и является смесью анионоактивных веществ. Эти вещества имеют гидрофобные радикалы различного строения. В состав смеси входят добавки для устойчивости пены в цементной системе.

Авторами [17] было проведено сравнение свойств пенообразователей: клееканифольный, смолосапониновый, алюмосульфонафтенный, ГК, «Пеностром», окись амина, пожарные (ПО-6, ПБ-2000).

С одной стороны, важно, использовать в промышленности строительных материалов местные природные пенообразователи: отходы дубильных экстрактов кожевенного производства, подмыльный щёлок, сопаток, его отходы, сульфитный щёлок, гидролизованную кровь с боев. У отходов промышленности, их свойства неоднородны и не стабильны. С другой стороны, синтетические пенообразователи выпускаются в соответствии с ГОСТ или ТУ, поэтому они обладают постоянством состава, свойств. Срок их годности значительный. Это является преимуществом их использования. При правильно выбранной технологии и состава пенобетона,

качество изделий из него не уступают изделиям на природных пенообразователях.

1.4. Выводы по главе 1. Научная гипотеза

1. Пенобетон неавтоклавного твердения - перспективный теплоизоляционный материал для развития и реализации жилищной проблемы РФ. Он характеризуется повышенной надёжностью, включая долговечность, простотой технических решений, невысокими производственными затратами при изготовлении.
2. В качестве основных структурообразующих факторов следует выделить концентрацию твёрдой фазы в межпоровых перегородках, дисперсность и активность минеральных модификаторов, возможность создания многоуровневого рационального дисперсного состава матрицы.
3. Особую значимость при разработке составов неавтоклавного пенобетона приобретает применение техногенных отходов и местного сырья. Для обеспечения заданных показателей качества изделий из неавтоклавного пенобетона необходим учёт взаимосвязи материаловедческого и технологического аспектов формирования его структуры и свойств.
4. На основании анализа научно-технических источников была предложена **научная гипотеза**. Исследования и анализ состояния настоящей проблемы позволил разработать следующую рабочую гипотезу. Основным недостатком ячеистых бетонов неавтоклавного твердения являются высокие усадочные деформации, формирующие в бетоне собственное поле растягивающих напряжений. Означенные негативные явления способствуют интенсивному трещинообразованию и приводят к ухудшению показателей качества пенобетона: прочности, теплопроводности, водопоглощения, морозостойкости, паропроницаемости. Было разработано предположение, что получение пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами возможно путём модифицирования пенобетонной смеси комплексными химическо-минеральными добавками: ускорителями твердения, обладающими расширяющим эффектом и разномодисперсными

минеральными составляющими, обеспечивающими многоуровневую оптимизацию дисперсного состава.

2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. Методики исследований

Исследования по настоящей работе были выполнены в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на современном оборудовании мирового уровня с использованием методик ГОСТ РФ [121-124].

Определение средней плотности пенобетона проводили по ГОСТ 27005-86 и ГОСТ 12730.1-84. Прочность бетона на сжатие - на образцах-кубах с размерами 50x50x 50 мм на автоматической испытательной установке Controls (Италия) по ГОСТ 10180-2012.

Микроструктурный (МСА) и химический (ХА) анализы проводились одновременно методом растровой микроскопии на микроскопе-микроанализаторе FEI Quanta 200 (Швейцария) с системой микроанализа Apollo 40 фирмы Phillips (Голландия). Зондирование производится при напряжении до 30 кВ. Метод основан на взаимодействии пучка электронов с атомами твердых образцов, представленных в виде сколов или порошков. Для исключения искажений на их поверхность проводилось графитовое напыление. За счёт рентгеновского излучения определяется процентное содержание элементов и их оксидов от бора до урана на участке скола размером 3x3 мкм.

Метод позволяет получить чёткую структуру по поверхности скола при увеличении до 80 тыс. раз.

Рентгенофазовый анализ (РФА) кристаллических веществ основан на изучении возникающей дифракции при действии рентгеновского излучения с длиной волны около 0,1 нм на твёрдый образец или его порошок. Анализ выполнялся на рентгеновском дифрактометре ARL XTra (Thermo Fisher Scientific Inc., США).

После графического получения рентгенограмм, проводится её расшифровка. Совместное рассмотрение рентгенограммы, микроструктурного и химического анализов позволяет с высокой достоверностью установить вещественный и минеральный составы исследованного образца [125-131].

Определение основных показателей исходных материалов выполнялись по методикам ГОСТ РФ.

Определение деформаций усадки проводили на образцах с размерами 40x40x160 мм по ГОСТ – 24544-81.

Степень гидратации портландцемента (α) определяли по общепринятой и доступной методике НИИ асбестоцемента по формуле:

$$\alpha = (1 - I/I_0) \cdot 100 \%$$

где I_0 - интенсивность пика алита в негидратированном цементе,

I – интенсивность пика алита в гидратированном портландцементе.

Степень гидратации цемента определялась по пику алита с межплоскостным расстоянием $d = 1,76 \cdot 10^{-10}$ м.

2.2. Оборудование

Экспериментальные исследования по диссертации были выполнены на оборудовании НИИ МГСУ:

- на кафедре строительных материалов;
- на кафедре ТВВ и Б;
- в НИИ СМиТ.

В работе были использованы:

- растровый электронный микроскоп-микроанализатор Quanta 200 (Швейцария), оснащённый системой микроанализа Apollo 40 фирмы Phillips (Голландия), рисунок 2.2.1;
- рентгеновский дифрактометр ARL XTra фирмы Thermo Fisher Scientific Inc. (США), рисунок 2.2.2;
- испытательная установка фирмы Controls (Италия), рисунок 2.2.3;
- испытательная установка DELTA 5-300 фирмы Form+Test (Германия), рисунок 2.2.4;
- климатическая камера WEISS (Германия), рисунок 2.2.5;
- аппарат Блейна для определения дисперсности порошков фирмы Controls (Италия), рисунок 2.2.6.



Рисунок 2.2.1 - Растровый электронный микроскоп-микроанализатор Quanta 200 (Швейцария), оснащённый системой микроанализа Apollo 40 (Phillips, Голландия).



Рисунок 2.2.2 - Рентгеновский дифрактометр ARL XTra фирмы Thermo Fisher Scientific Inc. (США).



Рисунок 2.2.3 - Испытательная установка фирмы Controls (Италия).

Определение усадки и морозостойкости проводилось в климатической камере WEISS (Германия). Камера представлена на рисунке 2.2.5.



Рисунок 2.2.4 - Испытательная установка DELTA 5-300 фирмы Form+Test (Германия).



Рисунок 2.2.5 - Климатическая камера WEISS (Германия).



Рисунок 2.2.6 - Аппарат Блейна для определения тонкости помола порошков фирмы Controls (Италия).

2.3. Материалы

Суперпластификатор С-3

Суперпластификатор С-3 - продукт поликонденсации β -нафталиновых сульфокислот с формальдегидом. Выпускается комбинатом «Полимерсинтез» (г. Владимир, Россия) в виде порошка коричневого цвета, растворяется в воде, рН = 7,0 - 7,5.

Портландцемент

Использован портландцемент ОАО «Старооскольский цементный завод» Цем 1 42,5 Н или ПЦ 500-Д0. Выполнен микроструктурный, химический, рентгенофазовый анализы порошка портландцемента. Результаты даны на рисунках 2.3.1 и 2.3.2, в таблицах 2.3.1 и 2.3.2.

Минеральный состав портландцемента ПЦ 500–Д0 ЗАО «Старооскольский цементный завод» приведен в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Минеральный состав портландцемента ПЦ 500-Д0

Минеральный состав, %			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
61,2	18,7	3,68	13,9

Химический анализ цемента приводится в таблице 2.3.2.

Таблица 2.3.2 – Химический состав портландцемента ПЦ 500-Д0

Оксид	Содержание, %	Оксид	Содержание, %
CaO	65,74	MgO	1,06
SiO ₂	21,04	SO ₃	3
Al ₂ O ₃	5,42	K ₂ O	0,82
Fe ₂ O ₃	3,51	-	-

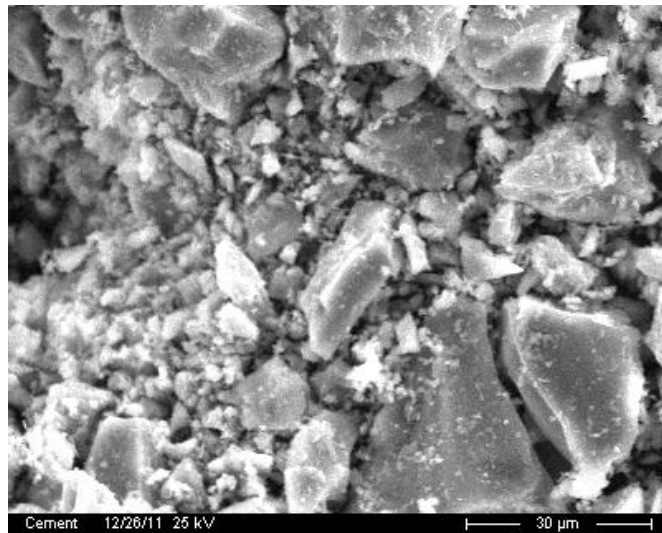


Рисунок 2.3.1 – Микроструктура порошка портландцемента.

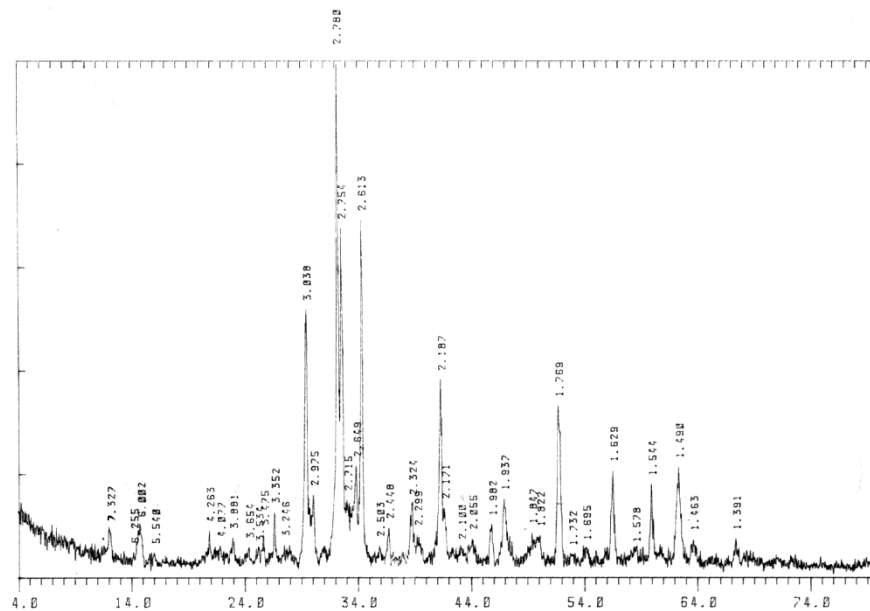


Рисунок 2.3.2 – Рентгенограмма портландцемента.

Была также определена удельная поверхность цемента на аппарате Блейна, фирма Controls (Италия). Она составила $315 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Модификатор структуры МБ

В работе применялся модификатор типа МБ. В его состав (в числе других компонентов) входят суперпластификатор С-3, метакаолин, микрокремнезём, гипс.

Метакаолин (в научных работах российских ученых встречается его название как метакаолинит) используется в цементных системах, методы его

получения известны [138-149]. Микрокремнезём как минеральный модификатор также широко исследован [150-158]. Модификаторы типа МБ объединяют метакраолин и микрокремнезём - выпускаются по ГОСТ [159].

Метакраолин образуется при обжиге в течение полутора часов каолиновой глины $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при температуре около 650 °С. Получается метакраолин $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ – аморфный алюмосиликат. Средняя плотность - 2500 кг/м³. Химический состав метакраолина приводится в таблице 2.3.3.

Таблица 2.3.3 – Химический состав метакраолина

Оксид	Содержание, %	Оксид	Содержание, %
SiO_2	64,6	Na_2O	0,08
Al_2O_3	33,1	K_2O	0,32
Fe_2O_3	1,22	п.п.п	остальное

Микроструктурный анализ метакраолина представлен на рисунке 2.3.3.

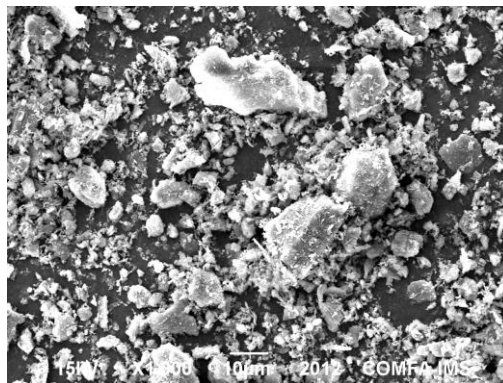


Рисунок 2.3.3 – Микроструктура метакраолина. x1000.

Рентгенофазовый анализ метакраолина приведен на рисунке 2.3.4. В исследованиях авторов работ [147-149] была доказана высокая пуццоланическая активность метакраолина в цементном неавтоклавном газобетоне.

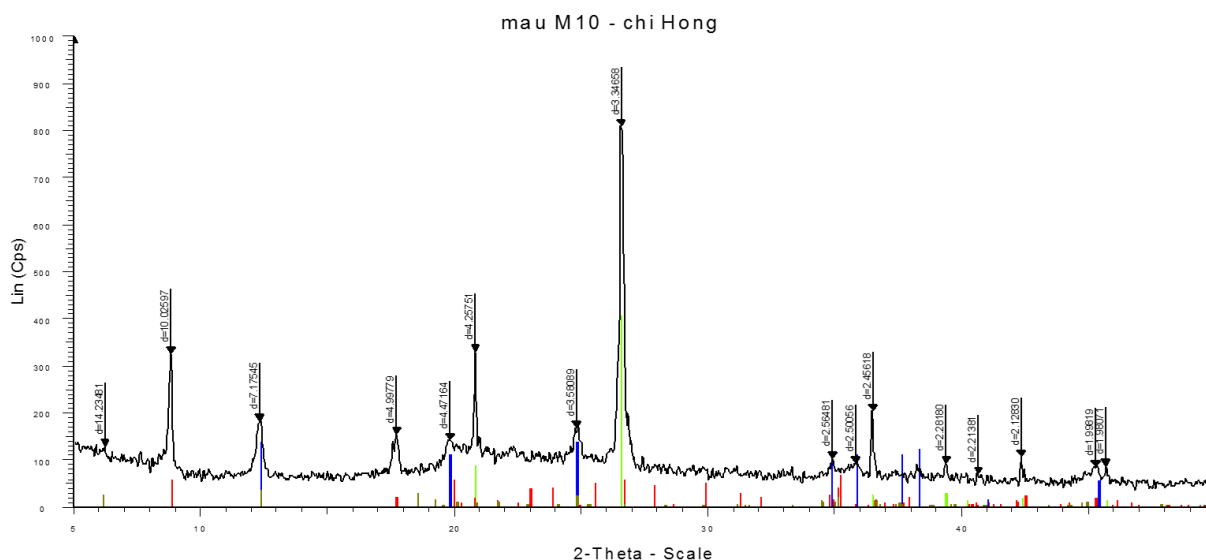


Рисунок 2.3.4 – Рентгенограмма метакаолина.

Микрокремнезём

Микрокремнезём является эффективной минеральной добавкой для бетонов высокой прочности [150-158]. Характеризуется высокой химической активностью в водной среде.

Микрокремнезем является побочным продуктом чёрной металлургии при производстве ферросилиция. При восстановлении углеродом кварца высокой чистоты в электропечах при выплавке кремниевых сплавов часть монооксида кремния SiO переходит в газообразное состояние, а затем доокисляется с последующей конденсацией. При охлаждении образуются ультрадисперсные частицы сферической формы с высоким содержанием аморфного кремнезёма (таблица 2.3.4). Частицы микрокремнезема имеют размеры от 0,01 до 2 мкм. микрокремнезём (МК) - является ультрадисперсным порошком, состоящим из частиц сферической формы размером 0,01 до 2 мкм с дисперсностью 20000 м²/кг. При производстве 1 тонны ферросилиция образуется около 0,3 тонны микрокремнезёма. Микроструктурный анализ микрокремнезёма дан на рисунке 2.3.5, рентгенофазовый – на рисунке 2.3.6, химический - в таблице 2.3.4.

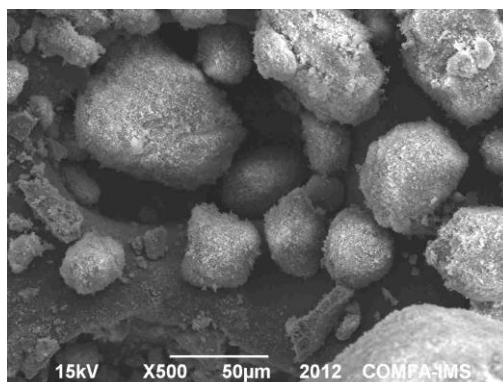


Рисунок 2.3.5 – Микроструктура микрокремнезёма. х 500;

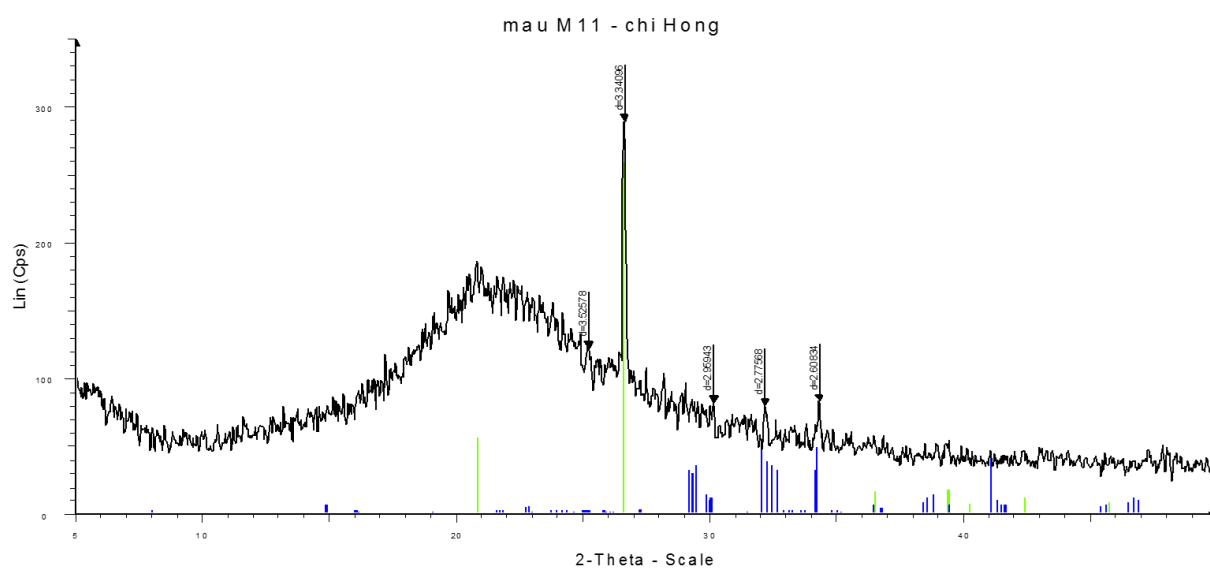


Рисунок 2.3.6 – Рентгенограмма микрокремнезёма.

Таблица 2.3.4 - Химический состав микрокремнезёма

Оксид	Содержание, %	Оксид	Содержание, %
SiO ₂	94,5	SO ₃	0,14
Al ₂ O ₃	0,67	Na ₂ O	0,92
Fe ₂ O ₃	1,73	K ₂ O	0,78
MgO	0,01	п.п.п	остальное

В составе микрокремнезема отмечается высокое содержание SiO₂ - более 94 % и 1,7 % оксидов калия и натрия.

На современном этапе наиболее эффективными являются органо-минеральные модификаторы МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей, выпускаемые по ГОСТ Р 56178-2014 [159]. До 2014 г. производился модификатор структуры бетона под названием ЭМБЭЛИТ по

ТУ 5870-176-46854090-04. МБ и ЭМБЭЛИТ представляют собой порошки серого цвета. МБ применяется в составах цементных систем как комплексная органо-минеральная добавка, обладает полифункциональным действием.

Органо-минеральные модификаторы типа МБ и ЭМБЭЛИТ рекомендуются к применению в составах тяжелых, мелкозернистых, лёгких и ячеистых бетонов, в строительных растворах и сухих смесях, в высокопрочных (с классами по прочности от В55 до В100 и выше), напрягающих и бетонах с компенсированной усадкой, а также для обеспечения высоких технологических требований для бетонных и растворных смесей. Для применения МБ в производстве бетонов не требуется специального оборудования. Оно может осуществляться на действующих бетоносмесительных узлах.

Модификаторы типа МБ могут применяться в гражданском, промышленном, транспортном, подземном и гидротехническом строительстве в составах бетонов с высокими марками по водонепроницаемости (W12 и выше), высокой коррозионной стойкости к видам коррозии Б, В, Д по ГОСТ 31384-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.

Минеральная составляющая модификатора МБ включает метакаолин, гипс, микрокремнезем, золу-уноса. В частности, в ее состав входит:

- микрокремнезём (МК) - является ультрадисперсным порошком, состоящим из частиц сферической формы размером 0,01 до 2 мкм с дисперсностью не менее 12000 м²/кг. Состоит из аморфного SiO₂.

- зола-уноса (ЗУ) представляет собой дисперсным порошок с удельной поверхностью не менее 150 м²/кг. Она оседает на фильтрах очистки газов, образующихся при сжигании топлива на ТЭС и ТЭЦ (теплоэлектростанциях, теплоэлектроцентралях соответственно).

- метакаолин (МКЛН) Al₂O₃·2SiO₂ - дисперсный порошок с удельной поверхностью не менее 1200 м²/кг, содержащий аморфный оксид алюминия и оксид кремния, получаемый после помола каолиновой глины -

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и специальной термической обработки при температуре около 650 °С.

- молотый природный гипс должен соответствовать ГОСТ 4013-82 [161] и содержать минерал $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в количестве не менее 80 %. Микрокремнезём выпускается по ТУ 5743-048-02495332-2014. Зола-уноса должна соответствовать ГОСТ 25818-91 [162], а содержание SiO_2 должно быть не менее 50 %. В экологическом аспекте сырьевые компоненты модификатора должны иметь удельную эффективную активность естественных радионуклидов ≤ 370 Бк/кг.

Органическая составляющая МБ чаще всего представлена суперпластификатором С-3.

Авторы [159] означили, что основной эффект от Разработчики ГОСТ Р 56178-2014 применения модификатора в составе цементных систем проявляется в достижении высокой прочности и компенсации усадки, повышении водонепроницаемости, долговечности и др.

Оптимальное количество модификатора в составе бетонной смеси, по [150-159], - 8...15 % массы цемента. Содержание МБ в бетоне может изменяться по техническим, технологическим и экономическим причинам.

В зависимости от количества минеральной составляющей и суперпластификатора С-3, например, модификатор бетона ЭМБЭЛИТ по ТУ 5870-176-46854090-04 делился на марки:

- Эмбэлит 4-50; Эмбэлит 6-50; Эмбэлит 8-50; Эмбэлит 10-50.
- Эмбэлит 4-75; Эмбэлит 6-75; Эмбэлит 8-75; Эмбэлит 10-75.
- Эмбэлит 4-100; Эмбэлит 6-100; Эмбэлит 8-100; Эмбэлит 10-100.

Первый цифровой индекс после слова Эмбэлит показывает количество суперпластификатора в массе модификатора, в %. Второй – количество расширяющихся компонентов в составе минеральной составляющей Эмбэлита, в % (по ТУ 5870-176-46854090-04). К компонентам, которые расширяются в процессе гидратации, относятся метакраолин и природный гипс.

По ГОСТ Р 56178-2014 органо-минеральные модификаторы типа МБ [159] по свойствам подразделяют на два класса: класс А и класс Б.

Модификаторы класса А оказывают значимое влияние на технологические свойства смесей, повышают прочность и водонепроницаемость цементных материалов. По вещественному составу минеральной части их подразделяют на три вида (таблица 2.3.5).

Таблица 2.3.5 – Класс А: виды по вещественному составу минеральной части

Минеральный компонент	Виды модификатора по вещественному составу минеральной части и количество компонентов, %		
	I	II	III
Микрокремнезём	70...100	40...69	10...39
Зола-уноса	0...30	31...60	61...90

Модификаторы класса Б также позволяют изменять технологические свойства смесей, повышают прочность и водонепроницаемость, но при этом способствуют получению напрягающих, расширяющихся или компенсируют усадку бетонов и растворов. По вещественному составу минеральной части (расширяющегося компонента) подразделяются на два вида (таблица 2.3.6).

Таблица 2.3.6 – Класс Б: Виды по вещественному составу минеральной части (расширяющегося компонента)

Виды модификатора	Вещественный состав минеральной части и количество компонентов, %	
	Расширяющийся компонент (метакаолин + гипс)	Микрокремнезём
I	100	-
II	75...80	20...25

Для модификаторов класса А и класса Б в зависимости от эффективности органической части по редуцированию затворителя модификаторы делятся на четыре группы: 1, 2, 3, 4. Наиболее значимое снижение воды затворения - группа 1, самое низкое – группа 2.

ГОСТ Р 56178-2014 [159] регламентирует маркировку органо-минеральных модификаторов типа МБ. Марка модификатора должна иметь

фирменное название, обозначение класса (А или Б), вида по таблицам 2.3.5 и 2.3.6, группы и обозначения ГОСТ Р 56178-2014 [159]. В настоящей работе использован: модификатор бетона МБ Б-II-2 ГОСТ Р 56178-2014, пенообразователь ПБ 2000.

Химический состав модификатора бетона МБ Б-II-2 приведён в таблице 2.3.7.

Таблица 2.3.7 – Химический состав модификатора бетона МБ Б-II-2

Оксид	Содержание оксидов, %	Оксид	Содержание оксидов, %
CaO	19,8-19,9	Fe ₂ O ₃	0,84-0,92
SiO ₂	29,1-30,3	Na ₂ O	0,1-0,12
Al ₂ O ₃	25,1-25,6	K ₂ O	0,07-0,08
SO ₃	23,3-23,5	п.п.п	остальное

В состав модификатора бетона МБ Б-II-2 дополнительно входит суперпластификатор С-3. Однако, он имеет органическую природу, а его радикалы SO₃Na¹⁻ учтены в содержании оксидов натрия и серы. Удельная поверхность модификатора бетона МБ Б-II-2, определённая на аппарате Блейна, составила 1500 м²/кг.

Пенообразователь для пенобетона ПБ-2000

Пенообразователь ПБ-2000 выпускается ОАО «Ивхимпром» и используется при приготовлении пенобетона различных марок. При температурах (20-25) °С представляет собой однородную прозрачную жидкость светло-коричневого цвета; имеет плотность 1100 кг/м³; водородный показатель Ph=8,7; кратность пены рабочего раствора с объёмной долей пенообразователя 4 %, более 7,0; устойчивость пены (С), более 360.

По токсичности пенообразователь ПБ-2000 относится к малоопасным веществам. Поставляется в стальных бочках ёмкостью 200 литров, а также в автомобильных или железнодорожных цистернах. Гарантийный срок хранения - 1 год.

Тонкодисперсный доменный шлак

Применялся тонкодисперсный доменный шлак Новолипецкого металлургического комбината - ОАО «НЛМК» (г. Липецк). Химический состав тонкодисперсного доменного шлака представлен в таблице 2.3.8. Модуль основности $M_{осн.}$ изменяется от 1,07 до 1,08, а его истинная плотность - 2,9-2,93 г/см³.

Таблица 2.3.8 – Химический состав доменного шлака ОАО «НЛМК»

Оксид	Содержание оксидов, %	Оксид	Содержание оксидов, %
CaO	40,6- 41,8	MnO	0,6-0,62
SiO ₂	40,1-40,3	MgO	8,4-9,5
Al ₂ O ₃	7,3-7,8	Na ₂ O	0,19-0,21
TiO ₂	0,4-0,45	K ₂ O	0,1-0,12
Fe ₂ O ₃	0,4-0,6	п.п.п	остальное

На аппарате Блейна определена удельная поверхность тонкодисперсного доменного шлака ОАО «НЛМК», которая составила 455 - 465 м²/кг или 4550 - 4650 см²/г, что на 140 -150 м²/кг превышает дисперсность портландцемента.

Ускоритель твердения «АС»

Ускоритель твердения «АС» представляет собой неорганическую соль высоковалентного металла, обеспечивающего низкое его содержание в соответствии с законом Шульце-Гарди и теорией Дерягина – Фервея – Овербека.

3. РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ СОСТАВА ПЕНОБЕТОНА

3.1. Физико-химические методы модифицирования пенобетона

Для повышения качества пенобетона требуется применение пенообразователей большой кратности и высоким коэффициентом использования пены. Значимый вклад в означенные параметры пенообразователя вносит применение несколько компонентных модификаторов. Выбор составляющих для их состава должен осуществляться так, чтобы комплексный модификатор обеспечивал пролонгированное действие и эффект синергизма в формировании прочности, деформативности, морозостойкости, коррозиостойкости и др. его свойств. Указанные параметры могут быть обеспечены при условии создания тонкодисперсной ячеистой структуры пенобетона с порами размерами 0,1-0,5 мм. Важным фактором является также получение плотной и высокопрочной матрицы с применением компонентов аморфного строения. Такие структуры можно получить за счёт использования тонкодисперсного доменного шлака с оптимальными параметрами [132], микрокремнезема, метакаолина и др. модификаторов, повышающие теплофизические показатели. В частности, тонкомолотый доменный шлак с оптимальной дисперсностью и удельной поверхностью на 140-150 м²/кг больше, чем портландцемент. При использовании шлака означенной дисперсности в количестве 30-40 % в составе пенобетона наблюдается уменьшение объёма межчастичных пустот многокомпонентной системы на 3-5 абс.%. Прочность пенобетона при этом повышается на 25-40 %. Коэффициент теплопроводности матрицы уменьшается на 13...15 %. Частицы тонкодисперсного шлака, в основном распределяются в межчастичных пустотах портландцемента [132].

