



На правах рукописи

Касумов Аяз Шахин Оглы

**ПЕНОБЕТОН С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
СВОЙСТВАМИ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Величко Евгений Георгиевич

Официальные оппоненты: - **Перфилов Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Нефтегазовые сооружения»

- **Жабин Дмитрий Владимирович**-кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «Московская инженерно-строительная компания» (ОАО «МИСК»), заместитель руководителя проекта

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

Защита состоится 16 ноября 2017 г. в 10-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.183.02 на базе открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)», по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miit.ru.

Автореферат разослан «10» октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зайцев Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 структуры и свойств пенобетонной смеси и пенобетона полифункциональным с пролонгированным действием минеральных и химических добавок-модификаторов с синергетическим эффектом действия.

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, в частности, Уховой Т.А., Меркина А.П., Сахарова Г.П., Сажнева Н.П. и др. Перспек-

тивным 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.

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 разномодальными минеральными составляющими, обеспечивающими многоуровневую оптимизацию дисперсного состава и высокую концентрацию твердой фазы в единице объема.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является разработка составов высококачественного модифицированного теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона с повышенной концентрацией твердой фазы в единице объема и эксплуатационными свойствами с комплексной добавкой пролонгированного действия на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов.

Для этого потребовалось решение следующих основных задач:

- Анализ научно-технических и практических 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, обеспечивающих высокую концентрацию твердой фазы в единице объема.

- Теоретическое обоснование низкой теплопроводности модифицированного теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона с комплексными добавками пролонгированного действия на основе рационального соотношения химических и тонкодисперсных минеральных компонентов аморфного и аморфно-кристаллического строения в плотном межфазовом контакте.

- 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.

- Опытнo-промышленное внедрение и разработка технических условий по изготовлению модифицированного пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами.

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, обеспечивающего максимально стеснённые условия формирования структуры плотных межячеистых перегородок с высокой концентрацией твердой фазы в единице объема, а также повышенными эксплуатационными свойствами (прочность, низкие теплопроводность, усадка) неавтоклавного пенобетона.

Теоретически обосновано применение в составе пены микрокремнезёма, а в состав пенобетонной смеси тонкодисперсного шлака, комплексного модификатора с ускорителем твердения, обеспечивших высокую концентрацию твердой фазы в единице объема, а также 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, значимое повышение концентрации твердой фазы в единице объёма 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 Щульце-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 шлаки 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 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, в т.ч. «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 ви-

де 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 143 страницах текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 204 наименований и 2 приложений, содержит 33 рисунка, 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Неавтоклавный пенобетон является одним из наиболее перспективных теплоизоляционных материалов для развития и реализации государственной программы «Жилище» в РФ. Он характеризуется высоким уровнем теплофизических свойств, надёжностью, включая долговечность, простотой технологии, невысоким уровнем производственных затрат при изготовлении. Однако, значимыми недостатками неавтоклавного ячеистого бетона является высокая деформация усадки, низкая трещиностойкость, снижающая прочность и морозостойкость, а так же повышающая теплопроводность и водопоглощение. Означенные дефекты образуются в технологическом процессе и на начальной стадии формирования структуры. Поэтому получение пенобетона плотностью D400 с повышенными эксплуатационными свойствами может быть достигнуто ускорением сроков схватывания со стабилизацией структуры в процессе приготовления пенобетонной смеси и формирования изделий. Получить эффективный теплоизоляционный цементный неавтоклавный пенобетон представляется возможным при использовании полифункциональных минеральных и химических модификаторов пролонгированного дей-

ствия с синергетическим эффектом. Необходимо также отметить в качестве основных структурообразующих факторов концентрацию твёрдой фазы в межячейстных перегородках, дисперсность и активность, в т.ч. пуццоланическую, минеральных модификаторов, возможность создания многоуровневого рационального дисперсного состава матрицы. Особое значение при разработке составов неавтоклавного пенобетона с высокими строительно-техническими свойствами приобретает использование техногенных материалов: шлака, метаксаолина, микрокремнезёма. Очевидно, что для обеспечения высоких показателей качества изделий из неавтоклавного пенобетона необходим учёт взаимосвязи материаловедческого и технологического аспектов формирования его структуры и свойств. Поэтому, для достижения цели работы на основании анализа научно-технических источников была предложена научная гипотеза исследований, заключающаяся в следующем. Получение пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами возможно путём модифицирования пенобетонной смеси комплексными химическими добавками, в т.ч. ускорителем твердения, обладающим расширяющим эффектом, стабилизирующим тонкодисперсное строение пены на ранней стадии схватывания, твердения и структурообразования и тонкодисперсными минеральными наполнителями, обеспечивающими многоуровневую оптимизацию дисперсного состава, повышающей концентрацию твердой фазы в единице объема.