Получение высококачественного пенобетона возможно за счёт применения эффективных пенообразователей и приёмов в технологии, стабилизирующих качество пены. Это обеспечивает высокую устойчивость пены и пенобетонной смеси. Для устойчивости пены необходимо, чтобы плёнка в пене была не только упругой, но и имела высокую поверхностную вязкость. Это уменьшит скорость стекания плёнки на границу Плато [133]. Поэтому, в пенобетоне необходимы стабилизаторы - высокодисперсные минеральные компоненты, которые будут препятствовать стеканию жидкости с поверхности плёнки [132]. А дисперсность стабилизаторов пены минерального типа должна быть по максимуму высокой. Это придаст пене в пенобетонной смеси состояние, соответствующее псевдотвердому. При капиллярном потенциале больше упругости плёнки поверхность жидкости пузырька будет идти вверх по капилляру. Это повысит упругость и устойчивость плёнки и будет препятствовать стеканию жидкости на границу Плато. Поэтому, тонкодисперсный микрокремнезём с пустотностью 60...72 % и высоким капиллярным потенциалом есть один из наиболее эффективных стабилизаторов пены в пенобетонной смеси. Более того, взаимодействие микрокремнезема с гидроксидом кальция снизит рН жидкой фазы, существенно уменьшая возможность карбонизации и величину карбонизационной усадки материала.

Стекание жидкой фазы плёнки на границу Плато приведёт к суммарному снижению прочности из-за образования в смеси микрообъёмов пониженной прочности с увеличенным В/Ц. Такие участки являются центрами разрушения. Надо также учитывать, что многие пенообразователи замедляют твердение цементных систем с уменьшением их прочности.

Кратность пены и коэффициент использования (КИП) - основные её показатели. Они влияют на свойства пенобетона. Максимальная кратность пены в высококачественном пенобетоне обеспечивает минимум пенообразователя в смеси. Поэтому двухстадийная технология приготовления пенобетона является наиболее эффективной, что снизит

количество воды, пенообразователя и улучшает СТС пенобетона. Значение $K_{ИП}$ рекомендуется при проектировании состава пенобетона принимать, $K_{ИП} = 0,8$ [134]. Однако, его фактическое значение составляет $0,55...0,78$. Низкие значения $K_{ИП}$ приводит к снижению схватывания, твердения и прочности пенобетона, ухудшает деформативные свойства. Поэтому выбор эффективных пенообразователей, стабилизаторов пены, структурообразующих компонентов, существенно повышает качество пенобетона.

Снижение усадки пенобетона может быть достигнуто за счёт метаксаолина и гипса или его модификаций с микрокремнеземом, суперпластификатором и гипса в модификаторах МБ. Ранее применялись модификаторы группы «Эмбэлит», выпускаемого по ТУ 5870-176-46854090-04. Эффект действия этих модификаторов основан на образовании эттрингита, компенсирующего в различной степени химическую усадку при гидратации минералов клинкера.

Метаксаолин имеет удельную поверхность $1500 \text{ м}^2/\text{кг}$, которая больше дисперсности цемента почти в 5 раз. При использовании в количестве 15 - 20 % массы многокомпонентного цемента дополнительно уменьшает объём пустот между частицами на 3...4 %. Объём таких пустот портландцемента в уплотнённом состоянии составляет 55...60 %, многокомпонентного цемента – 52...55 %. Это больше объёма пустот простой кубической упаковки, равной 48 %. Для такой упаковки размер последующей частицы, заполняющей межчастичную пустоту составляет 0,41 от диаметра предыдущей частицы, т.е., по данным [135,136,137], должен быть больше его в 2,44 раза. Поэтому в каждой межчастичной пустоте распределяется одна или две частицы метаксаолина со средним размером 3...5 мкм. О положительном влиянии метаксаолина на цементные системы, в том числе и на связывание гидроксида кальция, имеется достаточно много работ [138-149].

Третий уровень оптимизации дисперсного состава пенобетона обеспечивается применением микрокремнезема с дисперсностью до 20100

м²/кг и более [150]. Его оптимальное содержание в цементных системах без использования суперпластификатора составляет 5 - 6 %. При увеличении содержания микрокремнезема их водопотребность значительно увеличивается [151-158]. Это связано с высокой дисперсностью и распределением его частиц в цементной матрице. Соотношение дисперсности микрокремнезёма и портландцемента приблизительно в 2 раза больше отношения дисперсности портландцемента к удельной поверхности мелкого заполнителя. Очевидно, что частицы микрокремнезёма при содержании 5 - 6 % за счет адсорбционных и электростатических сил обволакивают частицы портландцемента и тонкодисперсного шлака в виде монослоя. Они также распределяются в межчастичных пустотах метакаолина, создавая плотную ультрамикроструктуру или наноструктуру матрицы, стабилизируя пенобетонную смесь. Увеличение числа слоев микрокремнезёма с пустотностью 70 % требует существенного увеличения водосодержания. Поскольку, при этом происходит максимальное заполнение пустот жидкостью за счёт действия значительных капиллярных сил. Таким образом, при использовании микрокремнезёма на ультрамикроруровне проявляется аналогия с законом постоянства водопотребности бетонной смеси.

Очевидно, что системы с распределением частиц различной дисперсности обеспечит высокую реакционную способность матрицы, в том числе по протеканию пуццолановой реакции. Негативным фактором для максимального использования потенциальной энергии такой системы может быть относительно повышенная водопотребность, что компенсируется применением эффективных пластификаторов. Ввиду наличия в матрице значительного количества алюминатной фазы, высокодисперсных компонентов и действия значительных адсорбционных сил содержание пластификатора может быть увеличено для снижения воды и повышения прочности матрицы. А большая связность цементной системы повышает КИП, прочность пенобетона и ускоряет скорость твердения.

Кроме пластификаторов применяются ускорители схватывания и твердения пенобетонной смеси, пенобетона: хлористый натрий, хлористый кальций, сульфат натрия и др. Но они имеют негативные явления: высолы, коррозия арматуры, замедление темпа твердения в поздние сроки и др., что сдерживает их применение. Особенно это важно для системы, состоящей из частиц с различными энергетическими уровнями и электрическими зарядами. Известно, что при использовании ускорителей твердения минералы многокомпонентной цементной системы и новообразования адсорбируют на поверхности противоположно заряженные ионы из раствора. При этом, образуется штерновский и диффузный слои в соответствии с теорией Гуи-Чепмена [160].

Противоионы, связанные с частицей в штерновском слое за счёт поверхностных сил увеличивают растворимость поверхности, ускоряют гидратацию минералов клинкера и твердение цементной системы. Скорость гидратации C_3S в этом случае может быть соизмерима со скоростью гидратации C_3A . В межчастичном пространстве будут одновременно образовываться гидросиликатная фаза и армирующие ее игольчатые гидросульфоалюминаты кальция. Это значительно повышает прочность цементной системы за счёт ее уплотнения, ускорения твердения. При этом, например, химический состав ускорителя твердения «АС» обеспечивает образование и однородное распределение в структуре цементного камня компонентов расширяющего типа, уплотняющих её и препятствующих протеканию диффузионных процессов в матрице.

Толщина диффузного слоя определяет скорость снижения потенциала при удалении от поверхности, а также уменьшения с увеличением концентрации электролита и валентности ионов. Толщина диффузного слоя отвечает, видимо, за сроки схватывания системы, т.к. минералы клинкера и новообразования имеют разные заряды. Так, C_3S , C_2S , микрокремнезём и гидросиликаты заряжены отрицательно за счёт кремнийкислородных ионов.

В свою очередь, C_3A , C_4AF , $Ca(OH)_2$, гидроалюминаты, этtringит, гидроферриты, полуводный и двухводный гипс - заряжены положительно.

Таким образом, при использовании ускорителей твердения в цементных системах штерновский слой отвечает за скорость гидратации минералов клинкера и твердения цементной системы, а диффузный слой за сроки ее схватывания. Очевидно, что оптимальное содержание ускорителя твердения для обеспечения высокой начальной и поздней прочности цементной системы должно быть, ниже критической концентрации коагуляции по теории Дерягина – Фервея – Овербека и определяется в соответствии с формулой 3.1.1 [17,111, 132,135,137]:

$$C_k = A \frac{\varepsilon^3 (RT)^5}{k^2 F^6 z^6} \quad (3.1.1)$$

где:

A - числовой коэффициент;

F – число Фарадея;

$k = 8\pi DR$ - константа;

D – коэффициент диффузии частиц;

R – расстояние между центрами двух взаимодействующих частиц;

z – валентность иона.

Комплексное использование ускорителей твердения с платифицирующими модификаторами дают высокую эффективность. Из-за повышения связности смеси допускается увеличение количества пластификатора на 25...40 %. Это снижает содержание воды на 5...8 % и повышает прочность цементной системы. При этом, оптимальное содержание ускорителя твердения должно обеспечить штерновский и частично диффузный слои. При большем расходе пластифицирующей добавки толщина диффузного слоя за счёт повышенного содержания ускорителя твердения может увеличиваться на 0,2...0,3 %. Это требуется для предотвращения нарушения однородности или даже расслоения смеси.

3.2. Влияние ускорителя твердения АС на свойства цементного теста

При подборе состава ускоритель твердения «АС» вводился в портландцемент Цем 1 42,5 Н (ПЦ-500-Д0) Староскольского завода в количестве 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1; 2; 3 %. Означенные исследования выполнены для определения его влияния на нормальную плотность цементного теста (НГЦТ) и сроки схватывания.

Установлено, что расход ускорителя твердения «АС» в количестве от 0,05 до 0,08 % массы цемента не оказывает влияния на НГЦТ(24,75 %). При повышении содержания АС до 0,5 % НГЦТ увеличивается на 1,25 %, а при 1- 3 % означенное превышение составляет уже от 2,25 до 3,5 %(таблица 3.2.1, рисунок 3.2.1).

Таблица 3.2.1 - Расход ускорителя и свойства цементного теста

№	Содержание ускорителя твердения АС, %	НГЦТ, %	Сроки схватывания, ч-мин	
			начало	конец
1	0	24,75	4-00	8-30
2	0,05	24,75	3-50	8-10
3	0,06	24,75	3-50	8-05
4	0,07	24,75	3-40	8-00
5	0,08	24,75	3-40	8-00
6	0,09	25,0	3-30	7-50
7	0,1	25,25	3-20	6-30
8	0,15	25,40	2-50	6-00
9	0,2	25,55	2-30	5-20
10	0,3	25,75	1-50	5-10
11	0,5	26,0	1-10	4-30
12	0,75	26,25	1-00	3-00
13	1,0	27,0	0-50	2-10
14	1,5	27,5	0-30	1-50
15	2,0	28,0	0-20	0-45
16	3,0	28,25	0-15	0-25

Было установлено, что суперпластификатор (СП) С-3 при расходе 0,7 % снижает нормальную плотность цементного теста на 26,9 абс.% (состав 2, таблица 3.2.1, рисунок 3.2.1), а СП «Алпласт» при расходе 0,4 % - на 16,2 абс.% (состав 11).

«Алпласт» выпускается НПЦ Технопласт» и по водоредуцирующим свойствам относится к суперпластификаторам. В её основе используется модифицированные лигносульфонаты. Суперпластификатор «Алпласт» не даёт дополнительного воздухововлечения, его дозировка - 0,2-0,4 %, а водоредуцирующая способность – 15-20 %, снижает пористость бетона.

При комплексном использовании ускорителя твердения АС с суперпластификатором С-3 и содержании ускорителя в количестве от 0,05 до 0,07 % массы цемента НГЦТ увеличивается на 0,1-0,15 % (составы 3, 4, 5, таблица 3.2.2), а при расходе от 0,1 до 3 % повышается на 0,25-1 % (составы 6, 7, 8, 9, 10, таблица 3.2.2). Сравнение выполнено с составом 2.

Таблица 3.2.2 - Свойства цементного теста с ускорителем и СП

№	Содержание ускорителя твердения АС, %	Пластификатор		НГЦТ, %	Сроки схватывания, ч-мин	
		СП	Содержание СП, %		начало	конец
1	-	-	-	24,75	4-00	8-30
2	-	С-3	0,7	19,5	3-20	7-15
3	0,05	С-3	0,7	19,7	3-10	7-05
4	0,06	С-3	0,7	19,8	3-10	7-00
5	0,07	С-3	0,7	19,8	3-00	6-50
6	0,1	С-3	0,7	20,0	2-40	6-20
7	0,3	С-3	0,7	20,25	1-20	4-20
8	1,0	С-3	0,7	20,80	0-40	1-40
9	2,0	С-3	0,7	21,2	0-15	0-25
10	3,0	С-3	0,7	21,5	0-10	0-20
11	-	Алпласт	0,4	21,3	4-10	8-50
12	0,05	Алплас	0,4	21,5	3-40	8-30
13	0,06	Алпласт	0,4	21,5	3-30	7-40
14	0,07	Алплас	0,4	21,7	3-20	7-00
15	0,1	Алпласт	0,4	21,9	2-50	6-40
16	0,3	Алплас	0,4	22,05	1-40	4-50
17	1,0	Алплас	0,4	22,4	1-10	2-20
18	2,0	Алпласт	0,4	22,8	0-25	0-40
19	3,0	Алплас	0,4	23,0	0-15	0-25

При совместном использовании ускорителя твердения АС и суперпластификатора «Алпласт» и содержании ускорителя в количестве от 0,05 до 0,1 % массы цемента НГЦТ увеличивается на 0,09-0,28 % (составы 12, 13, 14, 15, таблица 3.2.2), при расходе от 0,3 до 3 % повышается на 0,35-

0,8 % % (составы 16, 17, 18, 19, таблица 3.2.2). Сравнение выполнено с составом 11.

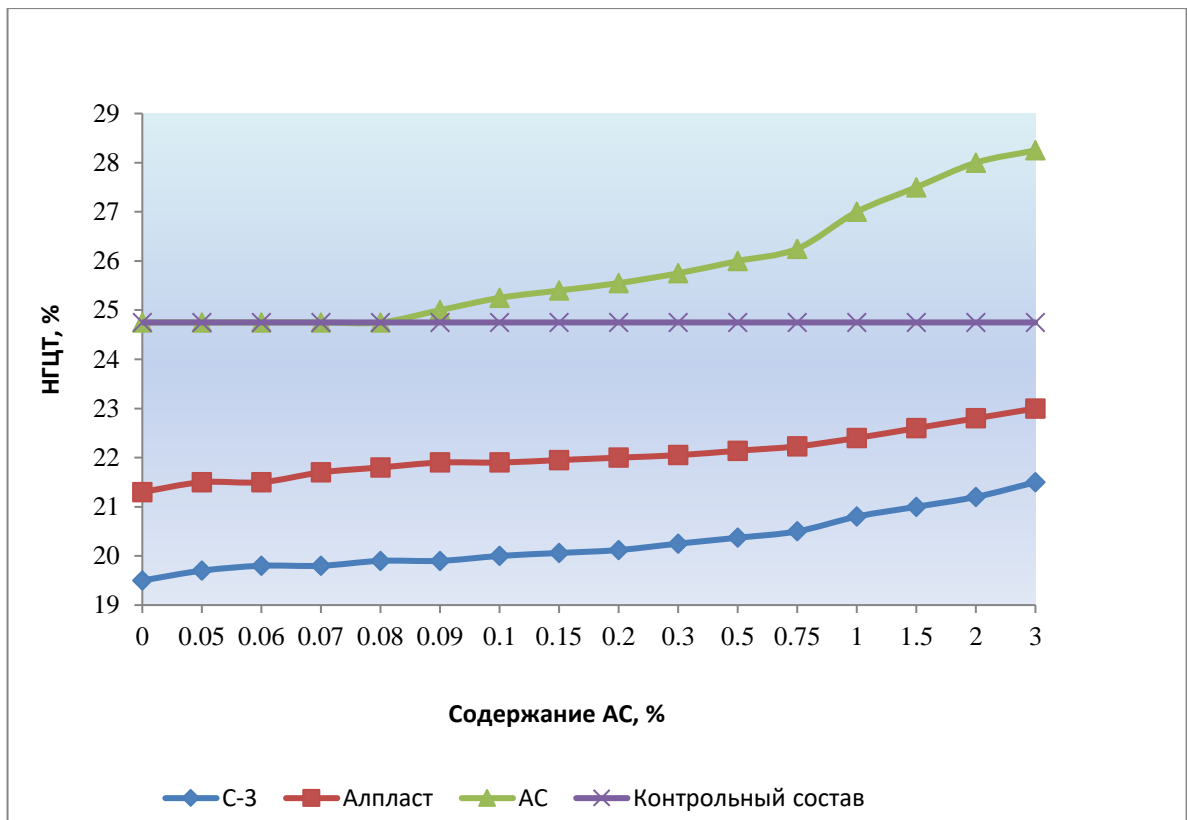


Рисунок 3.2.1 – Зависимость НГЦТ от содержания ускорителя АС.

Сроки схватывания цементного теста не изменяются при содержании ускорителя твердения АС до 0,07 % массы цемента. Однако, при повышении количества АС более 0,3 % происходит весьма значимое (от 2,5 до 16-20 раз) сокращение сроков схватывания цементного теста.

Таким образом, рациональное содержание ускорителя твердения «АС» по его влиянию на реологические показатели цементного теста (сроки начала и конца схватывания, нормальную густоту) находится в пределах 0,05-0,1 % массы портландцемента Цем 1 42,5 Н (ПЦ-500-Д0) Староскольского завода.

Это положение подтверждено при проведении дальнейших экспериментальных исследований с использованием бетонной смеси (см. раздел 3.3 и таблицу 3.3.1).

1	385	225	-	-	0,58	27	$\frac{21,9}{52}$	$\frac{31,3}{74,2}$	$\frac{16,4}{38}$	$\frac{23,4}{54}$	$\frac{32,5}{75}$
2	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	-	0,46	28	$\frac{29,8}{71}$	$\frac{42,2}{100}$	$\frac{20,3}{47}$	$\frac{35,1}{81}$	$\frac{43,1}{100}$
3	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,192}{0,05}$	0,46	28	$\frac{32,1}{76}$	$\frac{44,6}{106}$	$\frac{24,8}{51}$	$\frac{41,4}{96}$	$\frac{48,3}{112}$
4	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,46	28	$\frac{39,7}{94}$	$\frac{51,2}{121}$	$\frac{31,4}{73}$	$\frac{48,4}{112}$	$\frac{56,2}{130}$
5	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,346}{0,09}$	0,46	27	$\frac{39,2}{93}$	$\frac{50,1}{119}$	$\frac{30,3}{70}$	$\frac{47,8}{110}$	$\frac{55,6}{129}$
6	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,385}{0,1}$	0,46	27	$\frac{37,3}{88}$	$\frac{48,8}{116}$	$\frac{29,4}{68}$	$\frac{45,4}{105}$	$\frac{53,1}{123}$
7	385	181	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{1,155}{0,03}$	0,47	27	$\frac{36,8}{87}$	$\frac{46,4}{110}$	$\frac{28,2}{65}$	$\frac{44,1}{102}$	$\frac{51,7}{120}$
8	385	183	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{1,925}{0,5}$	0,475	28	$\frac{34,3}{81}$	$\frac{45,8}{108}$	$\frac{27,6}{64}$	$\frac{42,2}{98}$	$\frac{49,2}{114}$
9	385	185	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{3,85}{1,0}$	0,48	28	$\frac{33,1}{78}$	$\frac{43,9}{104}$	$\frac{26,1}{60}$	$\frac{40,6}{94}$	$\frac{47,6}{110}$
10	385	188	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{7,7}{2,0}$	0,49	27	$\frac{32,0}{76}$	$\frac{42,8}{101}$	$\frac{25,3}{59}$	$\frac{38,1}{88}$	$\frac{45,9}{106}$
11	385	192	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{11,55}{3,0}$	0,5	28	$\frac{30,1}{70}$	$\frac{41,9}{92,3}$	$\frac{25,1}{58}$	$\frac{37,3}{86}$	$\frac{43,3}{100}$

При расходе С-3=0,9 % рациональное содержание ускорителя твердения АС также находится в пределах 0,07 - 0,09 % массы цемента. При этом, В/Ц снижается на 28-34 % (относительно состава 1), прочность бетона повышается на 42-43% после твердения в условиях ТВО в возрасте 28 суток и на 41-44 % - при твердении в НУ (таблица 3.3.2).

Более значимое повышение прочности бетона наблюдается при увеличении содержания суперпластификатора С-3 с

Таблица 3.3.2 - Расход ускорителя и прочность бетона (С-3=0,9 %)

№	Показатели бетонной смеси					Прочность бетона, МПа/%					
	Состав, $\frac{кг}{м^3}$ %				В/Ц	РК, см	после ТВО в возрасте, сут.		после твердения в НУ в возрасте, сут.		
	Ц	В	С-3	АС			1	28	3	7	28
2	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	-	0,46	28	$\frac{29,8}{71}$	$\frac{42,2}{100}$	$\frac{20,3}{47}$	$\frac{35,1}{81}$	$\frac{43,1}{100}$

12	385	164	$\frac{3,46}{0,9}$	-	0,43	28	$\frac{30,9}{74}$	$\frac{43,4}{103}$	$\frac{22,6}{50}$	$\frac{37,4}{85}$	$\frac{45,6}{103}$
13	385	164	$\frac{3,46}{0,9}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,43	28	$\frac{49,2}{113}$	$\frac{62,3}{143}$	$\frac{37,9}{83,1}$	$\frac{55,4}{121}$	$\frac{65,6}{144}$
14	385	164	$\frac{3,46}{0,9}$	$\frac{0,346}{0,09}$	0,43	27	$\frac{47,8}{110}$	$\frac{61,6}{142}$	$\frac{36,2}{79}$	$\frac{54,1}{119}$	$\frac{64,1}{141}$
15	385	164	$\frac{3,46}{0,9}$	$\frac{0,385}{0,1}$	0,43	28	$\frac{46,3}{107}$	$\frac{60,1}{138}$	$\frac{34,1}{75}$	$\frac{52,3}{115}$	$\frac{62,1}{136}$
16	385	170	$\frac{3,46}{0,9}$	$\frac{1,155}{0,3}$	0,44	28	$\frac{44,1}{102}$	$\frac{57,9}{133}$	$\frac{32,4}{71}$	$\frac{50,8}{111}$	$\frac{61,3}{134}$
17	385	174	$\frac{3,46}{0,9}$	$\frac{1,925}{0,5}$	0,45	28	$\frac{41,9}{97}$	$\frac{55,1}{127}$	$\frac{30,3}{66}$	$\frac{48,3}{106}$	$\frac{59,9}{131}$

0,6 до 0,9 % массы портландцемента. После ТВО прочность возрастает почти в 2 раза. При твердении 28 суток в НУ – в среднем в полтора раза. Это связано со значимым снижением содержания воды затворения в бетонной смеси, а также повышением вязкости цементной системы благодаря применению ускорителя твердения АС, при сохранении принятой подвижности исследуемой смеси с РК = 27-28 см.

Введение в бетонную смесь рационального количества ускорителя твердения (в пределах 0,07 - 0,09 % массы цемента) и суперпластификатора С-3 позволяет значительно повысить прочность бетона. Необходимо отметить, что в возрасте 3 суток при твердении в НУ прочность бетона находится на уровне:

- при расходе С-3=0,6 %: 70-73 % марочного значения;
- при расходе С-3=0,9 %: 79-83 % марочного значения.

В возрасте 7 суток:

- при расходе С-3=0,6 %: 110-112 % марочного значения;
- при расходе С-3=0,9 %: 119-121 % марочного значения.

Таким образом, введение в бетонную смесь рационального количества ускорителя твердения (от 0,07 до 0,09 % и суперпластификатора С-3 0,9 % массы цемента) позволяет значимо интенсифицировать процесс твердения и темп роста прочности бетона.

Очевидно, что высокая прочность означенных бетонов связана не только с низким значением водоцементного отношения, но и с уменьшением деструктивных процессов, происходящих в цементной системе. К деструктивным процессам, в этом случае, относятся расслоение, седиментация, водоотделение и другие негативные явления, возникающие при укладке и уплотнении бетонной смеси.

3.4. Рациональные параметры тонкодисперсного шлака

В данном разделе исследований в качестве контрольного состава был принят состав № 1 (таблицы 3.4.1 и 3.4.2). Распływ стандартного конуса был принят 27-28 см. Расход тонкодисперсного шлака для бетона, твердеющего в условиях ТВО и в нормальных условиях, был принят от 0 до 60 %. Применялся тонкодисперсный шлак Новолипецкого металлургического комбината.

Для определения рациональных параметров использования тонкодисперсного шлака в бетоне требуется определение не только количества, но и выполнение условия по его дисперсности. В частности, необходимо определение значения оптимальной дисперсности шлака, при которой его частицы однородно распределяются в межчастичных пустотах портландцемента, в соответствии с научными положениями, разработанными Е.Г. Величко [132].

Таблица 3.4.1 - Прочность бетона со шлаком. РК=27-28 см

№	Характеристика бетонной смеси					В/Ц	Предел прочности бетона, МПа/%				
	Содержание компонентов, $\frac{кг}{м^3}$ %						После ТВО в возрасте, сут.		После твердения в НУ в возрасте, сут.		
	Ц	Шлак	В	С-3	АС		1	28	3	7	28
1	$\frac{385}{100}$	—	$\frac{225}{100}$	—	—	0,58	$\frac{21,9}{70}$	$\frac{31,3}{100}$	$\frac{16,4}{50}$	$\frac{23,4}{72}$	$\frac{32,5}{100}$
2	$\frac{308}{80}$	$\frac{77}{20}$	$\frac{218}{97}$	—	—	0,57	$\frac{26,3}{84}$	$\frac{40,4}{129}$	$\frac{17,1}{53}$	$\frac{24,1}{74}$	$\frac{36,6}{113}$
3	$\frac{269,5}{70}$	$\frac{115,5}{30}$	$\frac{214}{95}$	—	—	0,56	$\frac{27,4}{87}$	$\frac{41,2}{132}$	$\frac{19,4}{60}$	$\frac{25,6}{79}$	$\frac{40,8}{125}$
4	$\frac{231}{60}$	$\frac{154}{40}$	$\frac{212}{94}$	—	—	0,55	$\frac{29,3}{94}$	$\frac{45,6}{146}$	$\frac{26,3}{81}$	$\frac{28,8}{89}$	$\frac{44,3}{136}$
5	$\frac{154}{40}$	$\frac{231}{60}$	$\frac{212}{94}$	—	—	0,55	$\frac{23,8}{76}$	$\frac{43,6}{139}$	$\frac{15,8}{49}$	$\frac{22,4}{70}$	$\frac{32,8}{101}$

Исследования показали, что при увеличении содержания шлака от 0 до 60 % водоцементное отношение снизилось с 0,58 до 0,55 или на 5,4 абс.% (таблица 3.4.1). Прочность бетона определялась после ТВО в возрасте 1 и 28 суток и после твердения в НУ в возрасте 3, 7 и 28 суток. Для всех

исследованных случаев прочность бетона со шлаком после ТВО превышала прочность контрольного состава № 1:

- в возрасте 28 суток прочность увеличилась на 29-46 %;
- в возрасте 1 суток прочность повысилась на 8,6 - 33,8 %;
- максимальные значения в возрасте 1 суток составили 87 и 94 % марочной прочности при расходе шлака 30 и 40 % соответственно взамен эквивалентной части портландцемента;

- максимальные абсолютные показатели прочности наблюдаются при расходе шлака 30 и 40 % - 41,2 и 45,6 МПа, а превышение ее относительно прочности контрольного состава составило 32 и 46 % соответственно.

Для бетона, твердеющего в нормальных условиях, его прочность при использовании тонкодисперсного шлака превышала прочность контрольного состава № 1 для всех исследованных составов (таблица 3.4.1):

- в возрасте 28 суток прочность увеличилась на 1-36 %;
- в возрасте 3 суток прочность составила от 49 до 81 % марочной прочности;

- в возрасте 7 суток прочность составила от 70 до 89 % марочной прочности;

- в возрастах 3 и 7 суток твердения кинетика набора прочности у состава 5 (шлака 60 %) снижается относительно контрольным составом 1.

- максимальные значения предела прочности наблюдались расходе шлака 30 и 40 % - 40,8 и 44,3 МПа, а превышение относительно прочности контрольного состава составило 25 и 36 % соответственно (таблица 3.4.1).

При совместном использовании в смеси тонкодисперсного шлака, суперпластификатора С-3 и ускорителя твердения АС были получены результаты, представленные в таблице 3.4.2. Распływ стандартного конуса принят РК=27-28 см. Расход суперпластификатора С-3 для составов с 6 по 11 - 0,6 %, ускорителя твердения АС для составов с 7 по 11 – 0,07 %.

Водоцементное отношение при введении в бетонную смесь с СП С-3 (без шлака) ускорителя твердения АС не изменилось (состав 7). С

увеличением количества шлака от 0 до 60 % В/Ц снизилось с 0,46 до 0,42 или - на 9,5 абс.% (относительно состава 6 с СП С-3). По сравнению с контрольным составом уменьшение В/Ц составило 38 абс.%. Предел прочности бетона определялся после ТВО в возрасте 1 и 28 суток, а также после твердения в НУ в возрасте 3, 7 и 28 суток. Результаты испытаний представлены в таблице 3.4.2.

Таблица 3.4.2 - Прочность бетона со шлаком, С-3 и АС, РК=27-28 см

№	Характеристика бетонной смеси					В/Ц	Предел прочности бетона, МПа/%				
	Содержание компонентов, $\frac{кг / м^3}{\%}$						После ТВО в возрасте, сут.		После твердения в НУ в возрасте, сут.		
	Ц	Шлак	В	С-3	АС		1	28	3	7	28
1	$\frac{385}{100}$	–	$\frac{225}{100}$	–	–	0,58	$\frac{21,9}{70}$	$\frac{31,3}{100}$	$\frac{16,4}{50}$	$\frac{23,4}{72}$	$\frac{32,5}{100}$
6	$\frac{385}{100}$	–	$\frac{176}{78}$	$\frac{2,31}{0,6}$	–	0,46	$\frac{29,8}{95}$	$\frac{42,5}{136}$	$\frac{23,7}{73}$	$\frac{30,5}{94}$	$\frac{43,4}{133}$
7	$\frac{385}{100}$	–	$\frac{176}{78}$	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,46	$\frac{46,3}{142}$	$\frac{60,8}{194}$	$\frac{36,7}{113}$	$\frac{48,2}{148}$	$\frac{63,2}{184}$
8	$\frac{308}{80}$	$\frac{77}{20}$	$\frac{165}{73}$	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,43	$\frac{49,4}{148}$	$\frac{67,7}{216}$	$\frac{40,1}{123}$	$\frac{51,3}{158}$	$\frac{68,3}{210}$
9	$\frac{269,5}{70}$	$\frac{115,5}{30}$	$\frac{162}{72}$	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,42	$\frac{51,3}{164}$	$\frac{75,3}{240}$	$\frac{44,2}{136}$	$\frac{57,6}{177}$	$\frac{73,8}{227}$
10	$\frac{231}{60}$	$\frac{154}{40}$	$\frac{162}{72}$	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,42	$\frac{53,1}{170}$	$\frac{74,5}{238}$	$\frac{43,4}{133}$	$\frac{55,6}{171}$	$\frac{73,2}{225}$
11	$\frac{154}{40}$	$\frac{231}{60}$	$\frac{162}{72}$	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{0,269}{0,07}$	0,42	$\frac{54,3}{173}$	$\frac{75,3}{240}$	$\frac{42,1}{129}$	$\frac{54,3}{167}$	$\frac{72,8}{224}$

После ТВО:

- в возрасте 1 сутки прочность бетона с СП С-3 (состав 6) на 36 % превышает прочность контрольного состава 1 и составляет 95 % марочного значения;

- в возрасте 1 сутки - с СП С-3 и ускорителем твердения АС (состав 7) прочность увеличилась в 2,1 раза относительно контрольного состава 1 и составила 142 % марочного значения;

- в возрасте 1 сутки – с СП С-3, ускорителем твердения АС и шлаком в количестве от 20 до 60 % прочность бетона повысилась на 111-148 %, т.е. в 2-2,5 раза, и составила соответственно от 147 до 173 % марочной прочности;

- в возрасте 1 суток максимальные значения прочности наблюдались при расходе шлака от 30 до 60 %, использованного взамен эквивалентной части портландцемента и составило от 51,3 до 54,3 МПа соответственно;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с СП С-3 для состава 6 в 2 раза превышает прочность контрольного состава 1 и составляет 136 % марочного значения;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с СП С-3 и ускорителем твердения АС для состава 7 увеличилась почти в 2 раза относительно прочности контрольного состава 1 и составила 194 % марочной прочности;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с СП С-3, ускорителем твердения АС и тонкодисперсным шлаком, использованном в количестве от 20 до 60 %, повысилась на 116- 140 % и составила от 216 до 240 % соответственно марочной прочности;

- в возрасте 28 суток максимальные значения прочности (75,3; 74,5; 75,3 МПа) наблюдались при расходе шлака 30; 40, 60%, использованного взамен эквивалентно части портландцемента соответственно.

При совместном использовании тонкодисперсного шлака, ускорителя твердения АС и суперпластификатора С-3 в составе мелкозернистой бетонной смеси и последующем твердении бетона в нормальных условиях была определена его прочность в возрасте 3, 7 и 28 суток. Результаты представлены в таблице 3.4.2:

В качестве контрольного был также принят состав 1 (таблица 3.4.2). За 100 % была принята прочность, определённая испытанием образцов в возрасте 28 суток.

При твердении бетона в нормальных условиях определены следующие показатели:

- в возрасте 28 суток прочность бетона с СП С-3 для состава 6 превышает прочность контрольного состава на 33 % (состав 1) и составляет 43,4 МПа;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с СП С-3 и ускорителем твердения АС для состава 7 превышает прочность контрольного состава на 84 % (состав 1) и составляет 63,2 МПа;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с СП С-3, ускорителем твердения АС и шлаком от 20 до 60 % (составы 8, 9, 10, 11) превышает прочность контрольного состава на 110-127 % и составляет 68,3 - 73,8 МПа

- в возрасте 28 суток максимальные значения прочности (73,8; 73,2; 72,8 МПа) наблюдались при расходе шлака 30; 40, 60 %. использованного взамен эквивалентно части портландцемента соответственно и увеличилась относительно прочности контрольного состава более чем в 2,2 раза;

- в возрасте 3 суток прочность бетона с СП С-3 для состава 6 превышает прочность контрольного состава на 44 % и составляет 73 % марочного значения;

- в возрасте 3 суток прочность бетона с СП С-3 и ускорителем твердения АС для состава 7 увеличилась относительно прочности контрольного состава в 2,2 раза и составляет 113 % марочного значения;

- в возрасте 3 суток прочность бетона с СП С-3, ускорителем твердения АС и тонкодисперсным шлаком (от 20 до 60%) увеличилась относительно прочности контрольного состава в 2,4-2,7 раза и соответственно составляет от 123 до 136 % марочной прочности;

- в возрасте 3 суток максимальные и примерно одинаковые значения прочности (44,2; 43,4; 42,1 МПа) наблюдались при расходе шлака 30, 40, 60 %, использованного взамен эквивалентной части портландцемента соответственно;

- в возрасте 7 суток прочность бетона с СП С-3 для состава 6 превышает прочность контрольного состава на 30 % и составляет 94 % марочного значения;

- в возрасте 7 суток прочность бетона с СП С-3 и ускорителем твердения АС для состава 7 увеличилась более чем в 2 раза относительно контрольного состава 1 и составляет 148 % марочного значения;

- в возрасте 7 суток прочность бетона с СП С-3, ускорителем твердения АС и шлаком (от 20 до 60 %) увеличилась в 2 - 2,4 раза, и соответственно составляет от 158 до 177 % марочной прочности;

- в возрасте 7 суток максимальные значения прочности (57,6; 55,6; 54,3 МПа) наблюдались при расходе шлака 30, 40, 60%, использованного взамен эквивалентной части портландцемента соответственно.

Таким образом, совместное использование тонкодисперсного шлака, ускорителя твердения АС и суперпластификатора С-3 в составе мелкозернистого бетона значительно повышает прочность бетона независимо от условий твердения (НУ, ТВО). Так, в возрасте 1 сут после ТВО прочность бетона увеличивается почти в 2,5 раза, а в возрасте 28 суток – в 2,4 раза относительно контрольного состава. Аналогичные результаты наблюдаются при твердении бетона в НУ: в возрасте 28 суток его прочность увеличивается более чем в 2,2 раза относительно контрольного состава и достигает значений: 73,8; 73,2; 72,8 МПа при расходе шлака 30; 40, 60 % взамен эквивалентной части портландцемента соответственно.

Таким образом, рациональное содержание тонкодисперсного шлака составляет 30 - 60 %, которое возможно использовать в составе бетона взамен эквивалентного количества портландцемента без снижения его прочности. Использование тонкодисперсного шлака является первым уровнем оптимизации рациональных параметров дисперсного состава многокомпонентного вяжущего. Оптимизация обеспечивает уплотнение структуры цементного камня благодаря распределению частиц тонкодисперсных доменного гранулированного в межчастичных пустотах более грубодисперсной фракции. По этой причине создаются наиболее стеснённые условия гидратации цемента: толщина прослоек цементного камня уменьшается, прочность значительно возрастает. Снижение расхода

портландцемента в этом случае составляет от 115 до 231 кг на 1 м³ бетона. Рациональное содержание суперпластификатора С-3 и ускорителя твердения АС при этом составляет 0,6 и 0,07 % массы портландцемента соответственно.

3.5. Рациональные параметры микрокремнезёма и модификатора МБ-Б-II-2

Исследования с комплексным модификатором (КМ) в виде микрокремнезёма марки МБ10-01 и МБ-Б-II-2 в соотношении по массе 1:1 были выполнены с учетом теоретических положений настоящей работы и опытных данных [150,157], а его содержание с учетом означенных факторов варьировалось в интервале от 10 до 30 % массы портландцемента. Расход КМ в составе бетона был принят в количестве 10; 20; 30 % массы портландцемента. Органо-минеральный модификатор МБ-Б-II-2 соответствует требованиям ГОСТ и имеет в составе суперпластификатор С-3[159].

Экспериментальные исследования выполнены с использованием состава мелкозернистого бетона, как и в предыдущем разделе. Удобоукладываемость - РК=27-28 см. Прочность бетона определялась после ТВО в возрасте 1 и 28 суток и после твердения в НУ в возрасте 3, 7 и 28 суток.

В качестве контрольного принят состав № 1 (таблица 3.5.1).

Результаты исследований представлены в таблице 3.5.1.

Таблица 3.5.1 - Прочность бетона с добавками МБ 10-01 и МБ-Б-II-2

№	Характеристики бетонной смеси				Прочность бетона, МПа/%				
	Состав, кг/%			В/Ц	После ТВО в возрасте, сут.:		После твердения в нормальных условиях в возрасте, сут.:		
	Ц	КМ	В		1	28	3	7	28
1	$\frac{385}{100}$	—	$\frac{225}{100}$	0,58	$\frac{21,9}{100}$	$\frac{31,3}{100}$	$\frac{16,4}{50}$	$\frac{23,4}{72}$	$\frac{32,5}{100}$
2	$\frac{346,5}{90}$	$\frac{38,5}{10}$	$\frac{143}{63,5}$	0,37	$\frac{61,7}{197}$	$\frac{81}{256}$	$\frac{41,4}{127}$	$\frac{64,9}{200}$	$\frac{83,2}{256}$

3	$\frac{308}{80}$	$\frac{77}{20}$	$\frac{146}{64,8}$	0,38	$\frac{68,8}{220}$	$\frac{87,2}{279}$	$\frac{46,7}{144}$	$\frac{69,5}{214}$	$\frac{89,1}{274}$
4	$\frac{269,5}{70}$	$\frac{115,5}{30}$	$\frac{157}{69,7}$	0,41	$\frac{52,8}{169}$	$\frac{72,4}{231}$	$\frac{33,4}{103}$	$\frac{52,4}{161}$	$\frac{73,9}{227}$

Водоцементное отношение с введением в бетонную смесь КМ в количестве 10; 20 и 30 % снизилось на 56; 52 и 41 % соответственно.

Анализ прочностных показателей после ТВО:

- в возрасте 1 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в зависимости от его содержания превышает прочность контрольного состава (1) на 69-120 %;

- в возрасте 1 суток максимальное значение прочности наблюдалось при расходе комплексного модификатора 20 %, использованного взамен эквивалентного количества портландцемента и составило 68,8МПа, т.е. увеличилась в 2,2 раза.

- в возрасте 28 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ, использованном в количестве 10; 20 и 30 % превышает прочность контрольного состава (1) на 156; 179 и 131 % соответственно, т.е. увеличилась в 2,3 - 2,8 раза;

- в возрасте 28 суток максимальное значение прочности наблюдалось при расходе комплексного модификатора в количестве 20 % и составило 87,2 МПа при В/Ц = 0,38, т.е. прочность увеличилась почти в 2,8 раза.

При твердении бетона с комплексным модификатором в количестве 10; 20 и 30 % в НУ были получены следующие результаты:

- в возрасте 28 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 10 % (состав 2) превышает прочность контрольного состава (1) на 156% и составляет 83,2МПа;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 20 % (состав 3) превышает прочность контрольного состава (1) на 174 % и составляет 89,1МПа;

- в возрасте 28 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 30 % (состав 4) превышает прочность контрольного состава (1) на 127 % и составляет 73,9МПа;

- в возрасте 28 суток максимальное значение прочности бетона с КМ наблюдалось при его содержании 20 %, использованного взамен эквивалентного количества портландцемента, и составляет 89,1МПа или более чем в 2,7 раза превышает прочность контрольного состава;

- в возрасте 3 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 10 % (состав 2) превышает прочность контрольного состава (1) на 152 % и составляет 127% марочного значения;

- в возрасте 3 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 20 % (состав 3) превышает прочность контрольного состава (1) на 184 % и составляет 144% марочного значения;

- в возрасте 3 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 30 % (состав 4) превышает прочность контрольного состава (1) в 2 раза и на 3% марочное значение;

- в возрасте 3 суток максимальное значение прочности бетона с КМ наблюдалось при его содержании 20 %, использованного взамен эквивалентного количества портландцемента, и составила 46,7 МПа или более чем в 2,8 раза превышает прочность контрольного состава и почти в 1,5 раза больше марочной прочности (состав 1, твердение 28 суток в НУ, таблица 3.5.1);

- в возрасте 7 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 10 % (состав 2) превышает прочность контрольного состава (1) на 177 % и в 2 раза марочное значение (состав 1, твердение 28 суток в НУ, таблица 3.5.1);

- в возрасте 7 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 20 % (состав 3) превышает прочность контрольного состава (1) на 197 % и на 114% марочное значение;

- в возрасте 7 суток прочность бетона с комплексным модификатором КМ в количестве 30 % (состав 4) превышает прочность контрольного состава (1) на 124 % в 2 раза и на 61 % марочное значение;

- в возрасте 3 суток максимальное значение прочности бетона с КМ наблюдалось при его содержании 20 %, использованного взамен эквивалентного количества портландцемента, и составила 69,5 МПа или почти в 3 раза превышает прочность контрольного состава и в 1,6 раза больше марочной прочности (состав 1, твердение 28 суток в НУ, таблица 3.5.1).

Таким образом, установлено, что рациональное количество высокодисперсного комплексного модификатора КМ в виде смеси 1:1 микрокремнезёма МБ 10-01 и МБ-Б-II-2 составляет 20 %. При таком расходе КМ прочность бетона повышается более чем в 2,7 раза как после ТВО, так и после твердения в НУ относительно прочности контрольного состава. При коэффициенте вариации $\leq 0,135$ для мелкозернистого бетона контрольного состава с классом по прочности В25 (состав 1, таблица 3.5.1) полученный бетон с 20 % КМ имеет класс прочности В65 (состав 3, таблица 3.5.1). Более того, кинетика набора прочности для бетона нормального твердения этого состава в возрасте 7 суток соответствует и даже превышает прочность в возрасте 1 суток аналогичного состава после ТВО. Экономия цемента при этом составляет 77 кг на 1 м³ бетона.

Высокая прочность мелкозернистого бетона достигается путем использования КМ в виде микрокремнезёма и МБ-Б-II-2 в соотношении по массе 1:1. Применение означенных компонентов обеспечивает 2 и 3 уровни рациональных параметров компонентов бетона оптимизированного состава. При этом наблюдается значимое уплотнение структуры за счёт заполнения межчастичных пустот более тонкодисперсными частицами, повышается концентрация твердой фазы в единице объема. Между частицами цемента, микрокремнезёма, метаксаолина, гипса и МБ-Б-II-2 создаются оптимально стеснённые условия гидратации частиц портландцемента. В результате

гидратации цемента формируются тонкие прослойки гидратных фаз цементного камня, связывающие синтезированную означенным выше способом многокомпонентную систему в единый конгломерат, а оставшиеся высокопрочные реликты частиц клинкера вносят значимый вклад в интегральную прочность бетона.

Химический и минеральный составы, исследованных для бетона компонентов, представлены в таблицах 2.3.1 - 2.3.4, 2.3.7 и 2.3.8. Очевидно, что их использование обеспечивает высокий пуццоланический потенциал и соответственно образование в цементном камне высокопрочных низкоосновных гидросиликатов кальция в основном волокнистого строения, уменьшающих деструктивные процессы на ранней стадии твердения и также вносящих значимый вклад в прочность бетона.

3.6. Оценка рациональных параметров компонентов пенобетона

Полученные в пп. 3.2 - 3.5 рациональные параметры компонентов определены на составах мелкозернистого бетона, которые в настоящем разделе были использованы для оценки их влияния на свойства пенобетона. В частности, выполнены исследования по уточнению их влияния на прочность, определению оптимального содержания, СТС пенобетона марки по средней плотности D400 (таблица 3.6.1, рисунок 3.6.1).

Экспериментальные исследования проводились с применением портландцемента Цем 1 42,5 Н или ПЦ 500-Д0 ОАО «Старооскольский цементный завод». Использовался также тонкодисперсный доменный гранулированный шлак [132], микрокремнезём, метакаолин, МБ-Б-II-2, суперпластификатор С-3, ускоритель твердения АС и пенообразователь ПБ 2000. Марка по средней плотности пенобетона была принята D400.

Пенобетон приготавливали в лабораторном бетоносмесителе-активаторе объёмом 20 литров. Скорость вращения вала на внешнем радиусе лопатки была 800 об./мин. или 18,6 м/с.

Технология приготовления пенобетона была следующей:

- приготовление в бетоносмесителе пены;
- введение компонентов бетонной смеси;
- приготовление пенобетонной массы в течение 2 минут;
- укладка образцов-кубов с размерами 10×10×10 см в формы;
- твердение НУ или условиях ТВО по режиму 6+3+6+2 часов при температуре изотермического прогрева (80±5)°С.

Свойства пенобетона, в т.ч. коэффициент теплопроводности и усадка определялись в возрасте 1 и 28 после ТВО суток и в возрасте 28 суток после твердения в НУ. Состав 1 являлся контрольным. В состав 2 взамен 40 % портландцемента введено эквивалентное количество тонкодисперсного шлака. Это снизило водотвёрдое отношение на 5 %, и увеличило прочность

пенобетона на 25-30 %. При этом наблюдается значительное снижение коэффициента теплопроводности (21,4 %) и величины деформаций усадки (10,4 %) относительно контрольного состава.

Таблица 3.6.1 - Строительно-технические свойства пенобетона

№	Состав, мас. %	В/Т	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии после ТВО и НУ в возрасте, МПа / %		
				1 сут. ТВО	28 сут. ТВО	28 НУ
1	Контрольный состав	0,39	398	$\frac{1,06}{100}$	$\frac{1,58}{100}$	$\frac{1,62}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак – 40	0,37	384	$\frac{1,32}{125}$	$\frac{2,05}{130}$	$\frac{2,09}{129}$
3	С-3 - 0,6 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	0,32	406	$\frac{1,45}{137}$	$\frac{2,32}{147}$	$\frac{2,41}{148}$
4	Тонкодисперсный шлак – 40 Микрокремнезем – 8 С-3 - 0,6	0,31	382	$\frac{1,69}{159}$	$\frac{2,67}{169}$	$\frac{2,75}{170}$
5	Тонкодисперсный шлак – 30 Микрокремнезем – 8 С-3 - 0,6	0,32	388	$\frac{1,79}{169}$	$\frac{2,89}{183}$	$\frac{3,03}{197}$
6	Тонкодисперсный шлак – 40 Микрокремнезем – 8 С-3 – 0,6 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	0,32	386	$\frac{2,0}{189}$	$\frac{3,07}{194}$	$\frac{3,19}{197}$
7	Тонкодисперсный шлак – 40 МБ Б-II -2 - 20	0,32	384	$\frac{1,66}{157}$	$\frac{2,64}{167}$	$\frac{2,74}{169}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор (КМ) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	0,32	381	$\frac{2,08}{196}$	$\frac{3,19}{202}$	$\frac{3,35}{207}$

В частности, прочность пенобетона контрольного состава (без модификаторов) в возрасте 1 и 28 суток после ТВО имеет значение 1,06 и 1,58МПа соответственно, а в возрасте 28 суток после твердения в НУ - 1,62 МПа (таблица 3.6.1). Размер ячеек колеблется в пределах 0,23-2,0 мм. При этом, средний размер пор составляет 1,2 мм, а коэффициент вариации - 0,44 или 44 %, коэффициент теплопроводности в возрасте 28 суток равен 0,11 Вт/(м °С).

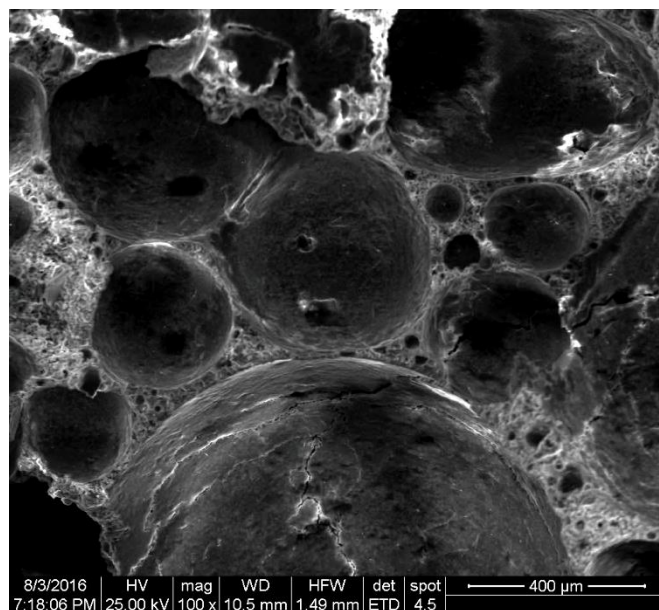


Рисунок 3.6.1 – Общий вид макроструктуры модифицированного пенобетона марки по средней плотности D400.

Совместный анализ результатов таблиц 3.5.1 (пп. 1-4) и 3.6.1 (пп. 1-7) показал, что оптимальным составом для пенобетона является рецептура п. 8: портландцемент; тонкодисперсный доменный шлак – 30 %; комплексный модификатор (в виде смеси 1:1 микрокремнезёма и МБ-Б-П-2) – 8 %; ускоритель твердения «АС» - 0,07 %, вода. Означенный состав характеризуется наиболее высокими значениями показателей строительно-технических свойств относительно контрольного состава (1). Прочность пенобетона марки D400 в возрасте 1 и 28 суток после ТВО и после 28 суток твердения в НУ повысилась в 2 раза. В частности, в возрасте 28 суток после ТВО и твердения в НУ ее значения составили 3,19 и 3,35 МПа соответственно.

Деформация усадки пенобетона изучалась в соответствии с ГОСТ 24544-81 на кубах размером 10x10x40 см. Образцы после набора прочности в заданных условиях и возрасте погружались в воду на трое суток и хранились под водой в горизонтальном виде. Контроль линейных деформаций проводился на индикаторе часового типа. Цена деления индикатора - 0,002 мм. Испытание осуществляли в воздушно-влажных условиях при

температуре (20±2) °С и относительной влажности воздуха 60 %. Результаты испытания приведены в таблице 3.6.2. Возраст образцов был принят 28 суток после ТВО и твердения в НУ. Деформации усадки измерялись в течение 180 суток.

Таблица 3.6.2 – Теплопроводность и усадка пенобетона

№	Состав, мас. %	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности в сухом виде, Вт/(м·С) %		Усадка, мм/м %	
			ТВО	НУ	ТВО	НУ
1	Контрольный состав	398	<u>0,11</u> 100	<u>0,1</u> 100	<u>2,99</u> 100	<u>2,98</u> 100
2	Тонкодисперсный шлак – 40	384	<u>0,085</u> 78	<u>0,078</u> 78,5	<u>2,6</u> 87	<u>2,67</u> 89,6
3	С-3 - 0,6 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	406	<u>0,113</u> 103	<u>0,102</u> 102	<u>0,95</u> 31,9	<u>0,98</u> 32,9
4	Тонкодисперсный шлак – 40 Микрокремнезем – 8 С-3 - 0,6	382	<u>0,081</u> 74	<u>0,0746</u> 74,6	<u>1,91</u> 64	<u>1,97</u> 65
5	Тонкодисперсный шлак – 30 Микрокремнезем – 8 С-3 - 0,6	388	<u>0,08</u> 73,5	<u>0,074</u> 74	<u>1,495</u> 50	<u>1,52</u> 51
6	Тонкодисперсный шлак – 40 Микрокремнезем – 8 С-3 – 0,6 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	386	<u>0,082</u> 74,6	<u>0,075</u> 75	<u>0,69</u> 23	<u>0,75</u> 25,2
7	Тонкодисперсный шлак – 40 МБ Б-II -2 - 20	384	<u>0,084</u> 76,5	<u>0,077</u> 77	<u>0,66</u> 22	<u>0,74</u> 25
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор (КМ) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	381	<u>0,08</u> 73	<u>0,073</u> 73,5	<u>0,64</u> 21,5	<u>0,68</u> 23

У оптимального состава (8) пенобетона в сухом состоянии коэффициент теплопроводности снижается на 26,5-27 % после ТВО и твердения в НУ (таблица 3.6.2). Усадка уменьшается на 78,6 % и 77 % (0,64 и 0,68 мм/м) после ТВО и твердения в НУ соответственно или почти в 4 раза относительно контрольного состава.

Для углублённой оптимизации состава по книге [204]. выбрана матрица, по которой будут получены зависимости вида:

$$F(X_{1,2}) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (2.1)$$

В модели математического планирования эксперимента были выбраны факторы X_1 и X_2 . Обработка результатов проводилась с помощью регрессивного анализа по факторам X_1 и X_2 .

X_1 – количество тонкодисперсного доменного шлака – (20, 30, 40) % от массы компонентов смеси на 1 м³;

X_2 – количество комплексного модификатора (КМ) – (4, 8, 12), % от массы. компонентов на 1 м³ пенобетонной смеси.

Матрица матпланирования дана в таблице 3.6.3.

Таблица 3.6.3 – Матрица математического планирования

№	Факторы				Функции цели	
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y_1 - предел прочности при сжатии - $R_{сж}$, МПа,	Y_2 - коэффициент теплопроводности - λ , Вт/(м·°С),
1	-1	-1	20	4	2,1	0,084
2	-1	0	20	8	2,3	0,082
3	-1	+1	20	12	2,1	0,083
4	0	-1	30	4	2,8	0,0815
5	0	0	30	8	3,2	0,08
6	0	0	30	8	3,19	0,08
7	0	0	30	8	3,2	0,08
8	0	+1	30	12	3	0,081
9	+1	-1	40	4	2,7	0,083
10	+1	0	40	8	2,9	0,082
11	+1	+1	40	12	2,75	0,088

Количество пенообразователя было постоянным, ускорителя твердения «АС» было - 0,07 % от массы. компонентов., где функциями цели были:

Y_1 – предел прочности при сжатии, МПа.

Y_2 – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С).

После обработки результатов получены уравнения регрессии:

- для предела прочности при сжатии:

$$Y_1 = R_{сж} = 3,2 + 0,358 X_1 + 0,256 X_2 - 0,015 X_2^2$$

(ошибка при аппроксимации = 1 %);

- для коэффициента теплопроводности:

$$Y_2 = \lambda = 0,08 + 0,024 X_1 - 0,165 X_2 + 0,01 X_2^2$$

(ошибка при аппроксимации = 2,2 %);

Правильность уравнений регрессии была проверена по критериям Стьюдента и Фишера. Ошибка при аппроксимации находилась в пределах от 1 до 2,2 %.

Следовательно, установлено, что рациональным или оптимальным составом является состав 8. Расход компонентов на приготовление 1 м³ пенобетона этого состава представлен в таблице 3.6.4.

Таблица 3.6.4 - Расход компонентов на 1 м³ пенобетона

Портландцемент, кг	Тонкодисперсный шлак, кг	Комплексный модификатор (КМ), кг	Ускоритель твердения «АС», кг	Вода ¹ , кг
$\frac{160}{40}$	$\frac{120}{30}$	$\frac{20}{8}$	$\frac{2,8}{0,07}$	$\frac{97}{22}$

1 – водотвердое отношение В/Т = 0,32

Очевидно, что применение в пенобетоне тонкодисперсного доменного гранулированного шлака, метаксаолина, микрокремнезема, МБ Б-II-2, суперпластификатора С-3 значительно улучшает его структуру и свойства.

В частности, высокие значения СТС оптимального состава 8 (таблицы 3.6.1 и 3.6.2) наиболее вероятно связаны с действием комплексного модификатора КМ, содержащего в своем составе смесь 1:1 микрокремнезёма и МБ-Б-II-2. Их применение предотвращает седиментационные процессы и расслоение, характерные для контрольного состава. Дополнительный положительный эффект заключается во введении в пенобетонную смесь ускорителя твердения АС в рациональном количестве, обеспечивающим необходимую толщину диффузного слоя, большую связность цементной системы, наиболее низкое содержание воды. Действие комплексного модификатора КМ создает в цементной системе стеснённые условия за счёт рациональной упаковки твёрдых частиц и минимальной толщины слоя цементного камня, также значительно повышающего прочность цементного камня. Этому же способствует образование этtringита с созданием внутри системы расширяющегося эффекта. Расширяющийся эффект создаётся взаимодействием гипса, метаксаолина и воды. Формируются также высокопрочные тоберморитоподобные гидратные фазы. Очевидно, что все

означенные выше факторы объясняют и обеспечивают полученные в исследованиях высокие строительно-технические свойства и низкие деформации усадки пенобетона: прочность увеличивается в 2 раза, усадка снижается почти в 4 раза. Коэффициент теплопроводности у пенобетона с маркой по средней плотности D400 снизился на 25 %. Экономия цемента, при этом, составила 115 кг по сравнению с контрольным составом.

В соответствии с результатами по прочности на сжатие после ТВО и твердения в НУ в возрасте 28 суток (таблица 3.6.1), определены классы пенобетона (таблица 3.6.5) для контрольного состава 1 и оптимального состава 8, в соответствии с ГОСТ 25485-89. Бетоны ячеистые. Технические условия.

Таблица 3.6.5 - Класс и прочность на сжатие пенобетона

№	Показатели	Предел прочности и класс пенобетона в возрасте 28 суток при коэффициенте вариации:					
		0,1		0,135		0,175	
		ТВО	НУ	ТВО	НУ	ТВО	НУ
1	Прочность на сжатие	1,58	1,62	1,58	1,62	1,58	1,62
	Класс пенобетона	B1	B1	B1	B1	B1	B1
8	Прочность на сжатие	3,19	3,35	3,19	3,35	3,19	3,35
	Класс пенобетона	B2,5	B2,5	B2	B2,5	B2	B2

Представленные показатели (таблица 3.6.4) свидетельствуют, что контрольный состав соответствует классу пенобетона по прочности B1 при коэффициентах вариации 0,1; 0,135 и 0,175. Прочность пенобетона в возрасте 28 суток после ТВО и твердения в НУ имела значение 1,58 и 1,62 МПа соответственно. Было также определено, что класс по прочности у модифицированного пенобетона оптимального дисперсного состава (состав 8) увеличился до B2-B2,5 при коэффициентах вариации от 0,1 до 0,175 соответственно. Это относится к пенобетону после ТВО, а также твердеющего в НУ в возрасте 28 суток. При этом прочность пенобетона (состава 8) после ТВО и твердения в НУ в возрасте 28 суток имела значение 3,19 и 3,35 МПа соответственно.

Таким образом, полученные результаты определяют возможность массового применения модифицированного пенобетона для строительства ограждающих конструкций, в том числе при их монолитном возведении. Кроме того, проведённые исследования показали, что рационально подобранный комплекс модификаторов обеспечивает синергетическое действие всех отдельно взятых компонентов состава, а также высокие СТС пенобетона и его качество.

Был определён индекс эффективности модификатора в пенобетоне оптимизированного состава по сравнению с контрольным составом 1 (по ГОСТ Р 56178-2014). Для состава 8 он составил: по снижению воды затворения – 21 %, по повышению прочности – более 100 %.

Необходимо отметить, что исследованиями установлено также, что введение в пену микрокремнезема позволяет повысить ее устойчивость, реологические свойства. После приготовления пены и перемешивания с разработанной модифицированной смесью компонентов с ускорителем твердения образуется однородная масса с мелкодисперсными пузырьками воздуха, способная к оптимально быстрому схватыванию и набору прочности ячеистой структуры с менее дефектными и более тонкими, плотными и прочными перегородками между ячейками воздуха.