В работе при проведении исследований использовались в основном стандартные методики. Для определения прочности на сжатие размеры, выпиленных образцов, были приняты размеры 50x50x50 мм, а для усадки - 40x40x160 мм. Исследования структуры проводились на: рентгеновском дифрактометре ARLXTra (ThermoFisherScientificInc., США), растровом микроскопе-микроанализаторе Quanta 200 (Швейцария) с системой микроанализа Apollo 40 (Phillips, Голландия), установке Setaramlabsystga/dsc/dta (Франция), испытательной установке Controls (Италия), климатической камере WEISS (Германия), аппарате Блейна и др. При проведении экспериментальных исследований были использованы следующие материалы: вода водопроводная – В, портландцемент ОАО «Старооскольский цементный завод» Цем 1 42,5 Н (ПЦ 500-Д0) – Ц с содержанием $C_3A=3,68\%$, мик-

рокремнезём МБ 10-01, органо-минеральный модификатор МБ Б-II-2 (Челябинск), пенообразователь ПБ-2000 (ОАО «Ивхимпром»), ускоритель твердения «АС», тонкодисперсный доменный шлак Новолипецкого металлургического комбината - ОАО «НЛМК» (Липецк). Пенобетонные смеси имели диаметр расплыва лепёшки по вискозиметру Суттарда равный 14-16 см. Марка пенобетона по средней плотности была принята D400. Технология приготовления образцов пенобетона включала следующие операции: дозирование компонентов; приготовление пены в смесителе-активаторе; приготовление пенобетонной смеси в течение 2 мин.; литьё в форму; твердение в климатической камере по режиму (6+3+6+2)ч с температурой изотермического прогрева при температуре $(80 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Очевидно, что повышение эксплуатационных свойств пенобетона может быть связано с применением многокомпонентных модификаторов, пенообразователей большой кратности и высоким коэффициентом использования пены (КИП). Применение комплексного химико-минерального модификатора должно осуществляться таким образом, чтобы при этом обеспечивалось его пролонгированное действие с эффектом синергизма в формировании прочности, теплопроводности, деформативности, морозостойкости и др. свойств пенобетона. Означенные параметры могут быть обеспечены при условии создания тонкодисперсной ячеистой структуры пенобетона с порами размерами 0,1-0,5 мм и плотной, высокопрочной матрицы с компонентами аморфизированного или аморфно-кристаллического строения. Такие структуры можно получить при использовании тонкодисперсного доменного шлака, микрокремнезема, метаксаолина, повышающих их теплофизические свойства. В частности, тонкомолотый доменный гранулированный шлак с оптимальной дисперсностью имеет удельную поверхность 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 %. Прочность пенобетона при этом повышается на 25-40 %, а коэффициент теплопроводности снижается на 13-15 %. Основное распределение частиц тонкодисперсного шлака происходит в межчастичных пустотах портландцемента. Это положено в

основу, разработанных научных положений физико-химических методов последовательного модифицирования цементного теста, мелкозернистого бетона, пенобетона путем исследования и определения рациональных параметров компонентов составов означенных цементных систем, обеспечивая высокую концентрацию твердой фазы в единице объема, и более высокую степень упорядоченности их структуры. Оптимизация дисперсного состава осуществлена на 3-х 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». Такое их применение обеспечивает значимое повышение качества и расширение областей применения пенобетона, а также синергетический эффект и пролонгированное действие означенных добавок. Применение высокодисперсных минеральных добавок различной удельной поверхности оптимизирует дисперсный состав пенобетона, обеспечивая получение высокодисперсной ячеистой структуры с тонкими, плотными и прочными перегородками между пузырьками воздуха. Тонкодисперсная устойчивая структура пены при этом стабилизируется применением микрокремнезёма и ускорителя твердения «АС» в оптимальном количестве (0,07-0,09% массы цемента). В работе подробно рассмотрено оптимальное содержание ускорителя твердения «АС» (в т.ч. в комплексе с суперпластификатором С-3) по его влиянию на реологические показатели цементного теста (сроки схватывания, нормальную густоту).

С целью снижения возможных ошибок эксперимента при изменении средней плотности пенобетона в процессе работ рациональное содержание компонентов его состава определялось 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.

Установлено, что 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 (таблица 1).