Методом математического планирования получены математические модели свойств (предела прочности при сжатии и коэффициента теплопроводности) и оптимизирован состав пенобетона в зависимости от количества тонкодисперсного доменного шлака и комплексного модификатора.

3.7. Выводы по главе 3

1. Разработаны научные положения физико-химических методов последовательного модифицирования цементного теста, мелкозернистого бетона, пенобетона путем исследования и определения рациональных параметров компонентов составов означенных цементных систем. Оптимизация дисперсного состава осуществлена на трёх уровнях введением в исследуемые цементные системы разномодисперсных тонкомолотого шлака, модификатора МБ Б-II-2, микрокремнезёма (или совместное введение модификатора МБ Б-II-2 и микрокремнезёма) в комплексе с ускорителем твердения «АС», обеспечивая значимое повышение качества и расширение областей применения пенобетона, а также синергетический эффект и пролонгированное действие означенных добавок.
2. Использование высокодисперсных минеральных добавок различной удельной поверхности оптимизирует дисперсный состав пенобетона, обеспечивая получение ячеистой структуры с тонкими, плотными и прочными перегородками между пузырьками воздуха. Тонкодисперсная устойчивая структура пены при этом обеспечивается применением микрокремнезёма и ускорителя твердения «АС» в оптимальном количестве (0,07-0,09% массы цемента).
3. Рациональное содержание компонентов состава пенобетона определялось с использованием мелкозернистого бетона с целью снижения возможных ошибок эксперимента при изменении его средней плотности в процессе проведения означенных работ. Исследованиями с использованием мелкозернистого бетона было определено оптимальное количество ускорителя твердения АС, тонкодисперсного шлака, комплексного модификатора (КМ) в виде микрокремнезёма марки МБ10-01 и МБ-Б-II-2 в соотношении по массе 1:1, микрокремнезёма.
4. Рациональное содержание тонкодисперсного шлака оптимальной дисперсности, используемое взамен эквивалентного количества

портландцемента составляет 30-60%. Класс прочности мелкозернистого бетона со шлаком, С-3(0,6%) и ускорителем твердения АС(0,07-0,09%) в возрасте 28 суток после ТВО и твердения в НУ повышается с В22,5 (контрольный состав) до В55. Экономия портландцемента составляет от 115,5 до 231 кг/м³ бетона.

5. Рациональное количество высокодисперсного комплексного модификатора КМ (в виде смеси 1:1 микрокремнезёма МБ 10-01 и МБ-Б-II-2) составляет 20 %, используемого взамен эквивалентного количество цемента. Прочность мелкозернистого бетона при означенном расходе КМ и твердении в НУ в возрасте 28 суток составляет 89,1 МПа, а после ТВО в возрасте 1 и 28 суток - 68,8 и 87,2 МПа соответственно, превышая прочность контрольного состава более чем в 2,7 раза. Применение модификатора КМ повышает класс бетона по прочности с В25 до В65 при коэффициенте вариации $\leq 0,135$. Экономия цемента составляет 77 кг на 1 м³ бетона.

6. Исследован и разработан оптимальный состав пенобетона на 1 м³: портландцемент-187 кг или 47 %; тонкодисперсный шлак - 120 кг или 30 %; комплексный модификатор (КМ) - 32 кг или 8 %; ускоритель твердения «АС» - 0,28 кг или 0,07 %, а также вода - 60 кг или 15 % Экономия портландцемента составляет 84 кг/м³ относительно контрольного состава.

7. Прочность пенобетона марки по средней плотности D400 с химико-минеральным модификатором структуры в возрасте 1 и 28 суток после ТВО и в возрасте 28 суток твердения в НУ превышает прочность контрольного состава в 2 раза. В возрасте 28 суток после ТВО и твердения в НУ прочность модифицированного пенобетона составляет 3,19 и 3,35 МПа соответственно.

8. Деформация усадки пенобетона оптимального состава уменьшается на 78,6 % и 77 % (0,64 и 0,68 мм/м) после ТВО и твердения в НУ или в 4 раза относительно контрольного состава и находится на уровне деформаций усадки газобетона автоклавного твердения.

9. Коэффициент теплопроводности модифицированного пенобетона в сухом состоянии снижается на 26,5-27 %. Низкое значение теплопроводности

модифицированного состава пенобетона обеспечивается применением высокодисперсных минеральных модификаторов, выполняющих роль экранов, рассеивающих фононы. Наиболее значимый эффект достигается при их аморфном (микрокремнезем) и аморфно-кристаллическом в плотном фазовом контакте (тонкодисперсный шлак) состоянии.

10. Индекс эффективности модификатора для модифицированного состава пенобетона по сравнению с контрольным составом (ГОСТ Р 56178-2014) составил: по снижению воды затворения – 21 %, по повышению прочности – более 100 %.

11. Класс по прочности модифицированного пенобетона оптимального дисперсного состава после ТВО и твердения в НУ увеличился с В1 (контрольный состав) до В2-В2,5 при коэффициентах вариации от 0,175 до 0,1 соответственно.

12. Получены математические модели свойств и оптимизирован состав пенобетона в зависимости от количества тонкодисперсного доменного шлака и комплексного модификатора.

4. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА РАЦИОНАЛЬНОГО ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА

Пенобетон и другие виды ячеистого бетона применяются для возведения однослойных ограждающих конструкций зданий. Это связано не только с хорошими показателями комфортности жилых помещений, но и с его высоким коэффициентом теплотехнической однородности.

4.1. Научные основы снижения теплопроводности пенобетона

Из СНиП [163] известно, что коэффициент теплотехнической однородности, у однослойных стен в 1,35 раза превышает

теплотехническую однородность трёх- и более многослойных конструкций. Фактически же это превышение составляет от 1,3 до 1,5 раза [164-168]. Учёт такой однородности при расчете термического сопротивления теплопередаче ведёт к увеличению толщины однослойных стен на 5 ... 10 %, а у многослойных стен - на 30 % и более [163,164-168]. Более того, для повышения конкурентоспособности требуется повышение прочности цементной матрицы в пенобетоне при одновременном снижении его средней плотности. В свою очередь, уменьшение средней плотности снизит теплопроводность, толщину стены здания (материалоёмкость) и его стоимость [164-168].

Следовательно, теплопроводность является важным показателем пенобетона. Понимание характера теплопередачи позволит получить путь создания эффективного строительного материала для возведения ограждающих конструкций зданий.

Известно, что механизм переноса тепла, например, в бетоне вытекает из характера, происходящих в нём тепловых движений [53,67,68, 73, 169]. Твёрдое тело это совокупность атомов, которые совершают колебания. Поэтому, связи между атомами провоцируют колебания групп атомов. Кристалл имеет ограничения по размерам, поэтому при колебаниях возникают стоячие волны. Следовательно, наибольшая длина волны соответствует колебанию всего кристалла. По его длине устанавливается стоячая волна $2l = \lambda$ (λ -длина свободного пробега волны). Но кристалл колеблется не только как одно целое, устанавливаются колебания отдельных групп молекул, а также отдельных атомов в этих молекулах. В зависимости от имеющихся степеней свободы в кристалле возникает некоторое количество различных стоячих волн [169]. Если твёрдое тело состоит из N атомов, то оно имеет $3N$ степеней свободы. Более того, группы атомов, которые образуют молекулу в кристалле, могут колебаться как единое целое. При этом, общее число степеней свободы увеличивается: причём без учёта возможных вращательных степеней

свободы. Если таких групп атомов будет n , то общее число возможных стоячих волн в твердом теле равно $3nN$. Наложение таких волн составляет тепловое движение в кристалле. Самая длинная волна определяется размерами тела l , $\chi_1=2l$. Её называют акустической волной. А самая короткая волна определяется периодом атомной решетки d , $\chi_2=2d$. Стоячие волны, вызываемые колебаниями отдельных атомов и групп атомов, носят название оптических волн [169,170-173].

В теоретической физике [169-173] установлено, что энергия твёрдого тела меняется квантами. Величина кванта равна:

$$E = h \cdot \nu,$$

где (h - постоянная Планка) пропорциональна частоте колебаний ν .

Перенос энергии в твёрдом теле или материале при возникновении в нём тепловых волн эквивалентен распространению некоторых квантов энергии «квазичастиц» или фононов.

Фононы осуществляют теплопроводность в твёрдом теле. Перенос тепла происходит за счёт столкновений фононов с атомами решётки. Они рассеиваются при столкновениях с дефектами кристаллической решётки и при столкновениях друг с другом. Энергия фонона, как и кванта, определяется частотой ν . Следовательно, для каждого вида фононов энергия постоянна [169,170-173]. Изменение температуры тела или материала означает изменение в нём числа фононов [171]. Фононы потому называют квазичастицами, поскольку они могут возникать или исчезать при охлаждении или нагревании тела или материала (в отличие от обычных стабильных частиц). При температуре минус $273,15^\circ\text{C}$ фононы отсутствуют. А при её повышении их число возрастает не линейно, а по сложному закону. Например, при низких температурах число фононов пропорционально кубу температуры [171].

Установлено, что фононы в твердом теле или материале появляются в виде упругих колебаний. Скорость их распространения должна равняться скорости распространения упругой волны, т.е. скорости звука.

Следовательно, приводило бы к очень большой теплопроводности твердого тела или материала. Её величина во много бы раз превышала фактическое значение. На самом деле, как было указано ранее, фононы имеют многочисленные столкновения с другими фононами, а также дефектами решетки атомами. При этом, они рассеиваются, а скорость их распространения существенно снижается и становится очень малой [169,170-173].

В современной теоретической физике фононы рассматриваются как квазичастицы, а также в виде газа, состоящего из фононов [169,170-173]. Поэтому было предложено понятие о длине свободного пробега такого фонона. Такое понятие аналогично длине свободного пробега молекулы. Свободные пробеги фононов ограничиваются столкновениями с поверхностями кристалла с его неоднородностями и между собой. Средняя длина свободного пробега фононов χ обратно пропорциональна абсолютной температуре (T^{-1}) и коэффициент теплопроводности λ обратно пропорционален температуре [169-173]:

$$\lambda = \frac{\alpha}{T},$$

где α - константа, различная для разных веществ (материалов).

По аналогии с газами можно считать, что теплопроводность неметаллических кристаллов пропорциональна длине свободного пробега фононов χ . Тогда коэффициент теплопроводности кристалла

$$\lambda = \frac{1}{3} c u \chi$$

где c — теплоёмкость единицы объёма, u — скорость звука, а формула Фурье для теплопроводности кристалла имеет вид:

$$Q = \frac{1}{3} c u \chi S t \frac{T_1 - T_2}{l}$$

где S — площадь сечения кристалла, перпендикулярная направлению теплового потока, t - время, l - длина кристалла, $T_1 - T_2$ - разность температур.

Теплопроводность металлических кристаллов в 10 - 100 раз больше за счёт теплопередачи с участием электронов проводимости. При обычных температурах теплопроводность с участием электронов во много раз превышает решёточную у неметаллов. Именно к неметаллам относятся бетоны. Поэтому, у них только фононы переносят тепло, а теплопроводность, соответственно, называется решёточной [169-173].

Коэффициенты теплопроводности у алюминия - $238 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, у железа и его сплавов - $50 - 70 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, а у кварца $\leq 5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Коэффициент теплопроводности газов - $\approx 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, у воздуха он равен $0,023 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Именно это обстоятельство позволяет снизить коэффициент теплопроводности пористых материалов, в том числе и ячеистых бетонов [1,2,15,71,132,174,175].

Теплопроводность пористых материалов, бетона и дисперсных сред в реальности можно исследовать двумя путями [175].

Во-первых, экспериментальное определение теплофизических показателей материалов известными методами. Они основаны на решении задач теплопроводности для материалов разных составов, формы. Эти способы имеют некоторые теоретические приближения, но эффективные значения теплофизических свойств материала определяются с большой точностью. Такой путь в основном используется при исследовании теплофизических характеристик строительных материалов.

Недостатком эмпирического подхода к проблеме переноса тепла пористых и дисперсных систем не учитывает влияния разных факторов на процессы его переноса в сложных цементных системах. Следовательно, нельзя рассчитать рациональный состав только по теплофизическим параметрам.

Второй путь основан на рассмотрении фактической структуры пористой или дисперсной системы, её моделировании и расчетом эффективной теплопроводности при фактических условиях работы материала.

А.В. Лыков в работе [175] предлагает использовать принцип обобщенной проводимости. Она основана на аналогии между дифференциальными уравнениями стационарного потока теплоты, электрического тока, электрической и магнитной индукции, потока массы. Это позволяет использовать в расчете тепловой проводимости системы основные положения электростатики и электродинамики.

Принцип обобщенной проводимости весьма эффективен при совместном рассмотрении со структурой материала. Рассмотрение структуры материала включает в себя: оценку пористости, размеров частиц и пор, способов контактирования частиц между собой. Важным моментом является оценка эффективной теплопроводности системы и влияния на неё кондуктивной, конвективной и радиационной составляющих теплопроводности.

По мнению А.В. Лыкова [175], передача тепла в дисперсных системах может осуществляться благодаря:

- теплопроводности твёрдых частиц материала;
- теплопроводности газа в порах материала;
- теплопроводности микрозазоров газа между частицами;
- передаче теплоты теплопроводностью частиц при контактах (контактной теплопроводностью);
- конвекции газа среды, где находится материал (при засыпке);
- излучению от частицы к частице.

Эффективная теплопроводность такой системы будет объединённой функцией температуры, давления газа-наполнителя, аморфного или кристаллического состояния и химического состава материала, а также газа, пористости, диаметра и формы частиц и пор, степени черноты и температуры соприкасающихся поверхностей, поверхностных сил частиц материала по отношению к газу, влаге и т.п.

Для решения задач в используемых расчётах принимаются допущения на основе упрощения физической модели переноса теплоты, а также по

структуре материала. Структура материала считается однородной. Поэтому предполагается, что механизмы переноса теплоты в пористых и дисперсных системах при определенных условиях, является аддитивными. Известно, что аддитивность – это уже упрощение, где значение показателя для целого объекта равно сумме показателей для каждой из его частей [176]. Следовательно, по мнению авторов такого подхода, можно пренебречь некоторыми видами переноса теплоты в определенных условиях.

С другой стороны, анализ многих теоретических исследований и экспериментальных результатов позволил выявить закономерности переноса тепла в пористых и дисперсных системах [166,168,175,178-183]:

- теплопроводность вещества частиц не оказывает решающего влияния на эффективную теплопроводность дисперсного материала. Роль теплопроводности неметаллических веществ частиц в таком случае достаточно мала;

- эффективная теплопроводность пористых и дисперсных материалов существенно зависит от теплопроводности газа-наполнителя. В бетоне обычно роль газа-наполнителя выполняет воздух или паровоздушная смесь. Их коэффициент теплопроводности – $0,023 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

- большое влияние на эффективную теплопроводность материала оказывает теплопроводность микрозазора газа между частицами дисперсного материала;

- контактная теплопроводность между частицами играет большую роль и является определяющей при невысоких температурах и низком давлении газа. Однако, при нормальном давлении эту величину можно не учитывать;

- при глубоком вакууме эффективная теплопроводность дисперсного материала при повышенных температурах почти полностью идёт за счёт лучистого теплообмена. Более того, при высоких температурах лучистый теплообмен является определяющим при любых давлениях газа-наполнителя;

- конвективным переносом тепла в пористой или дисперсной системах почти всегда можно пренебречь. Это связано с тем, что очень малые

размеры пор и микрозазоров на стыке частиц препятствуют возникновению конвективных потоков под действием разницы температур. Конвективный перенос тепла в порах можно не учитывать при диаметре частиц менее 4 - 6 мм или размере пор менее 2 мм. Например, если взять наименее плотную простую кубическую упаковку и размер частиц 4 - 6 мм. Тогда, диаметр окружности, вписанной между 4-мя соседними частицами, равен $0,41D$ (где D – диаметр сферической частицы) или 1,64 - 2,46 мм: среднее значение - 2,05 мм. Диаметр в наиболее широкой части равен $0,73D$ или 2,92 - 4,38 мм. Большинство существующих пористых и дисперсных систем имеет частицы меньших размеров. При этом, мелкодисперсная структура пор и ячеек при равной суммарной пористости даёт более низкую теплопроводность бетона;

- существенное влияние на эффективную теплопроводность дисперсной системы при повышенных температурах оказывают диаметры частиц, поскольку это связано с так называемым «числом рассеивающих экранов». Соответственно, системы с меньшим диаметром частиц имеют теплопроводность меньше за счёт увеличения «числа рассеивающих экранов». При этом поток тепла идёт по более длинному пути [177].

Для определения эффективной теплопроводности пористых и дисперсных систем получены расчетные соотношения. Их можно разделить на 3 группы:

- соотношения для оценки их эффективной теплопроводности при близком к атмосферному давлению, а также при низких и умеренных температурах;
- соотношения для расчета эффективной теплопроводности материалов в разреженной среде в зависимости от теплопроводности и давления газа;
- соотношения при расчете эффективной теплопроводности при повышенных температурах. с учётом только лучистой теплопередачи.

Для простоты пористой или дисперсной системы рассматривается система с идущими друг за другом плоских слоёв твёрдого скелета и газа. Причём, слои могут располагаться перпендикулярно или параллельно

тепловому потоку. При перпендикулярном расположении слоёв эффективная теплопроводность системы будет минимальна. Её можно определять по формуле:

$$\lambda_{\text{эфф}}^{\text{мин}} = \frac{\lambda_{\alpha} \lambda_{\text{н}}}{P \lambda_{\text{д}} + (1 - P) \lambda_{\text{н}}},$$

При параллельном расположении слоёв эффективная теплопроводность системы можно определить по формуле:

$$\lambda_{\text{эфф}}^{\text{макс}} = P \lambda_{\text{н}} + (1 - P) \lambda_{\text{д}},$$

где $\lambda_{\text{д}}$ и $\lambda_{\text{н}}$ - коэффициенты теплопроводности диспергированной и непрерывной фазы соответственно, Вт/(м·°С);

P – пористость, %.

Эти соотношения описывают предельные варианты. Они не учитывают и даже исключают характер контактов и особенности структуры материала. Такие соотношения могут применяться только для определения диапазона значений эффективной теплопроводности существующих пористых и дисперсных систем. Однако, они также не принимают во внимание состояние вещества. А оно может быть кристаллическим, аморфным и даже смешанным. Примером смешанного состояния может служить доменный гранулированный шлак. Более того, коэффициент теплопроводности вещества, имеющего одинаковый химический состав, могут существенно отличаться. Так, например, у кварца в аморфном и кристаллическом состоянии коэффициент теплопроводности отличается в два раза при низких температурах. А при повышенных температурах значения этих коэффициентов приближаются друг к другу [2,3,171,174,175]. Конечно, необходимо учитывать, что теплопроводность аморфных веществ имеет более низкие значения. Большинство учёных это связывает с длиной свободного пробега фононов, которая зависит от температуры, однородности структуры и размеров ячеек структуры материала.

У материалов смешанного (кристаллического и аморфного) состояния элементы структуры находятся в полном механическом контакте. Следовательно, они имеют более низкие значения теплопроводности по сравнению с веществами кристаллического строения. Это происходит за счёт аморфной составляющей материала и увеличения сопротивления теплопередаче в местах контактов аморфных и кристаллических частей. Большую роль играет, видимо, увеличение количества дефектов контактной зоны. при этом происходит рассеивание фононов. Поэтому, цементные системы на основе шлакопортландцемента характеризуются на 10 - 25 % более низким коэффициентом теплопроводности по сравнению с бетонами на основе портландцемента без добавок шлака [184,185].

В связи с этим, очевидно, что для значительного снижения коэффициент теплопроводности бетона, может стать микрокремнезём с удельной поверхностью 20 - 30 м²/г. Он является высокоэффективным минеральным модификатором, представлен аморфным диоксидом кремния в количестве 85 - 98 %. Его дисперсность находится на уровне наночастиц и обеспечит большое число экранов для рассеивания фононов. Это значительно снизит коэффициент теплопроводности цементного бетона.

Существенное влияние на теплопроводность любого цементного бетона оказывает содержание влаги. Известно, что во влажном пористом материале вместе с переносом энергии в виде теплоты происходит перенос энергии благодаря массопереносу. Вода в бетоне распределяется в порах. Коэффициент теплопроводности воды равен 0,58 - 0,6 Вт/(м·°С). Это более чем в 25 раз превышает теплопроводность воздуха. В результате зависимость между коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{э}}$ и содержанием влаги приобретает следующий вид. С увеличением содержания влаги коэффициент теплопроводности повышается и достигает максимума. При дальнейшем увеличении содержания влаги в материале теплопроводность оказывает незначительное влияние. Более того, у некоторых влажных материалов наблюдается снижение коэффициента

теплопроводности, а зависимость λ_{Σ} от W имеет экстремальный характер [175]. При воздействии отрицательной температуры на бетон и переходе воды в лёд наблюдается существенное увеличение теплопроводности. Это связано с коэффициентом теплопроводности льда, равный 2,32 Вт/(м·°С).

Таким образом, установлено, что высокоэффективными минеральными модификаторами бетона, существенно уменьшающими его коэффициент теплопроводности, являются:

- мелкодисперсный доменный гранулированный шлак.
- микрокремнезём с удельной поверхностью 20-30 м²/г. Он представлен аморфным диоксидом кремния в количестве 85-98 %. Более того, удельная поверхность микрокремнезема находится в пределах размеров наночастиц. Это обеспечивает большое количество рассеивающих экранов, существенно уменьшающих коэффициент теплопроводности бетона. Кроме того, если частицы микрокремнезёма распределить по поверхности пузырьков пены, то его высокий капиллярный потенциал будет значимо повышать упругость плёнки. В этом случае поверхность жидкости пузырька будет подниматься по капилляру до состояния равновесия действующих сил, повышать упругость и устойчивость плёнки. Всё это будет препятствовать стеканию жидкости на границу Плато. Следовательно, такой механизм действия микрокремнезёма обеспечит большую устойчивость и более высокую дисперсность пузырьков пены, а также более высокий коэффициент использования пены (КИП). Кроме того, частицы микрокремнезёма могут препятствовать стеканию жидкости ещё и за счет того, что они будут закупоривать каналы Плато-Гиббса. Еще один положительный эффект применения микрокремнезёма заключается в том, что его частицы связаны с поверхностью пузырька поверхностными силами, включающие адсорбционные и электростатические силы. Они обеспечивают высокую поверхностную вязкость и придают пене псевдотвердое состояние.

Известно, что стекание жидкости на границу Плато представляется негативным явлением и приводит к уменьшению КИП, снижению прочности.

Это происходит за счёт образования в пенобетоне микрообъёмов сниженной прочности и более высокими значениями В/Ц, то есть зародышами разрушения [185]. Стоит отметить, что почти все применяемые пенообразователи замедляют твердение цементных систем и, этим самым, снижают прочность пенобетонов.

Улучшение структуры пенобетона или её модификация в данной работе осуществлялась за счёт применения химических и минеральных добавок-модификаторов.

В качестве химических модификаторов использовались суперпластификатор С-3 в количестве 0,6 % и ускоритель твердения «АС» – 0,07 % от массы портландцемента.

В качестве минеральных модификаторов - тонкодисперсный шлак Новолипецкого металлургического комбината с оптимальной дисперсностью [53,186], которая на 140 -150 м²/кг превышает удельную поверхность портландцемента. Это является первым уровнем оптимизации или рационализации дисперсного состава пенобетона. При таком положении распределение большинства частиц тонкодисперсного шлака происходит в пустотах между зёрнами портландцемента [53,186].

Органо-минеральный модификатор МБ-Б-II-2 представляет второй уровень оптимизации или рационализации. МБ-Б-II-2 имел в настоящей работе удельную поверхность 1500 м²/кг. Такая дисперсность в 4,8 - 5 раз больше, чем у портландцемента. В межчастичных пустотах многокомпонентного вяжущего вещества (с составом: портландцемент + тонкодисперсный шлак) располагаются по 1-2 частицы с размерами 3 - 5 мкм модификатора Эмбэлит 10-100. При этом, пустотность системы снижается на 3 - 4 %.

Третий уровень оптимизации дисперсного состава пенобетона обеспечивается применением микрокремнезема с дисперсностью 20000 - 30000 м²/кг [53,185]. Соотношение удельной поверхности микрокремнезёма и портландцемента приблизительно в 2 раза больше отношения дисперсности

портландцемента к дисперсности мелкого и крупного заполнителей для бетона. По закону аналогии, частицы микрокремнезёма при содержании в количестве 5 - 8 % за счёт поверхностных сил, включая адсорбционные и электростатические силы, покрывают частицы портландцемента, тонкодисперсного шлака и модификатора МБ-Б-II-2. Частицы микрокремнезёма также могут распределяться в пустотах между частицами модификатора МБ-Б-II-2. Более того, при этом образуется самоорганизованная наноструктура цементного камня.

Таким образом, трёхуровневая оптимизация дисперсного состава пенобетона обеспечивает существенное уменьшение его пустотности между твёрдыми частицами. Пустотность в этом случае снижается на 9 - 12 %. Следовательно, для пенобетона требуется модификация с целью получения рационального дисперсного состава. Это позволит повысить коэффициент теплотехнической однородности и существенно снизить коэффициент теплопроводности пенобетона.

4.2. Структура модифицированного пенобетона рационального дисперсного состава

Для оценки качества структуры пенобетона были проведены дериватографические, микроструктурные сколов образцов и рентгенофазовые исследования. Возраст образцов был принят 28 суток. Результаты приведены на рисунках 4.2.1 - 4.2.2.

В работе использован метод дериватографии в виде термогравиметрического анализа (ТГА) пенобетона. Кривые ТГ фиксируют потерю массы при повышении температуры [197].

Дериватограммы неавтоклавного пенобетона в возрасте 28 суток после ТВО и нормального твердения показаны на рисунках 4.2.1 – 4.2.6. На этих рисунках автоматически получены кривые: ТГ или ТГ, %. Составы образцов приведены в таблицах 3.6.1 и 3.6.2. Экспериментальные исследования проводились в НИУ МГСУ.

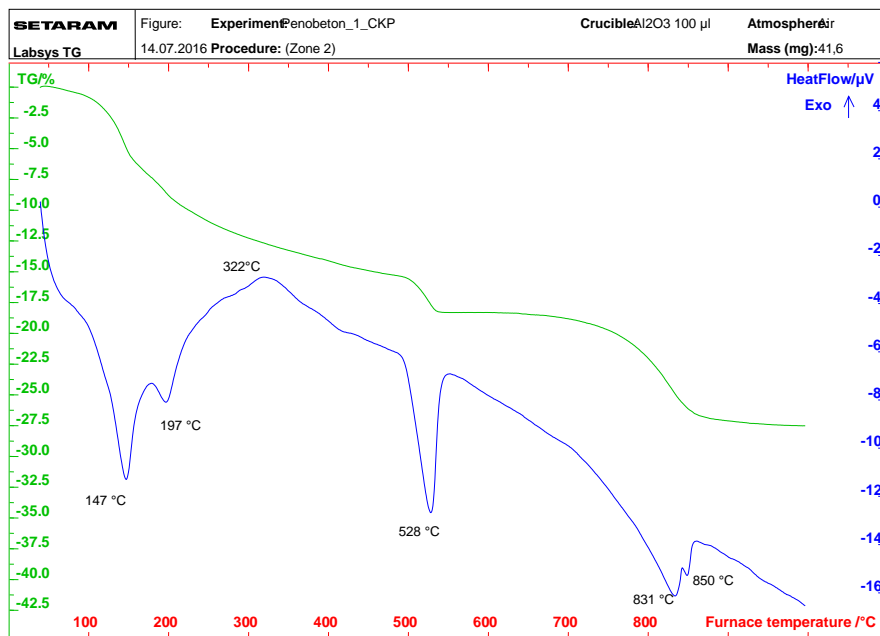


Рисунок 4.2.1 - Дериватограмма пенобетона контрольного состава 1 в возрасте 28 суток после нормального твердения.

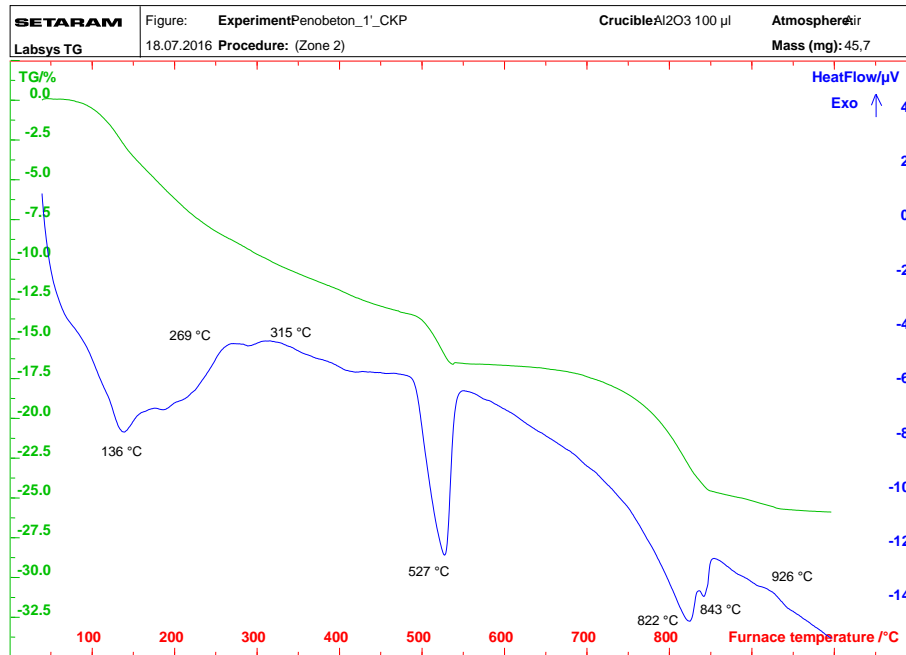


Рисунок 4.2.2 - Дериватограмма пенобетона контрольного состава 1 в возрасте 28 суток после ТВО.

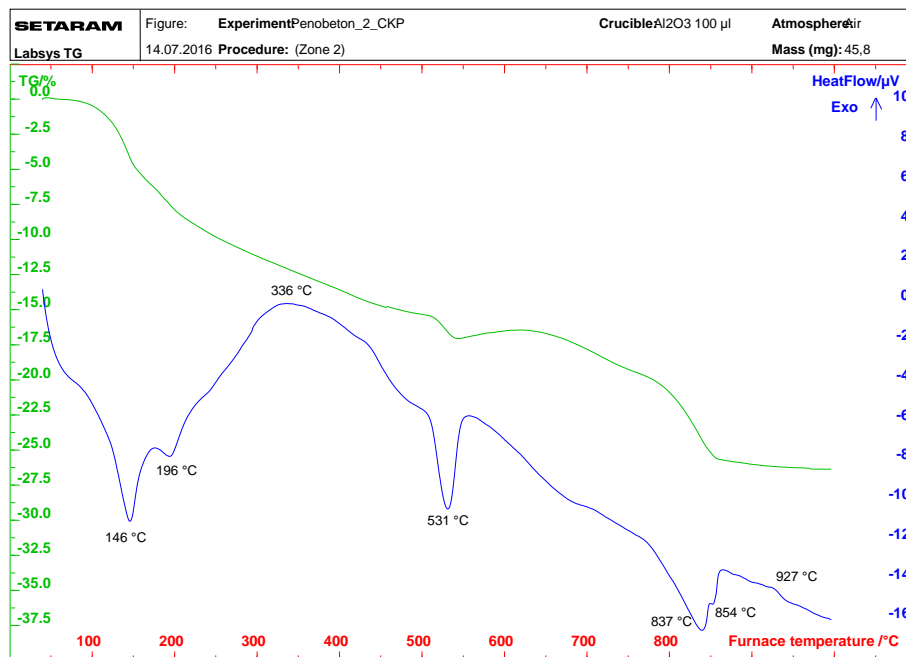


Рисунок 4.2.3 - Дериватограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком (состав 2) в возрасте 28 суток после нормального твердения.

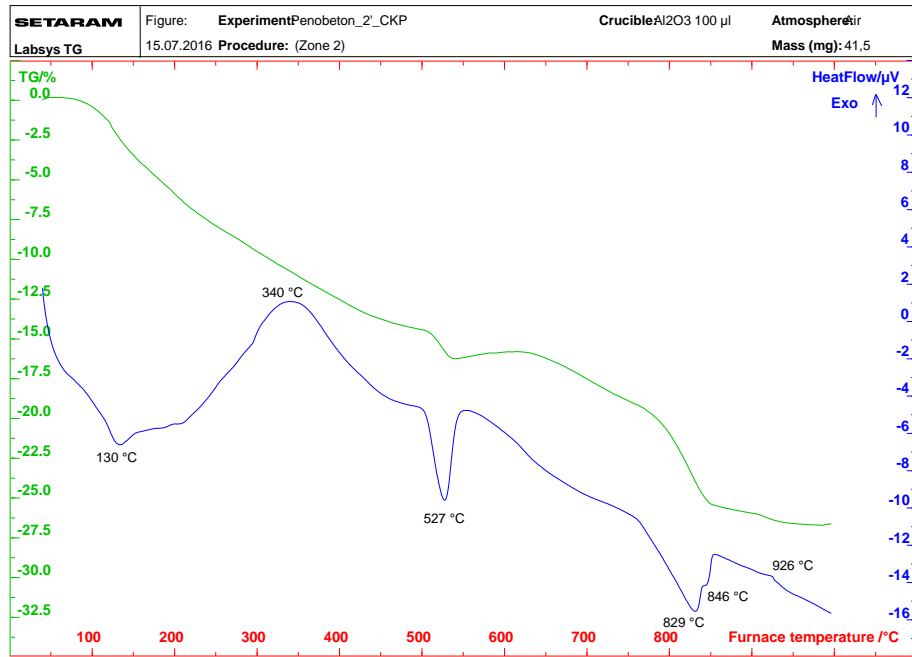


Рисунок 4.2.4 - Дериватограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком (состав 2) в возрасте 28 суток после ТВО.

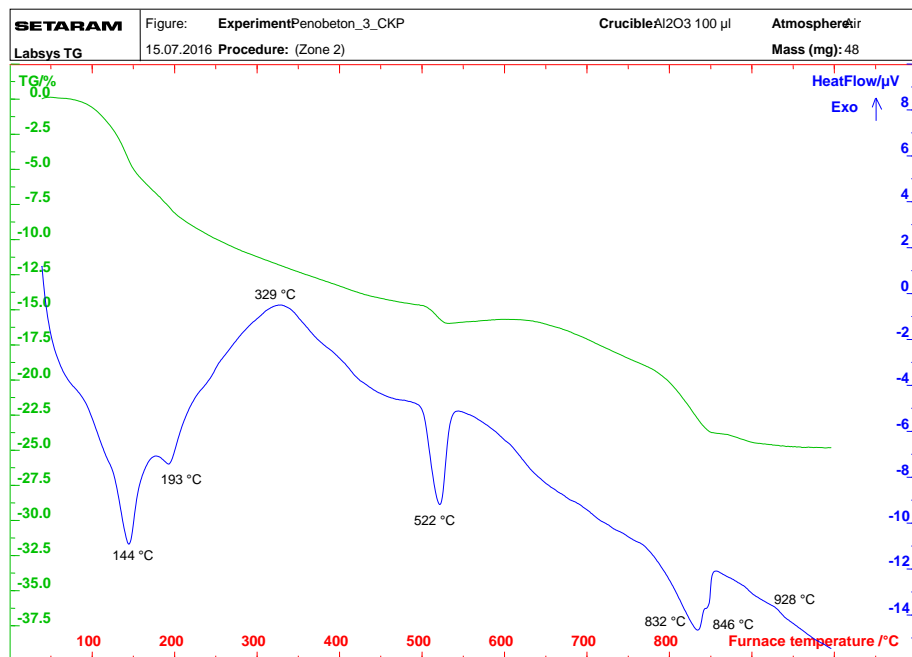


Рисунок 4.2.5 - Дериватограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) в возрасте 28 суток после нормального твердения.

Анализ диаграмм пенобетона 4.2.1 ... 4.2.6 позволил обобщить результаты в таблице 4.2.1. Потеря массы оценивалась по кривой TG, %, при повышении температуры до 1000 °С.

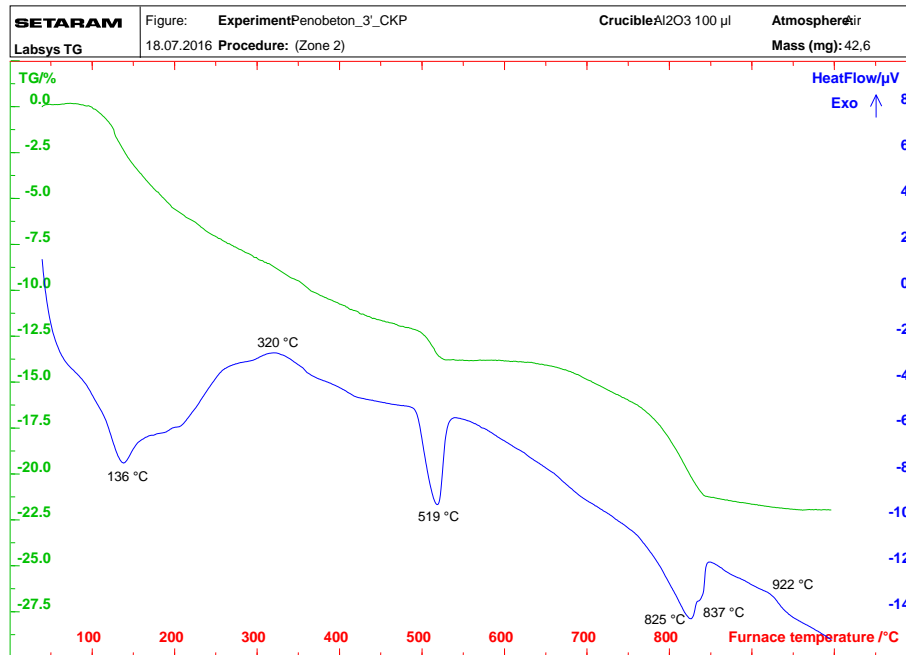


Рисунок 4.2.6 - Дериватограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) в возрасте 28 суток после ТВО.

Таблица 4.2.1 – Результаты анализа термогравиметрических кривых

№	Состав пенобетона	Влажность, % ¹	Потеря массы, %, при температурах, °С		
			136-147	519-531	822-832
Твердение в нормальных условиях 28 суток					
1	Контрольный состав	20,7	20,5	26,1	32,2
2	Тонкодисперсный шлак – 40	15,5	15,2	22,7	26,5
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор (КМ) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	14,9	14,7	16	21,2
После ТВО в возрасте 28 суток					
1	Контрольный состав	15,2	15,1	17,5	24,4
2	Тонкодисперсный шлак – 40	14,9	14,5	18,4	21,2
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор (КМ) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	11,7	12,2	13,5	19

1 - Влажность по массе, %

В таблице 4.2.1. также дана влажность по массе в возрасте 28 суток. Установлено, что максимальные массовые потери у пенобетона в возрасте 28 суток - при температуре выше 850 °С. Они выше значений влажности по массе уже при температуре более 500 °С. Это связано с удалением химически связанной воды из портландита, гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция. Потеря массы после 820 °С происходит в связи с разрушением силикатов и алюмосиликатов кальция.

Таким образом, термогравиметрические исследования определили 3 основных участков переломов кривых TG при увеличении температуры. Это может быть вызвано удалением воды различной формы связанности, изменением структуры образцов, включая фазовые переходы до 1000 °С. Определены 3 экстремума:

- при температуре (136-147) °С, связан с испарением физически связанной воды из пенобетона;
- при температуре (519-531) °С связан с удалением химически связанной воды;
- при температуре (822-832) °С наблюдается в связи с разрушением силикатов и алюмосиликатов кальция.

Также установлено, что самые низкие потери по массе при температуре более 820 °С имеет пенобетон, содержащий в своём составе портландцемент, тонкодисперсный доменный шлак, комплексный модификатор (КМ), ускоритель твердения «АС» (состав 8).

Для уточнения фазовых изменений кривых TG были изучены рентгенограммы и микроструктура пенобетона.

Рентгенофазовый анализ позволяет определить минеральные составы пенобетона [198-201]. Результаты в виде рентгенограмм даны на рисунках 4.2.7 - 4.2.12. Анализ цементного пенобетона контрольного состава 1 представлен на рисунках 4.2.7 и 4.2.8, пенобетона с тонкодисперсным шлаком (состав 2) - на рисунках 4.2.9 и 4.2.10, пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и

ускорителем твердения «АС» (состав 8) - на рисунках 4.2.11 и 4.2.12 в возрасте 28 суток после ТВО и нормального твердения соответственно. Анализ проведён с использованием определителей [200, 201].

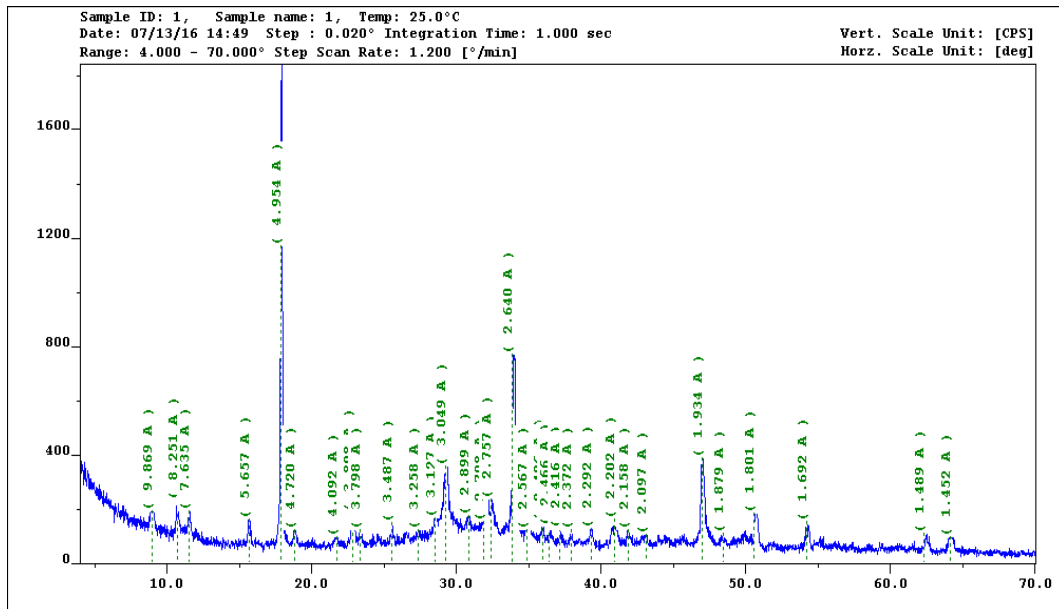


Рисунок 4.2.7 – Рентгенограмма пенобетона контрольного состава 1 в возрасте 28 суток после нормального твердения.

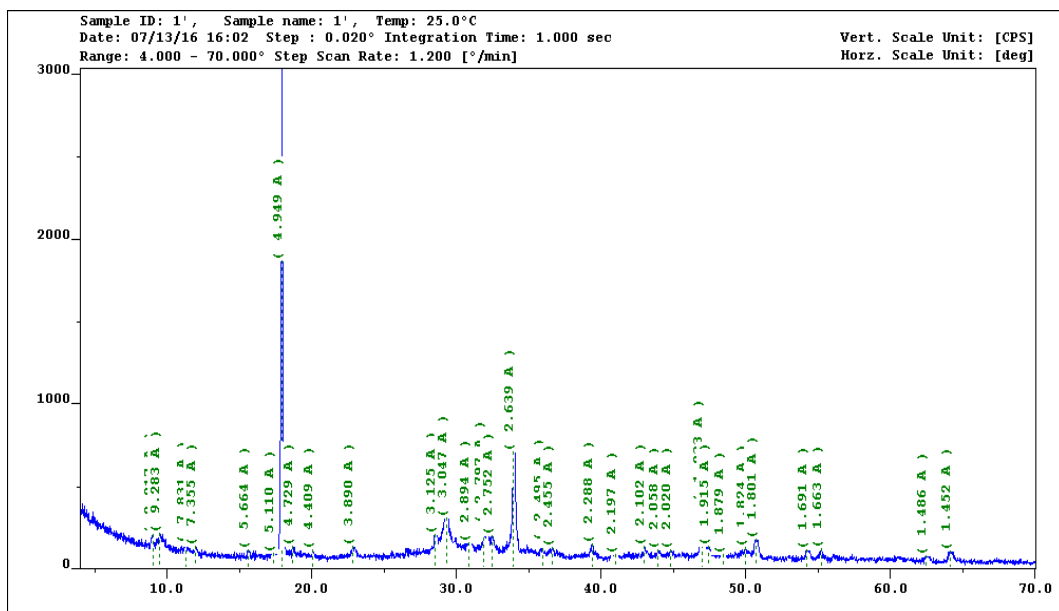


Рисунок 4.2.8 – Рентгенограмма пенобетона контрольного состава 1 в возрасте 28 суток после ТВО.

После идентификации рентгенограмм пенобетона контрольного состава 1 в возрасте 28 суток после ТВО и нормального твердения были обнаружены следующие минералы клинкера и новообразования:

- алит C_3S ($54CaO \cdot 16SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$) с межплоскостными расстояниями $d=(3,03; 2,78...2,75; 2,61; 2,18; 1,76; 1,49) \cdot 10^{-10}$ м;
- трехкальциевый алюминат C_3A ($Ca_3Al_2O_6$) с $d=(4,23; 4,08; 3,33; 2,05; 1,91; 1,55) \cdot 10^{-10}$ м;
- белит β - C_2S (ларнит) с $d=(2,748; 2,609; 2,189; 2,047; 1,98; 1,696; 1,574) \cdot 10^{-10}$ м;
- четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF (браунмиллерит) с $d=(7,32; 2,67; 2,04; 1,92; 1,81; 1,39) \cdot 10^{-10}$ м;
- кварц: β - SiO_2 с $d=(4,26; 3,35; 1,82; 1,54) \cdot 10^{-10}$ м;
- природный гипс – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ с $d=(7,56; 4,26; 1,99; 1,66) \cdot 10^{-10}$ м;
- кальцит $CaCO_3$ с $d = (3,828; 3,067; 2,511; 2,301; 1,88) \cdot 10^{-10}$ м.

При обычном давлении могут образовываться продукты гидратации минералов цементного клинкера:

- портландит $Ca(OH)_2$ с $d = (4,93; 3,11; 2,63; 1,78; 1,315) \cdot 10^{-10}$ м;
- $CSH(I)$ ($CSH(B)$) – частично закристаллизованный гидросиликат кальция с $d = (12,5; 3,07; 2,8; 1,83) \cdot 10^{-10}$ м. Он может, образовываться при температуре вплоть до $100^\circ C$;
- $CSH(II)$ с $d = (9,8; 3,07; 2,8; 2,0; 1,83; 1,56) \cdot 10^{-10}$ м;
- гидросиликат кальция – $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ с $d = (6,46; 5,74; 3,19; 2,84; 2,74; 1,704; 1,604) \cdot 10^{-10}$ м;
- гидроалюминат кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ с $d=(5,14; 4,48...4,45; 2,3; 2,23; 2,04; 1,68; 1,60) \cdot 10^{-10}$ м;
- этtringит $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ с $d=(9,73; 5,65; 4,704; 3,88; 2,56; 2,21) \cdot 10^{-10}$ м.
- гидроалюмоферрит кальция $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 6H_2O$ с $d=(5,18; 4,50; 3,402; 2,07; 1,715) \cdot 10^{-10}$ м.

Степень гидратации контрольного состава 1 составляет 50-55%.

Рентгенограммы пенобетона с тонкодисперсным шлаком (состав 2) в возрасте 28 суток после ТВО и нормального твердения (рисунки 4.2.9 и 4.2.10) показывают пики, схожие с пенобетоном контрольного состава 1.

Однако, структура со шлаком обладает более высокой закристаллизованностью и меньшей интенсивностью пиков портландита. Степень гидратации образцов состава 2 составляет 65-72 %.

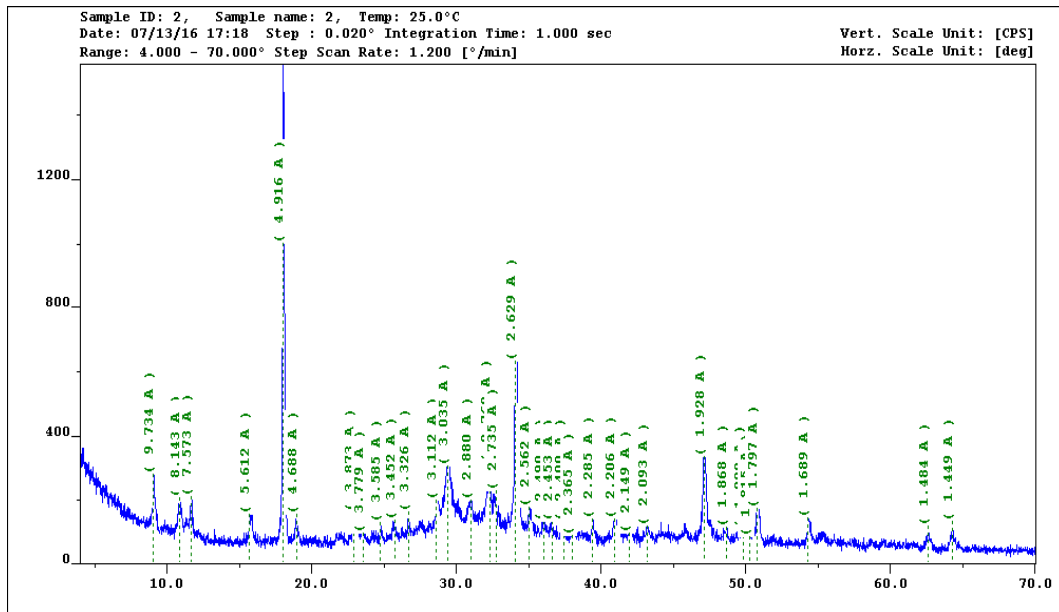


Рисунок 4.2.9 – Рентгенограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком (состав 2) в возрасте 28 суток после нормального твердения.

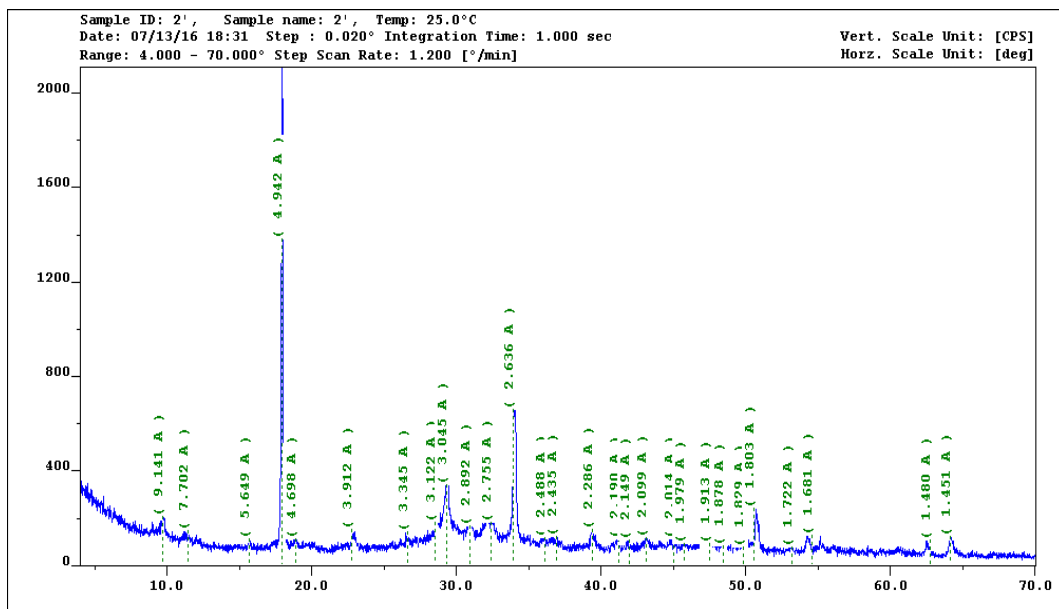


Рисунок 4.2.10 – Рентгенограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком (состав 2) в возрасте 28 суток после ТВО.

После идентификации рентгенограмм пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения

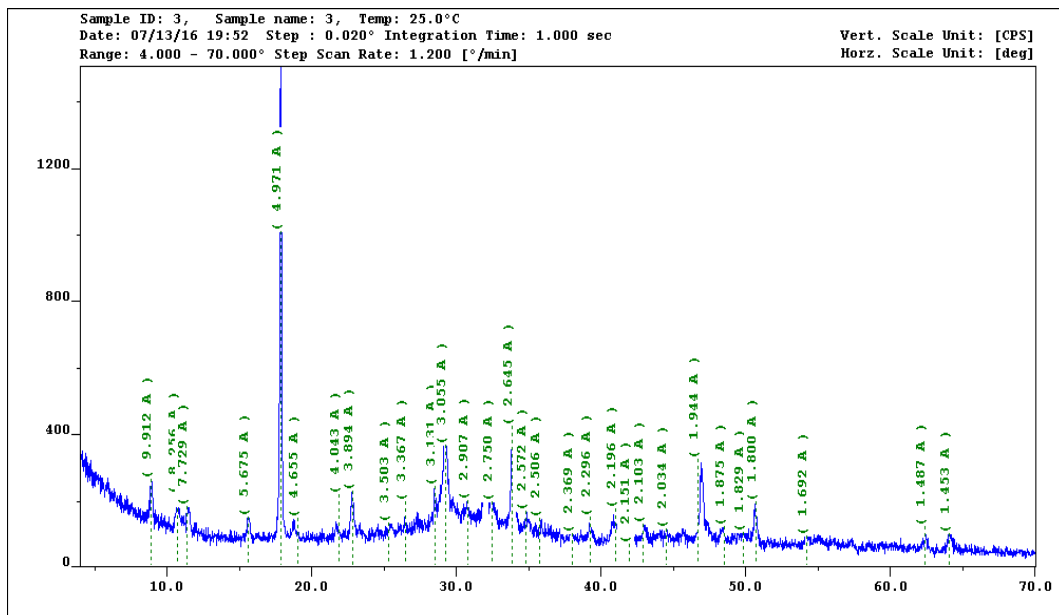


Рисунок 4.2.11 – Рентгенограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) в возрасте 28 суток после нормального твердения.

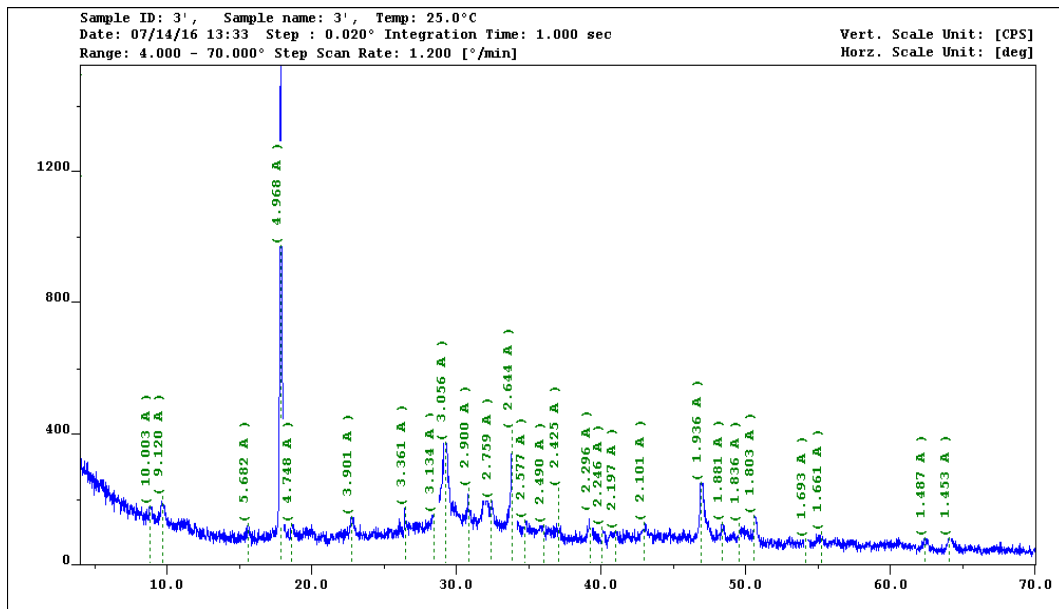


Рисунок 4.2.12 - Рентгенограмма пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) в возрасте 28 суток после ТВО.

«АС» (состав 8) в возрасте 28 суток после ТВО и нормального твердения (рис. 4.2.11 и 4.2.12) были обнаружены следующие пики:

- мусковит $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ с межплоскостными расстояниями $d=(10,026 - 10,03; 2,568; 1,498) \cdot 10^{-10}$ м;

- каолин $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Его межплоскостные расстояния d равны $(7,14 - 7,175; 3,57 - 3,581; 1,487) \cdot 10^{-10}$ м [136, 137].

- кварц SiO_2 с $d = (4,24 - 4,257; 3,34; 1,813) \cdot 10^{-10}$ м;

- портландит $Ca(OH)_2$ с $d=(4,912-4,919; 4,93; 3,11; 2,63; 1,93) \cdot 10^{-10}$ м,

- кальцит $CaCO_3$ с $d=(3,867; 2,287; 2,05; 1,91-1,92; 1,869) \cdot 10^{-10}$ м,

- CSH-I – слабо закристаллизованный гидросиликат кальция: $d = (12,5; 3,07; 2,8; 1,83) \cdot 10^{-10}$ м;

- CSH-II - более закристаллизованный гидросиликат кальция: $d = (9,8; 3,07; 2,8; 2,0; 1,83) \cdot 10^{-10}$ м;

- гидросиликат кальция – $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$, имеющий $d = (6,46; 5,74; 3,19; 2,84; 2,74) \cdot 10^{-10}$ м;

- гидроалюминат кальция – $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ с $d = (5,14; 4,48...4,45; 2,3; 2,23; 2,04; 1,68; 1,60) \cdot 10^{-10}$ м . Его образуется достаточно много и интенсивности пиков достаточно высока;

- этtringит - $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ с $d = (9,73; 5,65; 4,704; 3,88; 2,56; 2,21) \cdot 10^{-10}$ м.

- гидроалюмоферрит кальция – $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 6H_2O$: $d = (5,18; 4,50; 3,402; 2,07) \cdot 10^{-10}$ м.

Интенсивность пиков этtringита, низкоосновных гидросиликатов кальция весьма высокая. Это связано с тем, что в состав 8 пенобетона входят тонкодисперсный шлак и комплексный модификатор (КМ). Более того, комплексный модификатор (КМ) включает в свой состав метакаолин, микрокремнезем и гипс. Структура пенобетона состава 8 обладает более высокой закристаллизованностью, чем состав 2, и значительно меньшей интенсивностью пиков портландита. Степень гидратации образцов состава 8

составляет 80-85 %. Высокая прочность и низкая усадка обеспечивается за счет расширяющего действия этtringита, а также формирования низкоосновных гидросиликатов кальция (тоберморитоподобных).

Был определён количественный фазовый состав пенобетона. Результаты представлены в таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2. - Количественный фазовый анализ пенобетона

№	Состав пенобетона	Ca(OH) ₂	Этtringит	Закристаллизованность, %	Степень гидратации, %
Твердение в нормальных условиях 28 суток					
1	Контрольный состав	24,5	10,9	65	55
2	Тонкодисперсный шлак – 40	18,7	9,6	72	72
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор (KM) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	14,9	18,2	80	85
После ТВО в возрасте 28 суток					
1	Контрольный состав	29,1	3,6	60	50
2	Тонкодисперсный шлак – 40	20,8	2,6	65	65
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор (KM) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	6,8	11,6	74	80

Были автоматически получены данные по портландиту и этtringиту, а также степень закристаллизованности и степень гидратации пенобетона контрольного и составов 2 и 8 после ТВО и нормального твердения в возрасте 28 суток. Количество портландита и этtringита необходимо для оценки коррозионной стойкости и наличия расширяющегося компонента при применении органо-минерального модификатора в составе 8.

Была исследована микроструктура образцов пенобетона контрольного состава 1 и составов 2 и 8. Результаты этих исследований представлены на рисунках 4.2.13-4.2.18. На 1 этапе исследована структура пенобетона контрольного состава 1 после ТВО и нормального твердения в возрасте 28 сут. (рисунок 4.2.13, 4.2.14).