Исследования показали также, что оптимальное количество высокодисперсного комплексного модификатора КМ (смесь 1:1 микрокремнезёма МБ 10-01 и МБ-Б-II-2) составляет 20 %, используемого взамен эквивалентного количества цемента.

Таблица 1 - 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	$\frac{54,3}{173}$	$\frac{75,3}{240}$	$\frac{42,1}{129}$	$\frac{54,3}{167}$	$\frac{72,8}{224}$

Прочность мелкозернистого бетона при таком 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 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 (таблица 2).

Таблица 2 - Прочность бетона с добавкой КМ (МБ 10-01 + МБ-Б-II-2)

№	Характеристики бетонной смеси			В/Ц	Прочность бетона, МПа/%				
	Состав, кг/%				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	$\frac{52,8}{169}$	$\frac{72,4}{231}$	$\frac{33,4}{103}$	$\frac{52,4}{161}$	$\frac{73,9}{227}$

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 частности, в возрасте 28 суток после ТВО и твердения в НУ прочность модифицированного пенобетона составляет 3,19 и 3,35 МПа соответственно (таблица 3).

Таблица 3 - Строительно-технические свойства пенобетона

№	Состав, мас. %	Прочность в 28 сут., МПа/%, после ТВО и НУ		Коэф. теплопроводности, Вт/(м·С) %		Усадка, мм/м %	
		ТВО	НУ	ТВО	НУ	ТВО	НУ
1	Контрольный состав, В/Т=0,39	$\frac{1,58}{100}$	$\frac{1,62}{100}$	$\frac{0,11}{100}$	$\frac{0,1}{100}$	$\frac{2,99}{100}$	$\frac{2,98}{100}$
2	Тонкодисперсный шлак – 40, В/Т=0,37	$\frac{2,05}{130}$	$\frac{2,09}{129}$	$\frac{0,085}{78}$	$\frac{0,078}{78,5}$	$\frac{2,6}{87}$	$\frac{2,67}{89,6}$
3	С-3 - 0,6, В/Т=0,32 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	$\frac{2,32}{147}$	$\frac{2,41}{148}$	$\frac{0,113}{103}$	$\frac{0,102}{102}$	$\frac{0,95}{31,9}$	$\frac{0,98}{32,9}$
4	Тонкодисперсный шлак – 40 Микрокремнезем – 8 С-3 - 0,6; В/Т=0,31	$\frac{2,67}{169}$	$\frac{2,75}{170}$	$\frac{0,081}{74}$	$\frac{0,0746}{74,6}$	$\frac{1,91}{64}$	$\frac{1,97}{65}$
5	Тонкодисперсный шлак – 30; В/Т=0,32 Микрокремнезем – 8; С-3 - 0,6	$\frac{2,89}{183}$	$\frac{3,03}{197}$	$\frac{0,08}{73,5}$	$\frac{0,074}{74}$	$\frac{1,495}{50}$	$\frac{1,52}{51}$
6	Тонкодисперсный шлак – 40; В/Т=0,32 Микрокремнезем – 8; С-3 – 0,6; 0,32 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	$\frac{3,07}{194}$	$\frac{3,19}{197}$	$\frac{0,082}{74,6}$	$\frac{0,075}{75}$	$\frac{0,69}{23}$	$\frac{0,75}{25,2}$
7	Тонкодисперсный шлак – 40 МБ Б-II -2 - 20; В/Т=0,32	$\frac{2,64}{167}$	$\frac{2,74}{169}$	$\frac{0,084}{76,5}$	$\frac{0,077}{77}$	$\frac{0,66}{22}$	$\frac{0,74}{25}$
8	Тонкодисперсный шлак – 30 № В/Т=0,32 Комплексный модификатор(КМ)– 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	$\frac{3,19}{202}$	$\frac{3,35}{207}$	$\frac{0,08}{73}$	$\frac{0,073}{73,5}$	$\frac{0,64}{21,5}$	$\frac{0,68}{23}$

Деформация усадки при этом уменьшается на 78,6 и 77 % (0,64 и 0,68 мм/м) после ТВО и твердения в НУ или в 4 раза, т.е. находится на уровне усадки автоклавного газобетона. Коэффициент теплопроводности модифицированного пенобетона в сухом состоянии (таблица 3) снижается на 26,5-27,0 %. Низкое значение теплопроводности пенобетона обеспечивается применением высокодисперсных ми-

неральных модификаторов, выполняющих роль рассеивающих экранов для фоонов. Наиболее значимый эффект достигается при их аморфном (за счёт микрокремнезема) и аморфно-кристаллическом в плотном фазовом контакте (за счёт тонкодисперсного шлака) состояниях.