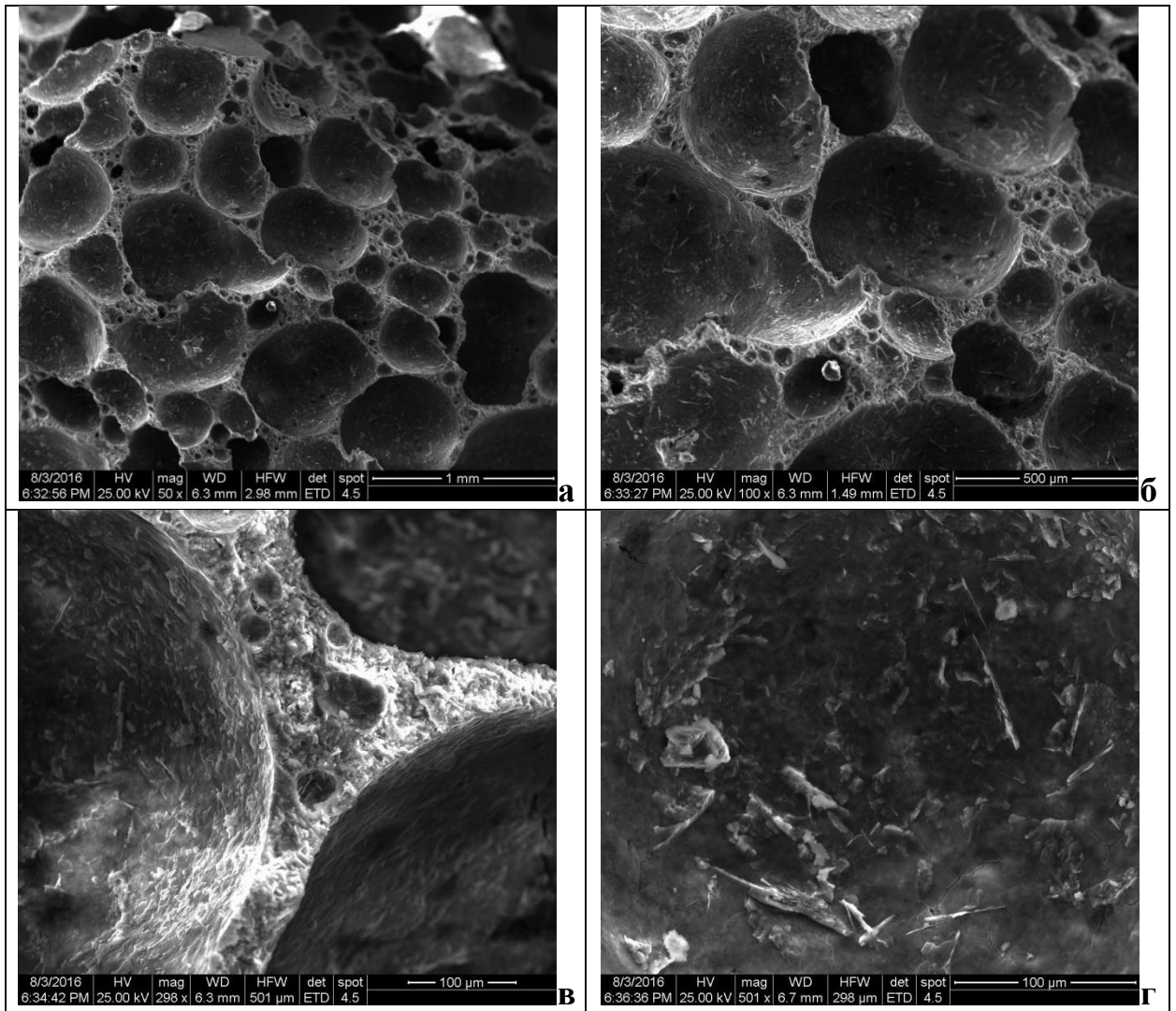
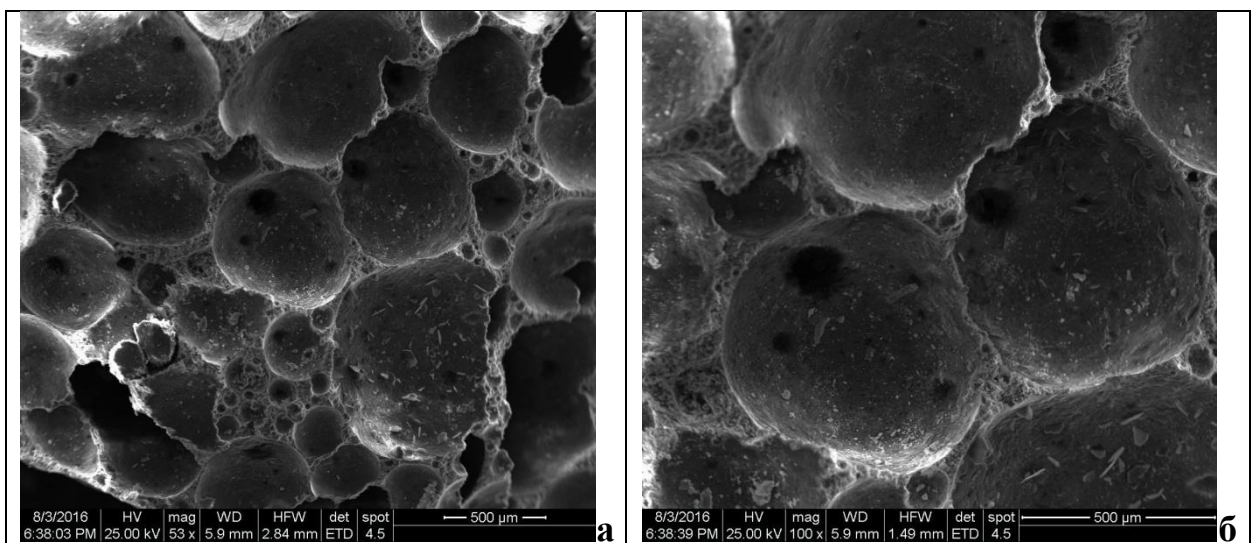


Рисунок 4.2.13 - Структура пенобетона **контрольного состава 1** после **нормального твердения** в возрасте 28 суток: а – макроструктура; б, в - микроструктура; г – внутренняя поверхность поры.



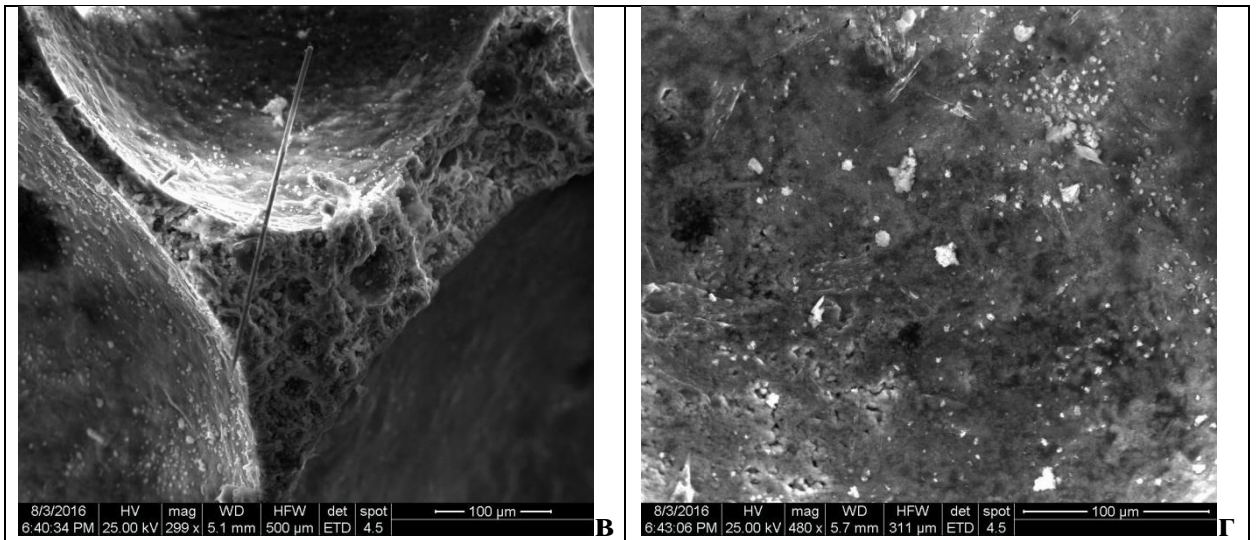
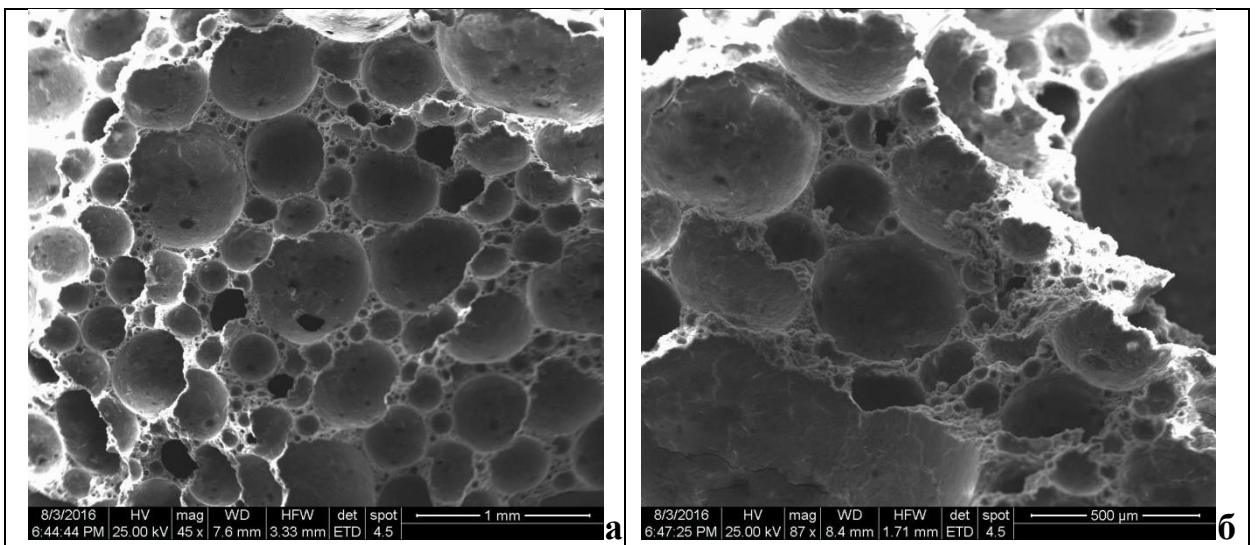


Рисунок 4.2.14 - Структура пенобетона **контрольного состава 1** после ТВО

в возрасте 28 суток: а – макроструктура; б, в - микроструктура; г – внутренняя поверхность поры.

На 2 этапе исследована структура цементного пенобетона с тонкодисперсным шлаком в возрасте 28 суток состава 2 после ТВО и нормального твердения (рисунок 4.2.15, 4.2.16).



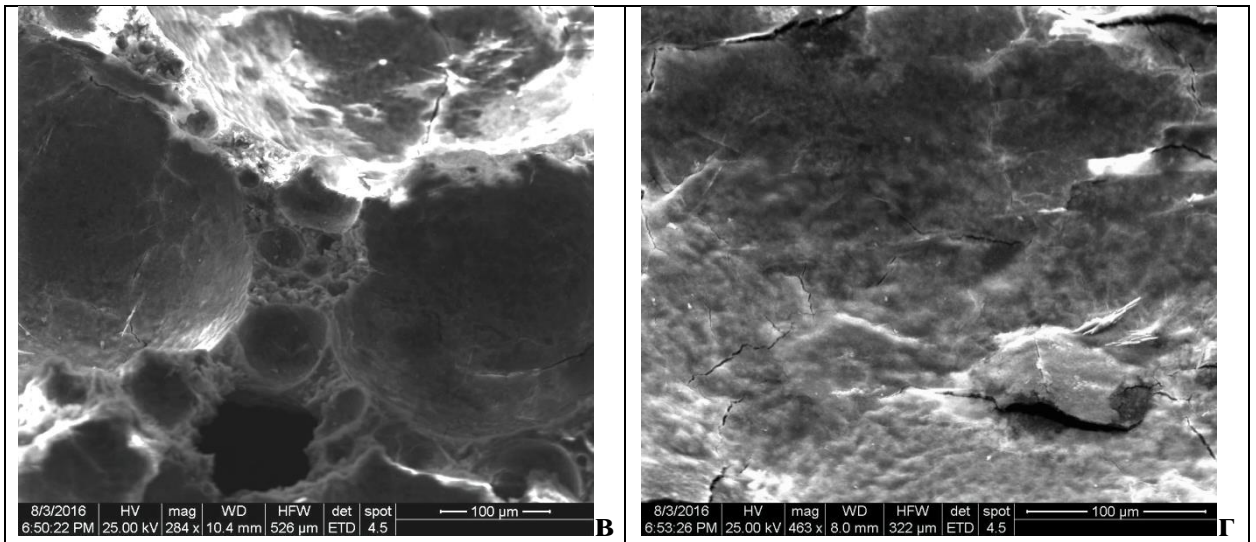


Рисунок 4.2.15 - Структура пенобетона с тонкодисперсным шлаком состава 2 после нормального твердения в возрасте 28 суток: а – макроструктура; б, в - микроструктура; г – внутренняя поверхность поры.

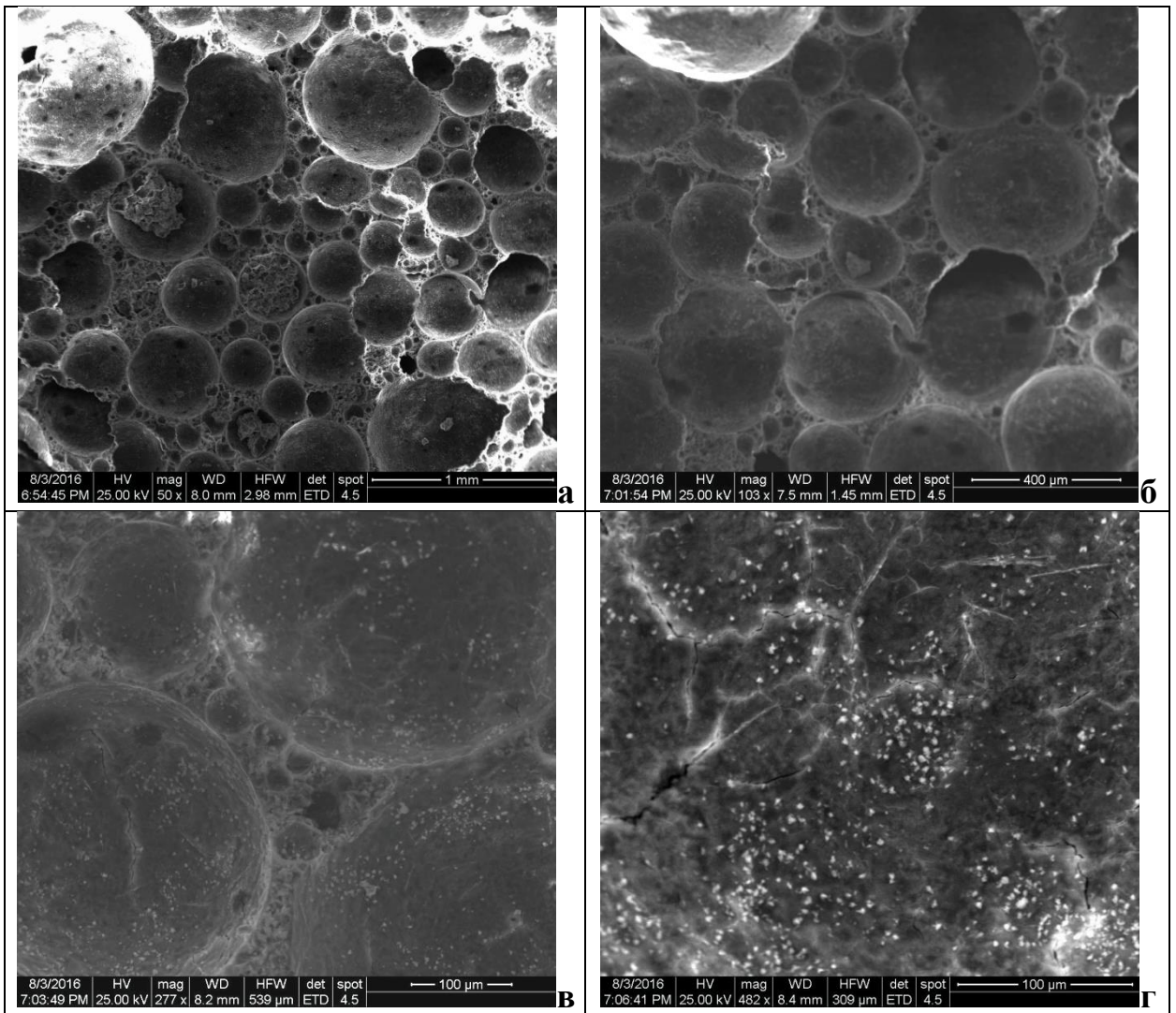
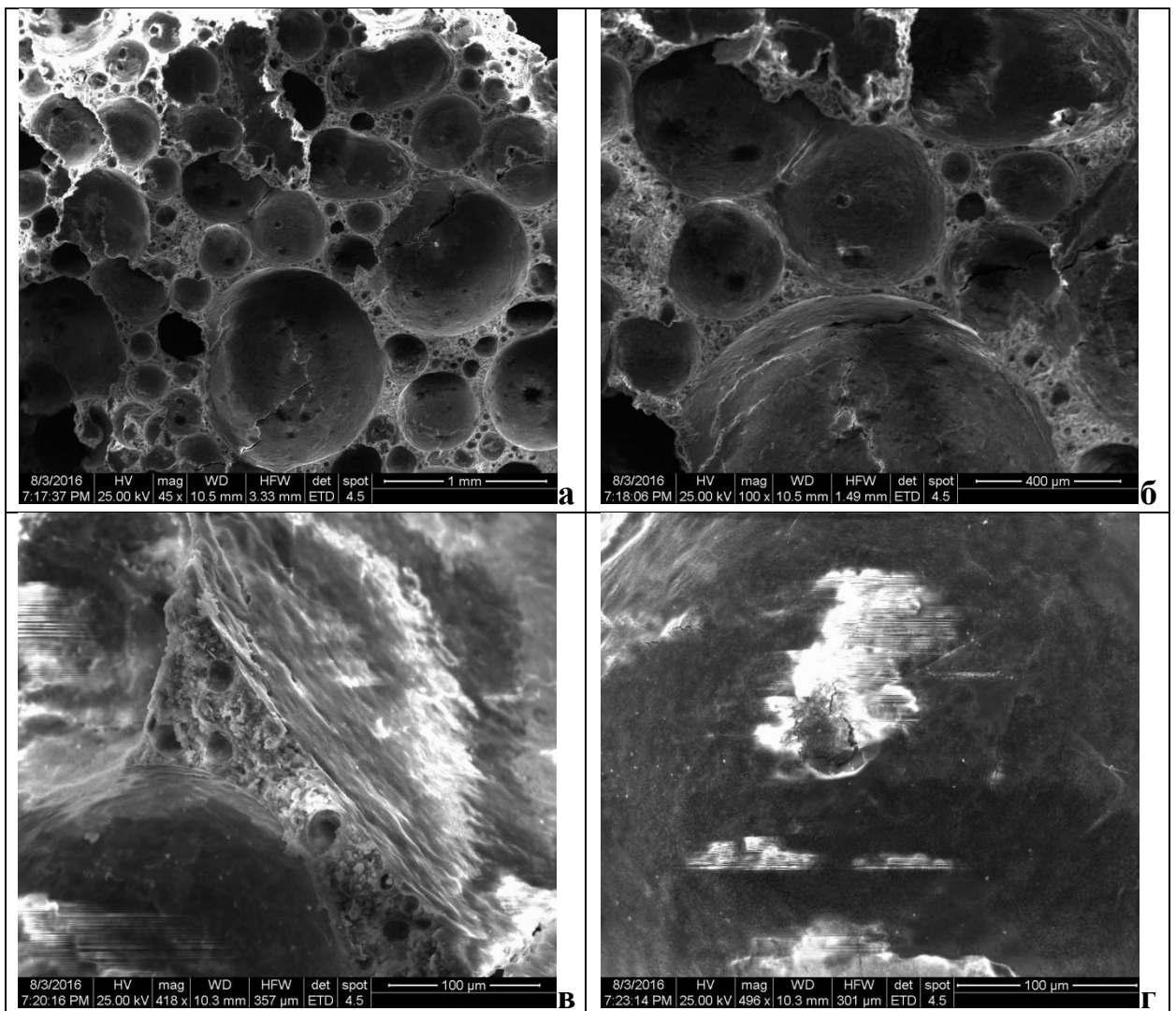


Рисунок 4.2.16 - Структура пенобетона с тонкодисперсным шлаком состава 2 после ТВО в возрасте 28 суток: а – макроструктура; б, в - микроструктура; г – внутренняя поверхность поры.

На 3 этапе исследована структура пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) в возрасте 28 суток после ТВО и нормального твердения (рисунок 4.2.17, 4.2.18).



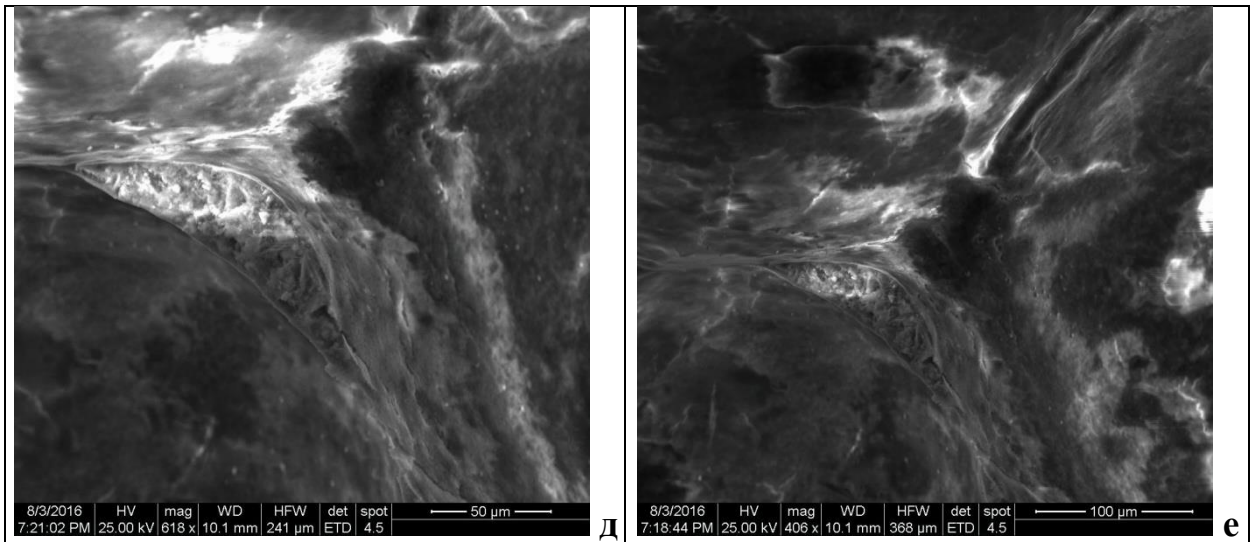
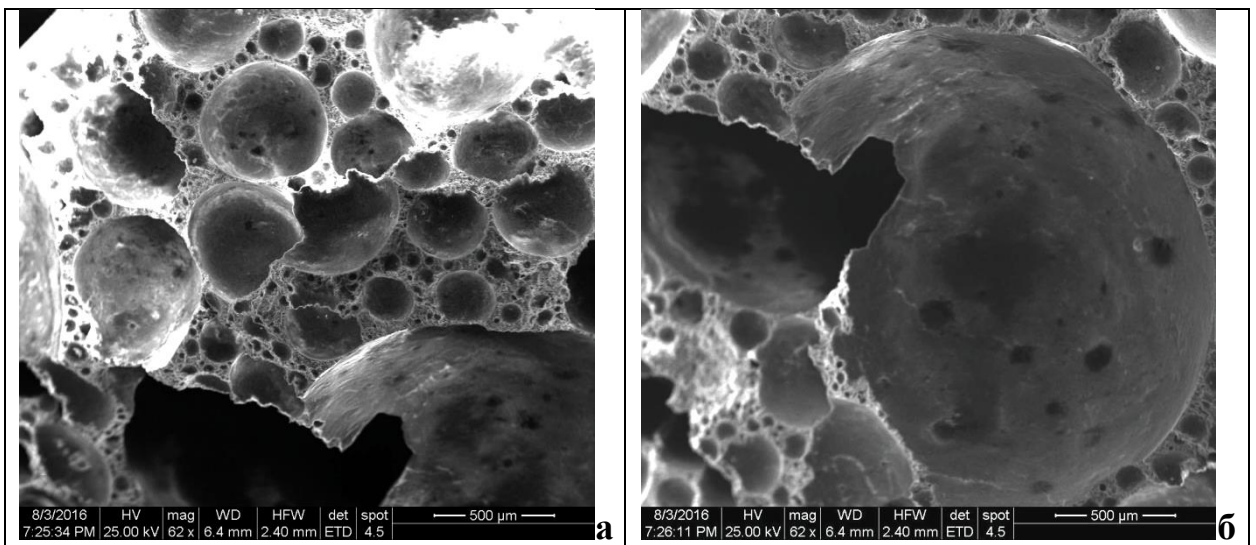


Рисунок 4.2.17 - Структура пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) после нормального твердения в возрасте 28 суток: а – макроструктура; б, в - микроструктура; г – внутренняя поверхность поры; д, е - микроструктура межпоровых перегородок.



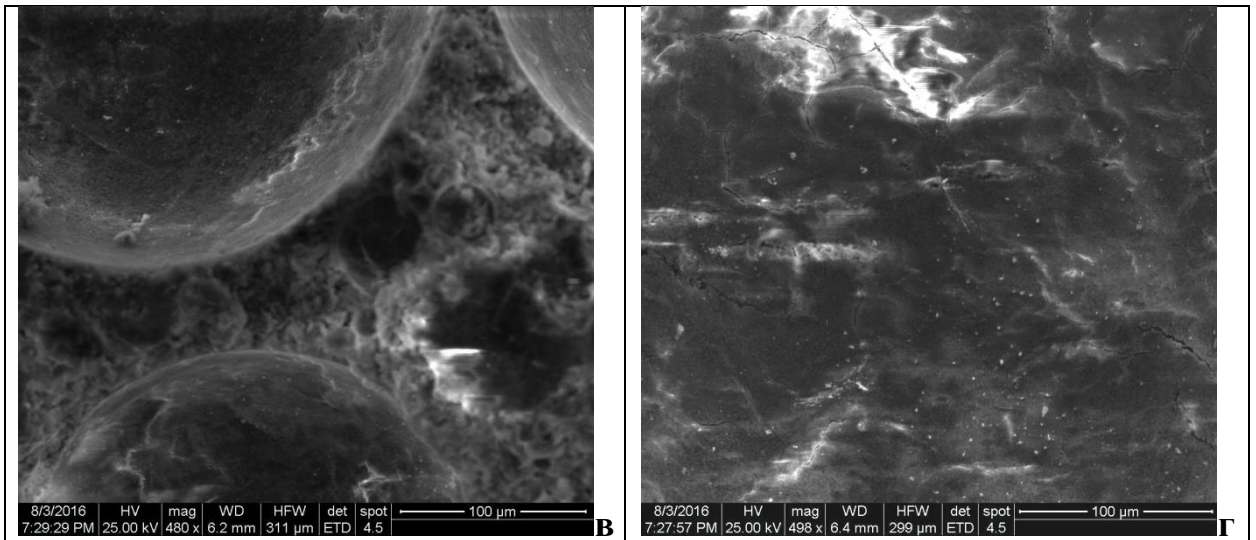


Рисунок 4.2.18 - Структура пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) после ТВО в возрасте 28 суток: а – макроструктура; б, в – микроструктура; г – внутренняя поверхность поры.

Анализ макро- и микроструктуры сколов образцов пенобетона контрольного состава 1, с тонкодисперсным шлаком состава 2 и с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» состава 8, представленных на рисунках 4.2.13-4.2.18 позволяют сделать следующее заключение. При введении в состав пенобетона тонкодисперсного шлака структура перегородок между порами становится плотнее, чем у контрольного состава. В свою очередь, у состава с комплексным модификатором структура указанных перегородок становится еще плотнее. Следует отметить, что введение шлака, а затем компонентов состава 8, позволило максимально уплотнить структуру и сделать ее более однородной. Это дало возможность определить у полученного модифицированного пенобетона однородную пористую структуру с равномерно распределенными воздушными порами разных диаметров: от 20 до 200 мкм. Размеры воздушных пор пенобетона контрольного состава 1 равны от 30 до 625 мкм, что обеспечивает существенное снижение коэффициента теплопроводности у пенобетона состава 8. Установлено, что

структура перегородок между порами становится плотнее и существенно прочнее за счет частиц микрокремнезема, метакаолина, тонкодисперсного шлака и тонких прослоек гидратных фаз цементного камня. Эти дисперсные компоненты равномерно распределены по объему пенобетона и создают рациональную упаковку межпоровых перегородок, делая ее оптимальной благодаря трехуровневой модификации структуры.

4.3. Строительно-технические свойства модифицированного пенобетона рационального дисперсного состава: прочность, коэффициент теплопроводности

Как уже отмечалось, модификация структуры пенобетона была проведена за счёт применения химических и минеральных (т.е. органо-минеральных) добавок-модификаторов. В роли химического модификатора пластифицирующего действия был использован суперпластификатор С-3 в количестве 0,6 %. Одновременно вводился другой химический модификатор-ускоритель твердения «АС» в количестве 0,07 % от массы портландцемента. В качестве минеральных модификаторов - тонкодисперсный шлак Новолипецкого металлургического комбината с оптимальной дисперсностью [53,186]. Удельная поверхность указанного тонкодисперсного шлака превышает на 140 - 150 м²/кг удельную поверхность портландцемента. Введение тонкодисперсного металлургического шлака составляет первый уровень оптимизации состава пенобетона – его рационального дисперсного состава. Размеры частиц тонкодисперсного шлака позволяют им распределяться в пустотах между частицами цемента, как отмечает П.П. Дерягин [186].

Использовался модификатор бетона МБ-Б-II-2 с удельной поверхностью 1500 м²/кг, которая почти в 5 раз превышала дисперсность портландцемента. Использование МБ-Б-II-2 составляет второй уровень оптимизации состава пенобетона – его рационального дисперсного состава. Между частицами в пустотах многокомпонентного цемента (портландцемент + тонкодисперсный шлак) распределялся по одной или две частицы размером 3 - 5 мкм модификатора МБ-Б-II-2. При этом, пустотность системы уменьшилась на 3-4 %.

Третий уровень оптимизации состава пенобетона или его рационального дисперсного состава обеспечивался за счёт применения микрокремнезёма. Его дисперсность была 20000 - 30000 м²/кг [185], и как

было означено ранее, за счет поверхностных сил частицы микрокремнезёма обволакивают более грубодисперсные частицы портландцемента, тонкодисперсного шлака и модификатора МБ-Б-II-2. Часть их распределяется в пустотах между частицами модификатора МБ-Б-II-2, образуя самоорганизованную наноструктуру цементного камня. Многоуровневая оптимизация состава пенобетона создаёт его рациональный дисперсный состав, что обеспечивает суммарное снижение его межчастичной пустотности на 12 %.

Авторы работ [187-196] при разработке теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного фибропенобетона на основе бесцементного наноструктурированного вяжущего вещества силикатного состава и теплоизоляционного пеногазобетона с наноструктурированным модификатором использовали силикаты для стабилизации пены и структуры ячеистобетонной системы. Эти работы проводились под руководством проф. В.В. Строковой.

В данной работе были проведены комплексные исследования пенобетона различного состава. Для всех составов выполнялось условие по одинаковой средней плотности. Марка пенобетона по средней плотности была принята D400. Результаты сравнения доменный шлак строительно-технических свойств пенобетона контрольного состава 1, состава 2 и состава 8 приведены в сводной таблице 4.3.1.

Для приготовления пенобетонной смеси использовались портландцемент ЦЕМ 1 42,5 Н (ПЦ 500-Д0) и пенообразователь ПБ–2000.

Были изготовлены серии образцов 8-ми составов. Прочность при сжатии определялась после ТВО в возрасте 1 и 28 суток и после нормального твердения в возрасте 28 суток. Также определялись коэффициент теплопроводности и влажностная усадка. Состав 1 был контрольным. Прочность образцов после ТВО в возрасте 1 суток представлена в 3 главе (таблица 3.6.1).

Таблица 4.3.1 – Сводная таблица строительно-технических свойств

№	Состав, мас. %	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут., МПа		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·С)		Усадка в возрасте 189 сут., мм/м	
		%		%		%	
		ТВО	НУ	ТВО	НУ	ТВО	НУ
1	Контрольный состав	$\frac{1,58}{100}$	$\frac{1,62}{100}$	$\frac{0,11}{100}$	$\frac{0,1}{100}$	$\frac{2,99}{100}$	$\frac{2,98}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак – 40	$\frac{2,05}{130}$	$\frac{2,09}{129}$	$\frac{0,085}{78}$	$\frac{0,078}{78,5}$	$\frac{2,6}{87}$	$\frac{2,67}{89,6}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор – 8 Ускоритель твердения - 0,07	$\frac{3,19}{202}$	$\frac{3,35}{207}$	$\frac{0,08}{73}$	$\frac{0,073}{73,5}$	$\frac{0,64}{21,5}$	$\frac{0,68}{23}$

Таким образом, экспериментальные исследования показали, во-первых, значимое снижение коэффициента теплопроводности пенобетона (на 26,5...27 %) при использовании тонкодисперсного шлака со смешанным состоянием (аморфное и кристаллическое) и высокодисперсных аморфных метаксаолина и микрокремнезема, выполняющих роль «рассеивающих экранов» для фононов. Коэффициент теплопроводности также снизился за счёт формирования однородной пористой структуры с равномерно распределенными воздушными порами диаметров от 20 до 200 мкм, исключая конвективную составляющую теплопереноса, что значительно меньше, чем у пенобетона контрольного состава 1, с диаметрами воздушных пор от 30 до 625 мкм.

Во-вторых, модифицированный пенобетон с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) обеспечивает прирост прочности в 2 раза за счёт формирования однородной плотной структуры межпоровых перегородок, состоящих из тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, этtringита и др. Это обеспечивается рациональным дисперсным составом частиц цемента, метаксаолина и микрокремнезема, а также наличием суперпластификатора С-3, ускорителя твердения «АС» и гипса. Определено, что для образцов пенобетона с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» (состав 8) минимальная толщина межпоровой перегородки составляет 23,3-24,8 мкм. Для образцов пенобетона с

тонкодисперсным шлаком (состав 2) минимальная перегородка между воздушными порами была равна 30,3-32,5 мкм, а минимальная толщина цементной перегородки между воздушными порами для контрольного состава 1 составляет 40,2-42,8 мкм.

В-третьих, высокая прочность модифицированного пенобетона, рациональный дисперсный состав (состав 8), наличие ускорителя твердения «АС» в начальный период формирования структуры пенобетонной массы и набора прочности обеспечивает значительное снижение усадки пенобетона в 4-5 раз по сравнению с контрольным составом. Причём, её значения составляют 0,64-0,65 мм/м. Эти значения ниже уровня требований ГОСТ к автоклавному газобетону.

Следовательно, трёхуровневая оптимизация дисперсного состава пенобетона с рациональным применением химических и минеральных минеральных модификаторов различной удельной поверхности обеспечивает большую реакционную способность твёрдых частиц матрицы (с учетом протекания пуццолановой реакции) и получение высокой прочности. Кроме того, использование минеральных модификаторов обеспечивает одновременно низкие значения усадки и теплопроводности пенобетона.

4.4. Строительно-технические свойства пенобетона: влажность, водопоглощение, водостойкость, деформации усадки во времени

При эксплуатации зданий важное значение имеют такие свойства, как водопоглощение, водостойкость, влажность пенобетона. От них во многом зависят надёжность сооружения и его теплозащитные показатели. Результаты представлены в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 – Водопоглощение, водостойкость, влажность

№	Состав, мас. %	$W_m, \%^1$	K_p^2	Влажность по массе, %, в возрасте					
				1	28	56	90	150	180
Твердение в нормальных условиях									
1	Контрольный состав	$\frac{52,4}{100}$	$\frac{0,75}{100}$	-	$\frac{20,7}{100}$	$\frac{14,4}{100}$	$\frac{10,6}{100}$	$\frac{8,1}{100}$	$\frac{7,4}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак - 40	$\frac{37,6}{71}$	$\frac{0,81}{108}$	-	$\frac{15,5}{74}$	$\frac{10,2}{70}$	$\frac{9,5}{89}$	$\frac{7,3}{90}$	$\frac{6,6}{89}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор – 8 Ускоритель твердения - 0,07	$\frac{25,8}{49}$	$\frac{0,84}{112}$	-	$\frac{14,9}{71}$	$\frac{9,1}{63}$	$\frac{7,6}{71}$	$\frac{6,1}{75}$	$\frac{5,3}{71}$
После ТВО									
1	Контрольный состав	$\frac{54,4}{100}$	$\frac{0,74}{100}$	$\frac{22,4}{100}$	$\frac{15,2}{100}$	$\frac{12,3}{100}$	$\frac{10,3}{100}$	$\frac{7,9}{100}$	$\frac{7,2}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак - 40	$\frac{38,5}{70}$	$\frac{0,802}{108}$	$\frac{17,6}{78}$	$\frac{14,9}{98}$	$\frac{10}{81}$	$\frac{9,2}{89}$	$\frac{7,1}{93}$	$\frac{6,3}{87}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор – 8 Ускоритель твердения - 0,07	$\frac{29,9}{54}$	$\frac{0,834}{112}$	$\frac{16,4}{73}$	$\frac{11,7}{76}$	$\frac{8,9}{72}$	$\frac{7,1}{68}$	$\frac{5,8}{73}$	$\frac{5,1}{70}$

1 - W_m - водопоглощение в возрасте 28 суток, %;

2 - K_p – коэффициент размягчения в возрасте 28 суток.

Очевидно, что значительное уплотнение и упрочнение перегородок между пузырьками воздуха и повышение прочности пенобетона оказывает влияние на его гидрофизические свойства. Было определено, что у модифицированного бетона состава 8 водопоглощение по массе снизилось в 2 раза, а коэффициент размягчения равен 0,84 и 0,834 против 0,75 и 0,74 у контрольного состава для обоих условий твердения соответственно. Для состава 2 и состава 8 значение коэффициента размягчения превышают требования ГОСТ для наружных несущих стеновых конструкций. У контрольного состава 1 этот показатель не соответствует стандарту.

Водопоглощение по массе у модифицированного пенобетона равно 25,8 и 29,9 % для образцов после 28 суток нормального твердения и после ТВО соответственно. Эти показатели у контрольного состава 1 равны 52,4 и 54,4 %.

Известно, что для пенобетона неавтоклавного твердения с маркой по средней плотности D400 деформация усадки не нормируется. Однако, для повышения надежности ограждающих конструкций была определена усадка для такого пенобетона в течение 180 суток.

Деформация усадки пенобетона изучалась по ГОСТ 24544-81. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. - на образцах размерами 10x10x40 см. До начала испытания образцы хранились в горизонтальном положении в воде трое суток. Линейные деформации определяли с помощью индикатора часового типа, который

Таблица 4.4.2 – Деформация усадки пенобетона во времени

№	Состав, мас. %	Деформация усадки, мм/м								
		3	14	28	56	84	120	140	156	180*
Твердение в нормальных условиях										
1	Контрольный состав	0,13	0,49	$\frac{0,82}{100}$	1,46	1,95	$\frac{2,53}{100}$	2,88	2,98	$\frac{2,98}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак - 40	0,12	0,39	$\frac{0,71}{86}$	1,24	1,68	$\frac{2,43}{96}$	2,68	2,67	$\frac{2,67}{89,6}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор – 8 Ускоритель твердения - 0,07	0,066	0,18	$\frac{0,37}{45}$	0,511	0,624	$\frac{0,662}{26}$	0,67	0,68	$\frac{0,68}{23}$
После ТВО										
1	Контрольный состав	0,127	0,48	$\frac{0,81}{100}$	1,44	1,93	$\frac{2,511}{100}$	2,98	2,99	$\frac{2,99}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак - 40	0,11	0,37	$\frac{0,72}{88}$	1,23	1,67	$\frac{2,33}{92}$	2,678	2,61	$\frac{2,6}{87}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 Комплексный модификатор – 8 Ускоритель твердения - 0,07	0,065	0,178	$\frac{0,36}{44}$	0,502	0,62	$\frac{0,622}{24}$	0,63	0,64	$\frac{0,64}{21,5}$

- под чертой за 100 % принято усадка контрольного состава 1.

имел цену деления 0,002 мм. Испытания и хранение образцов производились при температуре (20±2) °С и относительной влажности воздуха (60±5) %. Результаты измерений усадки пенобетона даны в таблице 4.4.2. Приводятся значения усадки пенобетона трёх составов (1, 2,8) и двух условий твердения.

Усадка измерена в течение 180 дней на образцах после ТВО и после нормальных условий твердения. Усадка образцов контрольного состава принята за 100 %.

При анализе результатов таблицы 4.4.2 установлено, что деформация усадки пенобетона всех составов стабилизируется за 140 дней, а становится неизменной на 156 день. Было определено, что у оптимального модифицированного состава 8 усадка уменьшается на 78,6 % и 77 % (0,64 и 0,68 мм/м) после ТВО и после твердения в нормальных условиях соответственно по сравнению с контрольным составом 1.

Снижение водопоглощения по массе в 2 раза и значения коэффициента размягчения больше 0,8 для модифицированного пенобетона марки по средней плотности D400 позволяют значительно повысить надежность ограждающих конструкций и гарантировать стабильность теплотехнических показателей в течение эксплуатации.

4.5. Выводы по главе 4

1. Разработаны научные решения трёхуровневой оптимизации дисперсного состава пенобетона с рациональным применением химических и разномодисперсных минеральных модификаторов. Это обеспечивает высокую реакционную способность твёрдых частиц и прочность матрицы, низкие значения деформации усадки, рациональный дисперсно-гранулометрический состав твёрдых частиц пенобетона. Такие параметры компонентов пенобетона уменьшают межчастичную и межзерновую пустотность на 9-12 %, обеспечивая при этом повышение прочности в 2 раза, однородность структуры и теплотехническую однородность, водостойкость (на 12 %), а также значимое снижение водопоглощения (до 2 раз), влажности (на 29...30 %), коэффициента теплопроводности (на 26,5...27 %) и деформацию усадки (в 4-5 раз).

2. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что введение в дисперсный состав пенобетона тонкодисперсного доменного шлака со смешанным состоянием (аморфное и кристаллическое в плотном контакте) и высокодисперсных аморфных метакаолина и микрокремнезёма, выполняющих роль «рассеивающих экранов» для фононов, значительно снижает теплопроводность пенобетона. Коэффициент теплопроводности модифицированного пенобетона снижается также за счёт формирования однородной тонкодисперсной ячеистой структуры с равномерно распределёнными пузырьками воздуха диаметрами от 20 до 200 мкм, исключая конвективную составляющую. Размеры ячеек пенобетона контрольного состава – 30-625 мкм.

3. Структурные исследования показали, что пенобетон модифицированный тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ), СП С-3 и ускорителем твердения «АС» обеспечивает формирование плотной структуры межпоровых перегородок, состоящих из тоберморитоподобных гидросиликатных фаз кальция, этtringита, снижающего деструктивные

процессы на начальной стадии синтеза прочности цементного камня, портландита и др. Минимальная толщина перегородок между ячейками модифицированного пенобетона составляет 23,3-24,8 мкм, контрольного состава - 40,2-42,8 мкм. Таким образом, параметры структуры ячеек (уменьшение размера в 1,5-3 раза, толщины перегородок в 2 раза и значимое повышение их плотности) модифицированного пенобетона и обеспечивают главным образом повышение его прочности более чем в 2 раза относительно контрольного состава.

4. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что высокая прочность модифицированного пенобетона, рациональный дисперсный состав, наличие ускорителя твердения «АС» (наиболее значимый фактор), обеспечивающего расширяющий эффект при твердении в начальный период формирования структуры значительно снижает деформации усадки (в 4-5 раз) по сравнению с контрольным составом марки по средней плотности D400. При этом её абсолютные значения составляют 0,64-0,65 мм/м, т.е. на уровне автоклавного газобетона. Деформация усадки модифицированного пенобетона стабилизируется на 140 сутки, на 156 становится постоянной.

5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Внедрение результатов работы

Результаты исследований были внедрены в 2016 году в ООО «МЦМ-стоун». Модифицированный пенобетон с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения марки по средней плотности D400 применен при строительстве индивидуального жилого дома, что подтверждается актом внедрения (приложение 1). Объём внедрения составил 250 м³.

При лабораторных исследованиях модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения в возрасте 28 суток получены результаты:

- средняя плотность – 389 кг/м³;
- марка по средней плотности – D400;
- предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток – 3,22 МПа,
- класс по прочности - B2,5;
- марка по морозостойкости - F75;
- влажность по массе в возрасте 180 суток - 5,14 %;
- коэффициент теплопроводности- 0,08 Вт / (м·С);
- усадка в воз-расте 189 сут. - 0,64 мм/м;
- водопоглощение по массе в возрасте 28 суток – 29,2 %;
- коэффициент размягчения в возрасте 28 суток – 0,84.

5.2. Техническая и экономическая эффективность модифицированного пенобетона

В РФ, как указывалось ранее, в 2015 году объём производства автоклавного и неавтоклавного ячеистого бетона был 9,1 млн. м³ и 5,5 млн. м³ соответственно и составил 14,6 млн. м³ или 23,7 млн. м², т.е. 20,1 % от общей площади жилья (85 млн. м²), построенной в стране. По данным [47,48] производство ячеистого бетона в 2020 году достигнет 15 млн. м³ автоклавного твердения, 8,1 млн. м³ - неавтоклавного, что в пересчете на квадратные метры общей площади составит 36,16 млн. м² или 25 % от общего объема ввода жилья.

Ячеистый бетон автоклавного твердения обладает пониженной трещиностойкостью и морозостойкостью, имеет меньшую усадку, быстро набирает отпускную прочность. Но есть недостатки: высокая металлоемкость и сложность и высокая стоимость автоклавного оборудования. Долговечность изделий снижается из-за большого количества микродефектов в структуре. Автоклавное производство ячеистого бетона имеет высокие затраты электроэнергии и характеризуется дороговизной.

При производстве пенобетона неавтоклавного твердения затраты электроэнергии значительно ниже.

Анализ технико-экономических показателей работы заводов по производству ячеистого бетона были опубликованы М.Н. Гиндиным и М.Н. Гиндиным с У.Х. Магдеевым [202, 203]. По их методике был сделан расчёт эффективности производства модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения. Она была рассчитана, а её результаты приведённые в таблице 5.2.1.

Капитальные вложения таблицы 5.2.1 были рассчитаны при размещении оборудования в существующем цехе. Величина капиталовложений принята равной стоимости оборудования с коэффициентом 1,5. Для расчёта эффективности производства были

выбраны два завода автоклавного и неавтоклавного производства годовой мощностью 200 тыс. м³.

Таблица 5.2.1 - Техничко-экономические показатели цехов

Показатели	Стоимость затрат по цехам тыс. руб.	
	Автоклавная технология	Неавтоклавная технология
Годовая мощность завода, тыс. м ³	200	200
Стоимость оборудования	252000	108000
:в том числе:		
участок приёма и обработки исходных компонентов состава	72000	7200
участок дозирования с участком приготовления пены и пенобетонной массы	10800	10800
участок резки изделий	6000	6000
бортоснастка и поддоны	25800	24000
Автоклавное отделение	114000	-
Пропарочные камеры	-	30000
Средняя плотность бетона, кг/м ³	400	400
Расход цемента, кг на 1 м ³ изделий	385	160
Расход пара, кг на 1 м ³ изделия	260	220
Расход электроэнергии, кВт/м ³	24	10
Количество работающих, чел	34	28
Себестоимость изделий, в том числе: амортизационные отчисления и затраты на эксплуатацию	30600	43200
Затраты на пенообразователь и добавки	4200	960
Затраты на пенообразователь и добавки	1500	4800
Капиталовложения	482100	190800

По результатам исследований была предложена технология получения модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения. Технологическая схема производства приведена на рисунке 5.2.1.

В состав компонентов входят: пенообразователь ПБ 2000, портландцемент Цем 1 42,5 Н или ПЦ 500-Д0 ОАО «Старооскольский цементный завод», тонкодисперсный доменный гранулированный шлак, микрокремнезём, метакаолин, модификатор бетона МБ-Б-II-2, ускоритель твердения АС.

Марка по средней плотности получаемого пенобетона - D400.

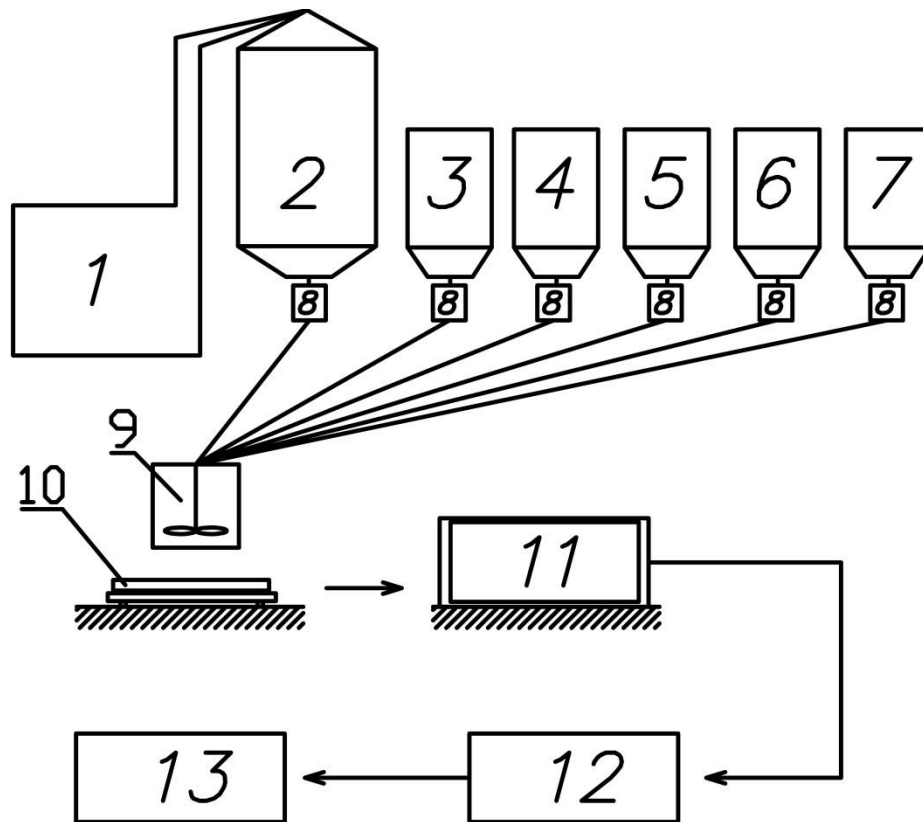


Рисунок 5.2.1 – Технологическая схема производства модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения.

Технологическая линия включает:

- 1 – ленточные транспортёры к расходным бункерам;
- 2 - бункер портландцемента;
- 3 - бункер комплексного модификатора (КМ);
- 4 – бункер тонкодисперсного доменного шлака;
- 5 – бункер для ускорителя твердения;
- 6 – бункер микрокремнезёма;
- 7 – ёмкость для воды;
- 8 – дозаторы по массе;
- 9 – пенобетоносмеситель;
- 10 – бортоснастка для формования массива;
- 11 – пропарочная камера для ТВО;
- 12 – участок разрезки массива на блоки;
- 13 – склад готовой продукции.

Пенобетон приготавливается в бетоносмесителе-активаторе объёмом 1000 литров. Скорость вращения вала на внешнем радиусе лопатки должна быть не менее 800 об./мин.

Технология приготовления пенобетона была следующей:

- дозировка по массе компонентов смеси;
- приготовление пены в бетоносмесителе-активаторе;
- введение компонентной смеси;
- . приготовление пенобетонной массы в течение 2 минут;
- укладка пенобетонной массы в бортоснастку;
- твердение в условиях тепловлажностной обработки (ТВО) в пропарочной камере по режиму 6+3+6+2 часов при температуре изотермической выдержки (80 ± 5) °С;
- разрезка массива на блоки;
- перемещение блоков на склад готовой продукции

Была рассчитана эффективность завода по производству модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения мощностью 200 тыс. м³ в год [202, 203]. ,

По капиталовложениям, расчётная эффективность составляет более 290 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано научное решение создания рационального дисперсного состава неавтоклавного модифицированного пенобетона за счёт многоуровневой оптимальной упаковки твёрдых частиц с минимальной прослойкой гидратных фаз цементного камня, что позволило получить максимально стеснённые условия формирования структуры плотных межпоровых перегородок, высокую прочность, низкую теплопроводность и усадку неавтоклавного пенобетона.
2. Разработано научное применения химических и минеральных модификаторов различной дисперсности. Это обеспечивает большую реакционную способность твёрдых частиц матрицы и получение высокой прочности, низкие значения усадки, рациональный дисперсно-гранулометрический состав твёрдых частиц пенобетонной смеси. Такой процесс уменьшает на 9-12 % пустотность между твёрдыми частицами, обеспечивая значимое повышение прочности (в 2 раза), однородности структуры, водостойкости (на 12 %), а также существенное снижение водопоглощения (до 2 раз), влажности (на 29-30 %), коэффициента теплопроводности (на 26,5-27 %), усадки (в 4-5 раз) пенобетона.
3. Использование микрокремнезема в пене повышает ее реологические свойства, а после перемешивания с модифицированной пенобетонной массой с ускорителем твердения обеспечивает получение однородной массы, способной к оптимально быстрому схватыванию и набору прочности ячеистой структуры с более тонкими, плотными и прочными перегородками между пузырьками воздуха.
4. Теоретически обосновано и установлено, что введение в дисперсный состав пенобетона тонкодисперсного доменного шлака со смешанным состоянием (аморфное и кристаллическое) и высокодисперсных аморфных метакаолина и микрокремнезёма, выполняющих роль «рассеивающих экранов» для фононов, существенно уменьшает коэффициент теплопроводности. Он также снижается за счёт формирования однородной

пористой структуры с равномерно распределенными воздушными порами диаметров от 20 до 200 мкм, исключаящими конвективную составляющую теплопроводности, что значительно меньше диаметров пор пенобетона контрольного состава (30-625 мкм).

5. Модифицированный пенобетон с тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС» обеспечивает прирост прочности в 2 раза за счёт формирования однородной плотной структуры межпоровых перегородок, состоящих из тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, этtringита и др. Минимальная толщина межячеистой перегородки для пенобетона оптимизированного состава с повышенными эксплуатационными свойствами составляет 23,3-24,8 мкм. Для пенобетона контрольного состава - 40,2-42,8 мкм.

6. Теоретическими исследованиями показано, что высокая прочность модифицированного пенобетона, а также рациональный дисперсный состав и наличие ускорителя твердения «АС» в начальный период формирования структуры пенобетонной массы обеспечивает значительное снижение усадки (в 4-5 раз) по отношению контрольного состава. Абсолютные значения усадки модифицированного пенобетона находятся на уровне 0,64-0,65 мм/м, или на уровне требований к автоклавному газобетону.

7. Деформация усадки модифицированного пенобетона стабилизируется на 140 день, на 156 день становится постоянной. Установлено, что усадка оптимального модифицированного состава уменьшается относительно усадки контрольного состава на 78,6 % и 77 % (0,64 и 0,68 мм/м) после ТВО и твердения в НУ соответственно.

8. Разработана технология получения модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным составом неавтоклавного твердения, включая подбор и оптимизацию состава. Разработаны технические условия – «Модифицированный неавтоклавный пенобетон с рациональным дисперсным составом. ТУ 5741-005-29888514-2016». Осуществлено внедрение модифицированного пенобетона с рациональным дисперсным

составом неавтоклавного твердения при кладке наружных стен жилого дома в г. Москве. Объем пенобетона составил 250 м³.

Рекомендации, разработанные в настоящей диссертации, по рациональному дисперсному составу неавтоклавного модифицированного пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами, обеспечивающему его высокое качество, могут быть применены при проектировании и строительстве монолитных ограждающих конструкций, в том числе с несъемной опалубкой.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации возможны в создании научных положений по дальнейшему совершенствованию дисперсного состава неавтоклавного модифицированного пенобетона, в т.ч. с использованием положений теории вероятности, с целью более значимого повышения строительно-технических свойств и увеличения объемов его применения в строительстве, в частности, монолитном.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горлов Ю.П., Меркин А. П., Устенко А. А. Технология теплоизоляционных материалов. - М.: Стройиздат. - 1980. - 399 с.
2. Гусенков С.А., Удачкин В.И., Галкин С.Д., Ерофеев В.С. Теплоизоляционные и стеновые изделия из безавтоклавного пенобетона // Строительные материалы. - 1999. - № 4. - С.10-11.
3. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. - М.: Стройиздат. - 1986. - 688 с.
4. Сахаров Г.П., Стрельбицкий В.П., Воронин В.А., Скориков Е.П. Неавтоклавный поробетон для однослойных ограждающих конструкций зданий / Мат. конф. «Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. - М.: НИИСФ, 2000. – С. 23-242.

5. Воронин В.А. Неавтоклавный конструкционно-теплоизоляционный поробетон повышенной прочности и энергоэффективности. - Дисс. канд. техн. наук. - М.: МГСУ. – 2001. – 116 с.
6. Нгуен Тхань Туан, Орешкин Д.В. Исследование структуры газобетона для жилищного строительства Вьетнама // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - № 3. – С. 169-172.
7. Нгуен Тхань Туан, Орешкин Д.В. Технические свойства автоклавного и неавтоклавного газобетона // Вестник ИрГТУ. – 2014. - № 8. – С. 100-103.
8. Нгуен Тхань Туан, Орешкин Д.В. Подбор и оптимизация состава неавтоклавного газобетона для условий Вьетнама // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. - 2014. – Вып. 2. (www.vestnik.vgasu.ru).
9. Жабин Д.В. Свойства пенобетона в наших руках / Жабин Д.В., Соков В.Н. // Технологии интеллектуального строительства. – 2014. - Вып.1. С. 58-62.
10. Жабин Д.В. Создание эффективного пенобетона в гидротеплосиловом поле // Сб. научных трудов ИСА МГСУ (Вып.4): научные труды Международ. мо-лодеж. конф. «Оценка рисков и безопасность в строительстве» ФГБОУ ВПО «МГСУ». – М.: МГСУ, 2012 г. - С.31;
11. Жабин Д.В. Использование потенциальной энергии пеносистемы при получении пенобетона по скоростной технологии / Жабин Д.В., Соков В.Н. Бетон и железобетон: взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (ме-ждунар.) конф. по бетону и железобетону: в 7 т. Т.5. Новые эффективные бетоны и технологии. Лёгкие и ячеистые бетоны. РАН, РИА – Москва: МГСУ, 2014. – С. 261-271.
12. А.с. 748190 СССР, М. кл. 601 11/10. Конический пластометр / Г.Х. Вяльмяяэ, Б.И.Гордон, Г.П.Сахаров и др.- Бюл. № 26,1980.
13. Абаймов А. А. , Головнев С. Г. и др. Оценка энергетической эффективности зданий. Контроль соблюдения требований тепловой защиты наружных ограждающих конструкций. - Журнал БСТ.№3. - 2014, - С. 40.

14. Абдуганиев А.А. Способ производства изделий из ячеистого бетона пенофлотационным методом: автореф. дис...канд. техн. наук. / А.А. Абдуганиев; МИСИ. - М., 1972.- 14 с.
15. Горчаков Г.И. Строительные материалы. - М.: Стройиздат. - 1981. - 420 с.
16. Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Савин В.И., Воронин В.В., Алимов Л.А., Новикова И.П. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
17. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение / А.А. Абрамзон, Л.П. Зайченко, С.И. Файнгольд. - Л.: Химия, 1988.- 200 с.
18. Автоклавный ячеистый бетон: Пер. с англ. / Ред.совет: Г.Бове (пред.) и др.- М.: Стройиздат, 1981. - 88 с.
19. Академия конъюнктуры промышленных рынков. Время производить газобетон // Интернет-портал VashDom.Ru. 24.01.2008.
20. Алешин С. Н., Амелин М. К., Волгин Н.Н. и др. Производство газозолобетонных панелей с термообработкой электропрогревом. - М.: Стройиздат, 1971. - 200 с.
21. Арбенъев А.С. Бетонирование в зимних условиях с электроразогревом бетонной смеси. - М.: Стройиздат, 1963. - 35 с.
22. Афанасьев Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко.- Киев: Будивэльник, 1989. - 128 с.
23. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981.- 464 с.
24. Ахундов А.А., Гудков Ю.В., Иваницкий В.В. Пенобетон -эффективный стеновой и теплоизоляционный материал // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 1999. - № 2. - С. 10-11.
25. Бабушкин В.И., Кондращенко Е.В. Пенобетонные смеси ускоренного твердения на безгипсовом цементе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова «Пенобетон-2003». - 2003.- № 4. - с. 69–72.
26. Моргун Л.В. Анализ структурных особенностей пенобетонных смесей // Строительные материалы. - 2005. - № 12. - С. 44-46.

27. Баранов А.Т. Прогрессивные решения в технологии ячеистых бетонов // Экспресс-информация. Отечественный опыт. Сер.8: Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. Вып.2. ВНИИЭСМ, 1987. - С. 39.
28. Шахова Л.Д., Черноситова Е. С. Ускорение твердения пенобетонов // Строительные материалы. - 2005 . - № 5. - С. 3-7.
29. Бахтибаев А.Н., Бетехтин В.Н. и др. Воздействие давления на пористость прочностные свойства цементного камня в сб. науч. трудов «Физические основы прочности и пластичности» – Н.Новгород: 1990.
30. Баширов Х.З., Жиров А.С. Легкобетонные слоистые конструкции повышенной эксплуатационной надежности // Бетон и железобетон. -2003, - №5. - С. 2.
31. Бегляров А.Э. Эффективные стеновые монолитно-слоистые изделия объёмного прессования. Дисс... канд. техн. наук – М.: МГСУ, 2011.
32. Бернацкий Н.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. / Электрические свойства бетона. – М.: Энергия, 1980.
33. Брюшков А.А. Пенобетон ПБ ячеистый бетон / А.А. Брюшков // Всесоюзное общество рационализаторов строительства: тез. докл. - М.: 1932. - С.14-18.
34. Бужевич Г.А. и др. Технология и свойства новых видов легких бетонов на пористых заполнителях. - М.: Стройиздат, 1971. - с.173.
35. Бутт Ю.М., Рашкович М.Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. - М.: Госстройиздат, 1961. – 210 с.
36. Орешкин, Д.В. Полые микросферы – эффективный наполнитель для строительных и тампонажных растворов / Д.В. Орешкин, К.В. Беляев, В.С. Семенов, У.Е. Кретьова // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 9. – С. 50–51
37. Орешкин, Д.В. Теплофизические свойства, пористость и паропроницаемость облегченных цементных растворов / Д.В. Орешкин, К.В. Беляев, В.С. Семенов // Строительные материалы. – 2010. – № 8. – С. 51–54.

38. Орешкин Д.В., Перфилов В.А., Беляев К.В., Первушин Г.Н. Комплексная оценка трещиностойкости цементных материалов. – М.: МГСУ. - 2012. – 208 с.
39. Жабин Д.В. Активированный электрогидросиловым полем неавтоклавный пенобетон. Дисс... канд. техн. наук. – М. -, 2014. – 233 с.
40. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
41. Федеральная целевая программа «Жилище» на 2016—2020 годы.
42. Федеральный закон № 261-ФЗ от 23.11.2009г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».
43. Производство стройматериалов. Итоги 2010 года, прогноз на 2011 год // ЖБИ и конструкции. 20.03.2011.
44. Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.// <http://gisee.ru/>
45. Абаимов А.А., Головнев С.Г. и др. «Оценка энергетической эффективности зданий. Контроль соблюдения требований тепловой защиты наружных ограждающих конструкций» журнал БСТ. № 3/2014. - С. 40.
46. Методические рекомендации по установлению характеристик жилья экономического класса в отношении жилых домов, строительство которых осуществляется с использованием средств федерального бюджета. Приказ Минрегионразвития РФ № 79 от 27.02.2010.
47. Пинскер В.А. Состояние и проблемы производства и применения ячеистых бетонов // Ячеистые бетоны в современном строительстве: сб. докладов Междунар. науч.-практ.конф. - СПб, 2004.
48. Ухова Т.А. Настоящее и будущее ячеистых бетонов в России // Строительный журнал Весь Бетон. 10. 03.2011.
49. <http://www.bestresearch.ru/index.html>

50. Удачкин И.Б., Троцко Т.Т., Васильев В.В. и др. Баротехнология производства изделий из ячеистого бетона / Информ. листок НИИСМИ-«Реклама», 1983. - 18 с.
51. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Физматиздат. - 1963. - 708 с.
52. Вегенер Р.В. Электропрогрев бетонных и железобетонных конструкций. – М.-Л.: Гос. изд-во лит. по строит. и архит., 1953.
53. Величко Е.Г. Повышение эффективности использования минеральных модификаторов в бетоне путём оптимизации дисперсного состава многокомпонентного вяжущего. — Автореф. дисс. докт. техн. наук. - М.: МГСУ. - 1999.
54. Виноградов В.П. Небольшие предприятия по выпуску строительных изделий из неавтоклавного пенобетона // Строительные материалы. - 1992. - №10. - С. 5-6.
55. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов Б.Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. - М.: Стройиздат. - 1984. - 250 с.
56. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. - М.: Стройиздат. - 1986. - 464 с.
57. Вукалович М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение. - 1967. – 160 с.
58. Орешкин Д.В., Капцов П.В. Научно-технические предпосылки получения экструдированных облегченных цементных систем // Вестник МГСУ. - 2012. - № 3. – С. 115 - 119.
59. Капцов П.В. Свойства облегчённых изделий из экструдированных смесей при деформировании и разрушении // Вестник МГСУ. - 2013. - № 9. – С. 56 - 61.
60. Орешкин Д.В., Семенов В.С., Капцов П.В. Экструдированные облегченные кладочные растворы // Вестник Томского ГАСУ. - 2012. - № 3. – С. 159 - 163.

61. Орешкин Д.В., Семенов В.С., Капцов П.В. Свойства кладочных растворов на основе экструдированных растворных смесей // Строительные материалы. – 2012. - № 9. – С. 58 – 60.
62. Чан Минь Дык, Сахаров Г.П. Экструзионный мелкозернистый бетон. // Известия вузов. Строительство, 2008. - № 2. – С. 24-26.
63. Сахаров Г.П., Чан Минь Дык. Повышение свойств МЗБ экструдированием смесей. // Бетон и железобетон, 2009. - № 1. – С. 6-8.
64. Чан Минь Дык, Сахаров Г.П. Экструзионный мелкозернистый бетон // Всероссийский смотр научных и творческих работ иностранных студентов и аспирантов: Томск: апрель 2007.
65. Сахаров Г.П., Чан Минь Дык. Экструдированный мелкозернистый бетон. // Технологии бетонов. – 2009. - № 2. – С. 24-25.
66. Гендин В.Я. Электропрогрев в производстве железобетонных изделий и блоков. – М.: Госстройиздат. - 1961. – 125 с..
67. Гиббс Дж. Термодинамика. Статистическая механика. - М.: Наука, 1982. – 584 с.
68. Урьев Н.Б. Физико-химическая динамика дисперсных систем и материалов. Фундаментальные аспекты, технологические приложения. - М.: Интеллект. -2013. - 232 с.
69. Гладких К. В. Изделия из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол. - М.: Стройиздат, 1976. - 256 с.
70. Гладков Д. И. Вибровакуумная технология ячеистых бетонов Текст. / Д. И. Гладков, Л. А. Ерохина, Л. Х. Загороднюк // Бетон и железобетон .-1991. - № 9. - С. 13-14.
71. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. - М.: Издательство АСВ. - 2011. – 501 с.
72. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
73. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика.- М.: Наука. - 1979. – 381 с.

74. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. – М.: Химия. – 1983. – 263 с.
75. Чухланов В.Ю., Панов Ю.Т., Синявин А.В., Ермолаева Е.В. Газонаполненные пластмассы. – Владимир: Изд-во Вл ГУ. – 2007. – 130 с.
76. Handbook of Surface and Colloid Chemistry / Ed. K .S. Birdi. - 2nd ed. - N.Y.: CRC Press, 2003. - 765 p.
77. Сумм Б. Д. Основы коллоидной химии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Д. Сумм. — 2-е изд., стер. - М. : Издательский центр «Академия». - 2007. - 240 с.
78. Химическая энциклопедия. - М.: «Большая Российская Энциклопедия», 1998.
79. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. - Л.: Химия. - 1984. - 352 с.
80. Гурова Е.В. Технический пенообразователь на основе белкосодержащего сырья для производства неавтоклавного пенобетона.: дисс. канд. техн. наук.- Челябинск: 2002. - 172 с.
81. Иваницкий В.В., Бортников А.В., Гаравин В.Ю. и др. Новый вид пенообразователя для производства пенобетона. // Строительные материалы, 2001, №7,с. 12-15.
82. Иваницкий В.В., Бортников А.В., Гаравин В.Ю., Бугаков А.И. Новый вид пенообразователя для производства пенобетона // Строительные материалы. 2001. № 5. С. 35-36.
83. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Киселев Е.В. Белковый пенообразователь для ячеистых бетонов // Известия вузов. Строительство. 2000. №12. С. 31-33.
84. А.С. 1244124 А,1 М.Кл С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления бетонов/ Высоцкий С.А., Крылов Б.А.,Багров Б.О. и др.
85. А.С. 1399295 А,1. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации раствора / Мустафин Ю.И., Аббасханов Н.А., Ильченко Н.Г. и др.
86. А.С. 1413097 А,1. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для изготовления теплоизолирующего пенобетона / Мустафин Ю.И., Аббасханов Н.А., Ильченко Н.Г. и др.

87. А.С. 1454811 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для изготовления теплоизолирующего пенобетона / Близнюк Н.В., Мартыненко В.А., Пчелов Р.В. и др.
88. А.С. 148286 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь / Макарец А.В., Стельмах В.А., Фомин Ю.Е. и др.
89. А.С. 1486500 АД. М.Кл С04В 38/10. Сырьевая смесь для теплоизоляционного пенобетона / Близнюк Н.В., Пунагин В.Н., Мустафин Ю.И. и др.
90. А.С. 1528768 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Карнаухов Ю.П., Белых С.А., Карелина Е.А. и др.
91. А.С. 1546452 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразующая добавка для поризации бетонных смесей / Гавруцкий Ю.Е., Денисов А.В., Оренлихер Л.П. и др.
92. А.С. 1571039 АД. М.Кл С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления легкого бетона / Павленко С.И., Середкино О.Л., Мурадян К.С.
93. А.С. 1599350 АД. М.Кл С04В 38/10. Состав для монолитной теплоизоляции / Меркин А.П., Кобидзе Т.Е., Зудиев Е.А. и др.
94. А.С. 1604802 АД. М.Кл С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления легкого бетона / Чкалова В.П., Федин Г.П., Войтович В.А. и др.
95. А.С. 1643508 А,1. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Шварцман П.И., Филиппев А.А., Граник М.Ю. и др.
96. А.С. 1669901 А,1. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Близнюк Н.В., Сонько А.М., Невгомонный Г.И. и др.
97. А.С. 1669902 А,1. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Пчелов Р.В., Пунашек В.Н., Сонько А.М. и др.
98. А.С. 1671646 А,1. М.Кл С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления ячеистого бетона / Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Стрельников А.Н.
99. А.С. 1680676 АД. М.Кл С04В 38/10.1989 г. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Л.Е. Журавлева. / Илькова В.Ф., Демин Ю.А., Томиямо Ч.Х.

100. А.С. 1759821 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации легковесных огне-упорных изделий / Крючков Ю.Н., Ильченко И., Радченко О.И. и др.
101. А.С. 2084427 АД. М.Кл С04В 38/10. Аэрированный цементный раствор / Дулаев В.Х., Кеворков Е.А., Рябова Л.Н. и др.
102. А.С. 2086519 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для изготовления легкого бетона / Косых А.В., Карнаухов Ю.П., Синегибская А.Д.
103. А.С. 2086519 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Меос М.А., Зотова К.В., Крашенников О.Н.
104. А.С. 2127237 АД. М.Кл С04В 38/10. Способ получения пенобетона с использованием белкового пенообразователя / Виноградов А.Ю., Соколов Д.П., Соколова Е.А. и др.
105. А.С. 2131858 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонной смеси / Власенко И.Г., Удачкин И.Б., Гусенков С.А. и др.
106. Хитров А.В. Получение современных автоклавных пенобетонов с учетом природы вводимых строительных пен. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. - СПб.: ПГУПС. - 2000, - 29 с.
107. Патент РФ № 2205814. АД. М.Кл С04В 38/10. Смесь для ячеистого пенобетона / Сватовская Л.Б.; Соловьева В.Я.; Ковалев В.И.; Сапожников В.В.; Елизаров С.В.; Хитров А.В.; Чернаков В.А.; Сычева А.М.; Мартынова В.Д.
108. Кругляков П.М., Таубе П.Р. Влияние вязкости и концентрации растворов поверхностно-активных веществ на синерезис пен. - М.: Химия 1991. - 347с.
109. Зимон А.Д., Лещенко Н.Ф. Коллоидная химия. - М.: Агар. - 2001. -318 с.
110. Венстрем Е.К., Ребиндер П.А. К физике пен и эмульсий (к физике коллоидов, VI) // Журнал физ. химия. 1931. - Т.2. - С. 754-767.
111. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение. - М.: Химия. - 1981. - 304 с.
112. А.С. 2170718 АД. М.Кл С04В 38/10. Пенообразователь для поризации бетонных смесей / Бортников А.В., Гудков Ю.В., Ахундов А.А. и др.

113. А.С. 2086519 АД. М.Кл С04В 38/10. Пено-образователь для поризации бетонной смеси / Меос М.А., Зотова К.В., Крашенников О.Н.
114. А.С. 2139841 АД. М.Кл С04В 38/10. Строительный раствор / Сватовская Л.Б., Соловьева В.Я., Чернаков В.А. и др.
115. А.С. 2145315 АД. М.Кл С04В 38/10. Теплоизоляционный пенобетон / Сватовская Л.Б., Соловьева В.Я., Чернаков В.А., Овчинникова В.П., Хитров А.В., Сычева А.М.
116. А.С. 2188808 АД. М.Кл С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления пенобетона Со-ломатов В.И., Черкасов В. Д., Бузулуков В.И., Киселев Е.В., Меркушкин А.И.
117. Арбузов К.Н., Гребенщиков В.Н. К вопросу изучения устойчивости пены // Журнал физ. химии. - 1937. - Т. 10. - № 1. - С. 32 - 41.
118. Шелудко А. Коллоидная химия. - М.: Изд-во Иностранной литературы. - 1960. - 410 с.
119. Демченко Н.А., Кудря Т.П., Росколюдько В.Г. Межмолекулярное взаимодействие в водных растворах додецилсульфата натрия и моноалкилоламидов жирных кислот // Коллоидный журнал. - 1974. - Т.36. - С. 765-766.
120. Ерчиковский Г.О. Образование флотационной пены. - М.: ГОНТИ. - 1939. - 246 с.
121. ГОСТ 31359-2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2007.
122. ГОСТ 31360-2007. Изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2007.
123. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации,

техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2010.

124. ГОСТ 10180-2003. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: МНТКС, 2003.

125. Макридин Н.И., Королев Е.В., Вернигорова В.Н., Максимова И.Н. Физико-химические методы исследования свойств строительных материалов. - СПб.: Научно-промышленная энциклопедия России. Справочник. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Часть 2. – 2009. - С. 345-445.

126. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. – М.: Высшая школа. – 1981. – 335 с.

127. Powder Diffraction File, inorganic phases. – international centre for diffraction data. - USA: JCPDS, 2003.

128. Пауэрс Т. Физические свойства цементного теста и камня / IV Международный конгресс по химии цемента. – М. - 1964.

130. Максимова И.Н., Макридин Н.И. Структура и конструкционная прочность цементных композитов. Структурообразование и синтез прочности. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing. - 2012. – 174 с.

131. Taylor H.F.W. Cement chemistry. – New York: Thomas Telford. - 1997. – 459 p.

132. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Некоторые аспекты физикохимии и механики композитов многокомпонентных цементных систем // Строительные материалы. – 1997. - № 2. - С.21-25.

133. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир. - 1979. – 568 с.

134. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона (Госстрой СССР). - М.: Стройиздат. - 1981. - С. 47.

135. Кикоин Н.К., Кикоин И.Н. Молекулярная физика. - М.: Наука. - 1976. – 480 с.

136. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. - М.: Наука. - 1985. - 399 с.

137. Израелашвили Д. Межмолекулярные и поверхностные силы. – М.: Научный мир. - 2011. – 456 с.
138. Sabir B. B., Wild S. and Bai J. Metakaolin calcined clay as pozzolan for concrete: a review // *J of Cement and Concrete Composites* (23), 2001, pp. 441 – 454.
139. Ilich B.R., Mitrovich A.A., Milichch L.R. Termal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin. *Chem. ind.* 64 (4) 351–356 (2010).
140. Somi S. Humidity Intrusion Effects on Properties of Autoclaved Aerated Concrete Submitted to the Institute of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering. Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, North Cyprus – November, 2011.
141. Kakali G., Perraki T., Tsivilis S., Badogiannis E. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, *Appl. Clay Sci.* 20 (2001) 73–80.
142. Shvarzman A., Kovler K., Grader G.S., Shter G.E. The effect of dehydroxylation/ amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 405–416.
143. Kostuch J.A., Walters G.V., Jones T.R. High performance concrete incorporating metakaolin – a review, *Concrete* 2000 2 (1993) 1799–811.
144. Rahier H., Wullaert B., Van Mele B. Influence of the degree of dehydroxylation of kaolinite on the properties of aluminosilicate glasses, *J. Therm. Anal. Calorim.* 62 (2000) 417–427.
145. Arikan M., Sobolev K., Ertun T., Yeginobali A., Turker P. Properties of blended cements with thermally activated kaolin, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 62–70.
146. Badogiannis E., Kakali G., Tsivilis S. Metakaolin as supplementary cementitious material – Optimization of kaolin to metakaolin conversion, *J. Therm. Anal. Calorim.* 81 (2005) 457–462.

147. Нгуен Тхань Туан, Орешкин Д.В. Исследование структуры газобетона для жилищного строительства Вьетнама // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - № 3. – С. 169-172.
148. Нгуен Тхань Туан, Орешкин Д.В. Подбор и оптимизация состава неавтоклавного газобетона для условий Вьетнама // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. - 2014. – Вып. 2. (www.vestnik.vgasu.ru).
149. Нгуен Тхань Туан, Орешкин Д.В. Технические свойства автоклавного и неавтоклавного газобетона // Вестник ИрГТУ. – 2014. - № 8. – С. 100-103.
150. Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Новый органоминеральный модификатор серии МБ-ЭМБЭЛИТ для производства высококачественных бетонов // Бетон и железобетон – пути развития. Науч. тр. 2-ой Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону в 5 томах. – т. 3. - М.: Дипак. – 2005. - С. 672-680.
151. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформационными характеристиками // Бетон и железобетон, № 2. – 2006. - С. 2-6.
152. Ильичев В.А., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Лернер В.Г., Гильштейн С.Р. Монолитно-прессованная обделка из высокопрочного бетона // Подземное пространство мира, № 2-3. - 1999. - С. 37-41.
153. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Ферджулян А.Г., Пахомов А.В., Лившин М.Я. Опыт применения высокопрочных бетонов // Монтажные и специальные работы в строительстве, № 8, 2002. - С. 33-37.
154. Житкевич Р.К., Лазопуло Л.Л., Шейнфельд А.В., Ферджулян А.Г., Пригоженко О.В. Опыт применения высокопрочных модифицированных бетонов на объектах ЗАО «Моспромстрой»//Бетон и железобетон, № 2, 2005. - С. 2-8.
155. Каприелов С.С., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кузнецов Е.Н. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и

деформативность цементного камня и высокопрочного бетона. // Бетон и железобетон, № 3. – 2003. - С. 2-7.

156. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // Бетон и железобетон, № 6. – 2003. - С. 8-12.

157. Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Новый органоминеральный модификатор серии «МБ» – Эмбэлит для производства высококачественных бетонов. // Строительные материалы, № 8. – 2005. - С. 12-15.

158. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Структура и свойства высокопрочных бетонов, содержащих комплексный органоминеральный модификатор «Эмбэлит». II Всероссийская Международная конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития». - М.: НИИЖБ. - 2005, т. 3. - С. 657-671.

159. ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. – М.: Стандартинформ. - 2015. – 27 с.

160. Иванов И., Платиканов Д. Коллоиды. Пер. с болг. под ред. проф. Д.А. Фридрихсберга. - Л.: Химия. – 1975. -152 с.

161. ГОСТ 4013-82. Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия. – М.: МНТКС, 2008.

162. ГОСТ 25818-91. Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М.: МНТКС, 2003.

163. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Государственный комитет российской федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России). - 2004.

164. Гагарин В.Г. О показателях потребления энергии / Сб. докл. 5-й межд. конф. Проблемы строительной теплофизики, систем микроклимата и энергосбережения в зданиях. - М.: НИИСФ. - 2000. - С. 11-34.

165. Гагарин В.Г. Использование относительного удельного потребления энергии при сравнительной оценке экономических показателей в разных странах / Сб. докл. 7-й конф. РНТОС. М.: РНТОС. - 2002. - С. 26 – 41.
166. Самарин О.Д. Теплофизические и технико-экономические основы теплотехнической безопасности и энергосбережения в здании.- М.: МГСУ. - 2007. - 160 с.
167. Самарин О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. - М.: Изд-во АСВ. –2011. –128 с.
168. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. - М.: Изд-во АСВ. – 2011. – 296 с.
169. IEEE Electrical Engineering Dictionary / P.A. Laplante, ed. CRC Press LLC, 2000.
170. Румер Ю. Б., Фет А. И. Теория групп и квантованные поля. - М.: Либроком. - 2010. - 248 с.
171. Смородинский Я. А. Температура. - М.: ТЕРРА-Книжный клуб, 2008. - 224 с.
172. Кейн Г. Современная физика элементарных частиц. - М.: Мир. - 1990. - 360 с.
173. Фрауэнфельдер Г., Хенли Э. Субатомная физика. — М.: Мир. - 1979. - 736 с.
174. Мещеряков Ю.Г., Фёдоров С.В. Строительные материалы. – СПб.: НОУ ДПО «ЦИПК», 2013. - 400 с.
175. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия. - 1978. – 480 с.
176. Большая Российская энциклопедия. Энциклопедический словарь. – М.: Большая Российская энциклопедия. – 2011. – 1519 с.
177. Орешкин Д.В., Фролов А.А., Ипполитов В.В. Проблемы теплоизоляционных тампонажных материалов для условий многолетних мерзлых пород. - М.: Недра. - 2004. - 232 с.

178. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. Автореф. дисс. д.т.н. – М.: НИИСФ. – 2000.
179. Колесникова А.В. Теплоперенос в неоднородных монолитно-возводимых наружных стенах зданий с фасадным утеплением. Автореф. дисс. ... к.т.н. – Томск: ТГАСУ. – 2006. - 19 с.
180. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций здания. – Волгоград: ВолГАСА. - 1997. - 273 с.
181. Рымаров А.Г., Смирнов В.В., Шевченко А.А. Особенности теплопередачи через наружные ограждающие конструкции высотного здания в холодный период года для климата г. Москвы / Сб. докл. семинара «Высотные и большепролетные здания. Технологии инженерной безопасности и надежности». – М.: МГСУ. – 2005. - С. 45-47.
182. Савин В.К. Строительная физика. Энергоперенос. Энергоэффективность. Энергосбережение. – М.: Лазурь. – 2005. - 432 с.
183. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ. – 1997. - 684 с.
183. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС. – 2006. - 256 с.
184. Гудков Ю.В., Гиндин М.Н. Производство изделий из ячеистого бетона на заводах силикатного кирпича // Строительные материалы. -2001. - № 4. - С. 23-24.
185. Микульский В.Г., Сахаров Г.П., Козлов В.В. и др. Строительные материалы. – М.: Издательство АСВ. - 2011. – 520 с.
186. Дерябин П.П. Влияние рецептурных и технологических факторов на свойства пеногазобетона // Известия вузов. Строительство. - 2001. - № 5. - С. 39-42.

187. Павленко, Н.В. Эффективность применения наноструктурированного вяжущего при получении ячеистых композитов / Н.В. Павленко, В.В. Строкова, А.В. Череватова, И.В. Жерновский, В.В. Нелюбова, М.Н. Капуста // *Строительные материалы*. – 2012. – № 6. – С. 12–13.
188. Строкова, В.В. Оценка активности наноструктурированных вяжущих термодинамическим методом / В.В. Строкова, А.М. Айзенштадт, М.Н. Сивальнева, В.А. Кобзев, В.В. Нелюбова // *Строительные материалы*. – 2015. – № 2. – С. 3–9.
189. Строкова, В.В. Особенности механизма твердения наноструктурированного вяжущего / В.В. Строкова, М.Н. Сивальнева, И.В. Жерновский, В.А. Кобзев, В.В. Нелюбова // *Строительные материалы*. – 2016. – № 1–2. – С. 62–65.
190. Нелюбова, В.В. Особенности наноструктурированного вяжущего в зависимости от генезиса сырья / В.В. Нелюбова, В.А. Кобзев, М.Н. Сивальнева, И.И. Подгорный, Ю.В. Пальшина // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2015. – № 2. – С. 25–28.
191. Kapusta, M.N. Kinetics of mechanical activation during the manufacturing process of nanostructured binders / M.N. Kapusta, V.A. Kobzev, V.V. Nelubova // *Applied Me-chanics and Materials*. – Vol. 670 (2014). – P. 412–416. [http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.670–671.412](http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.412)
192. Pavlenko, N.V. About Application Prospectivity of Rocks with Different Geological and Morphological Features as Basic Raw Component for Free-Cement Binder Production / N.V. Pavlenko, V.V. Strokovna, M.N. Kapusta, D.D. Netsvet // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 670 (2014). – P. 462–465. [http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.670–671.462](http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.462)
193. Павленко, Н.В. Модифицированное вяжущее с использованием нанокристаллических компонентов для ячеистых композитов / Н.В. Павленко, А.Б. Бухало, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, А.В. Сумин // *Строительные материалы*. – 2013. – № 2. – С. 20–24.

194. Сумин, А.В. Пеногазобетон с наноструктурированным модификатором / А.В. Сумин, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, С.А. Еременко // Строительные материалы. – 2016. – № 1–2. – С. 70–74.
195. Строкова, В.В. Модифицированное вяжущее с использованием наноструктурированного минерального компонента / В.В. Строкова, А.В. Сумин, В.В. Нелюбова, Н.А. Шаповалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 3. – С. 36–39.
196. Бухало, А.Б. Сравнительная оценка газообразователей для производства ячеистого бетона / А.Б. Бухало, В.В. Нелюбова, В.В. Строкова, А.В. Сумин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 42–45.
197. Шаталова Т.Б., Шляхтин О.А., Веряева Е.С. Методы термического анализа / Методическая разработка. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. – 2011. – 72 с.
198. Физико-химические методы исследования свойств строительных материалов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, В.Н. Вернигорова, И.Н. Максимова. / Научно-промышленная энциклопедия России. Справочник. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Часть 2. СПб. - 2009, С. 345-445.
199. Максимова И.Н., Макридин Н.И. Структура и конструкционная прочность цементных композитов. Структурообразование и синтез прочности. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 174 с.
200. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. – М.: Высшая школа. – 1981. – 335 с.
201. Powder Diffraction File, inorganic phases. – international centre for diffraction data. - USA: JCPDS, 2003.
202. Гиндин М.Н. Производство ячеистого бетона. – М.: Техностром – Центр. – 2012. – 191 с.
203. Магдеев У.Х., Гиндин М.Н. Современные технологии производства ячеистого бетона // Строительные материалы. - 2001. - № 2. - С.2-6.

204. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента - М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана. – 2015. – 412 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

«УТВЕРЖАЮ»
 Генеральный директор
 ООО «ИИМ-Строй»

Верbitskiy Ю.С.
 12 июня 2016 г.

АКТ
о внесении изменений в модифицированный пенобетон с рациональными параметрами компонентов состава

Мы, нижеподписавшиеся, Ишков В.П., Величко Е.Г., Касумов А.Ш., Заматулин Д.Ю., составили настоящий акт об опытно-исследовательских изысканиях из модифицированного пенобетона с рациональными параметрами компонентов состава, разработанных аспирантом кафедры строительных материалов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Касумовым Ашом Шаким Оглы.

Для изготовления стеновых блоков из модифицированного пенобетона с рациональными параметрами компонентов состава применялись следующие компоненты: пенообразователь ПБ 2000, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н или ЦЕМ I 50,0-Д0 ОАО «Старооскольский цементный завод», тонкодисперсный латексный гранулированный адгез, комплексный модификатор (КМ), ускоритель твердения АС. Комплексный модификатор (КМ) состоит из микрокремнезема, метакрилата, модификатора бетона МБ-ВН-2, гипса и суперпластификатора С-3. Расход компонентов на 1 м³ смеси представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Расход компонентов на 1 м³ смеси

Принадлежность, кг	Тонкодисперсный латекс, кг	Комплексный модификатор, кг	Ускоритель твердения, кг	Вода, кг
140	150	20	2,8	97

Технология производства пенобетона включала в себя операции:

- дозировка по массе компонентов смеси;
- приготовление пены в бетономесителе-активаторе;
- введение компонентной смеси;
- приготовление пенобетонной массы в течение 2 минут;
- укладка пенобетонной массы в бортовку;
- твердение в условиях тепловлажностной обработки (ТВО) в прозрачной камере по режиму 6+3+6+2 часов при температуре изотермической выдержки (ИВ) 30°С;
- разреза масса на блоки;

ООО «Иновационный ресурс»
 ОКН 57-4141
 Группа Ж15

«УТВЕРЖАЮ»
 Генеральный директор
 ООО «Иновационный ресурс»

Малышев О.А.
 20 мая 2016 г.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПЕНОБЕТОН С РАЦИОНАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КОМПОНЕНТОВ СОСТАВА
 ТУ 5741-005-2988514-2016
 Технические условия

Дата введения: 25 мая 2016 г.
 Без ограничения срока действия

Разработано:
 Профессор, д.т.н. ИИУ МГСУ
 /Е.Г. Величко /
 Аспирант ИИУ МГСУ
 /А.Ш. Касумов /
 Старший инженер, с.т.н. ИИУ МГСУ
 /Д.Ю. Заматулин /

г. Москва, 2016 г.