Для определения наиболее значимых параметров пенобетона (прочности, теплопроводности) с помощью математического планирования эксперимента были выбраны факторы: X_1 - количество тонкодисперсного шлака – (20, 30, 40 %) и X_2 - количество комплексного модификатора (КМ) – (4; 8; 12 %) массы компонентов на 1 м³ пенобетона. Расход пенообразователя было постоянным, ускорителя твердения «АС» - 0,07 %. Были получены уравнения регрессии: для предела прочности на сжатие: $R_{сж} = 3,2 + 0,358 X_1 + 0,256 X_2 - 0,015 X_2^2$ (ошибка при аппроксимации составляет 1 %); для коэффициента теплопроводности: $\lambda = 0,08 + 0,024 X_1 - 0,165 X_2 + 0,01 X_2^2$ (ошибка при аппроксимации - 2,2 %). Адекватность уравнений проверена по критериям Стьюдента и Фишера. Полученные математические модели свойств пенобетона в зависимости от количества тонкодисперсного шлака и комплексного модификатора являются адекватными в указанных диапазонах X_1 и X_2 .

Установлен 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 %, вода - 60 кг или 15 % Экономия портландцемента составляет 84 кг/м³ относительно контрольного состава.

Для пенобетона означенного состава определён индекс эффективности модификатора по сравнению с контрольным составом (ГОСТ Р 56178-2014). Он составил: по снижению воды затворения – 21 %, по повышению прочности – более 100 %. 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.

Для оценки качества структуры пенобетона были проведены дериватографические, микроструктурные и рентгенофазовые исследования его образцов в возрасте 28 суток.

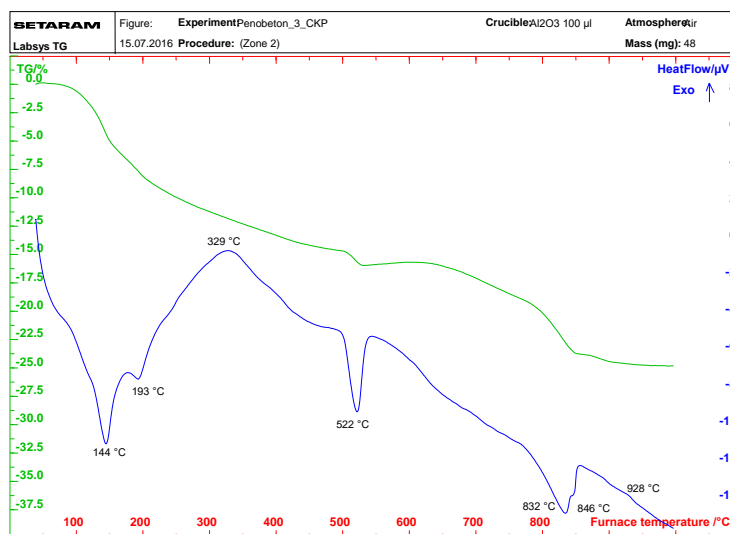


Рисунок 1 - Дериватограмма пенобетона оптимального состава (табл. 4, состав 8) после нормального твердения.

Таблица 4 – Результаты анализа термогравиметрических кривых

№	Состав пенобетона	Влажность, %	Потеря массы, %, при t° , $^{\circ}\text{C}$		
			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

Термогравиметрические исследования определили 3 основных участка перелома кривых TG при повышении температуры до 1000 $^{\circ}\text{C}$. Это может быть вызвано удалением воды различной формы связанности, изменением структуры образцов, включая фазовые переходы. Определены 3 экстремума: при температуре (136-147) $^{\circ}\text{C}$ - наблюдается при испарении физически связанной воды из пенобетона; при $t^{\circ}=(519-531)$ $^{\circ}\text{C}$ - связано с удалением химически связанной воды; при $t^{\circ}=(822-832)$ $^{\circ}\text{C}$ - в связи с разрушением силикатов и алюмосиликатов кальция. Также установлено, что самые низкие потери массы при t° более 820 $^{\circ}\text{C}$ имеет пенобетон, содержащий в своём составе портландцемент, тонкодисперсный домен-

ный шлак, комплексный модификатор (КМ), ускоритель твердения «АС» (состав 8). Это свидетельствует о меньшей степени обводненности гидросиликатных фаз и более высокой их прочности.

Для уточнения фазовых изменений кривых ТГ были изучены рентгенограммы и микроструктура пенобетона. (Рисунок 2)

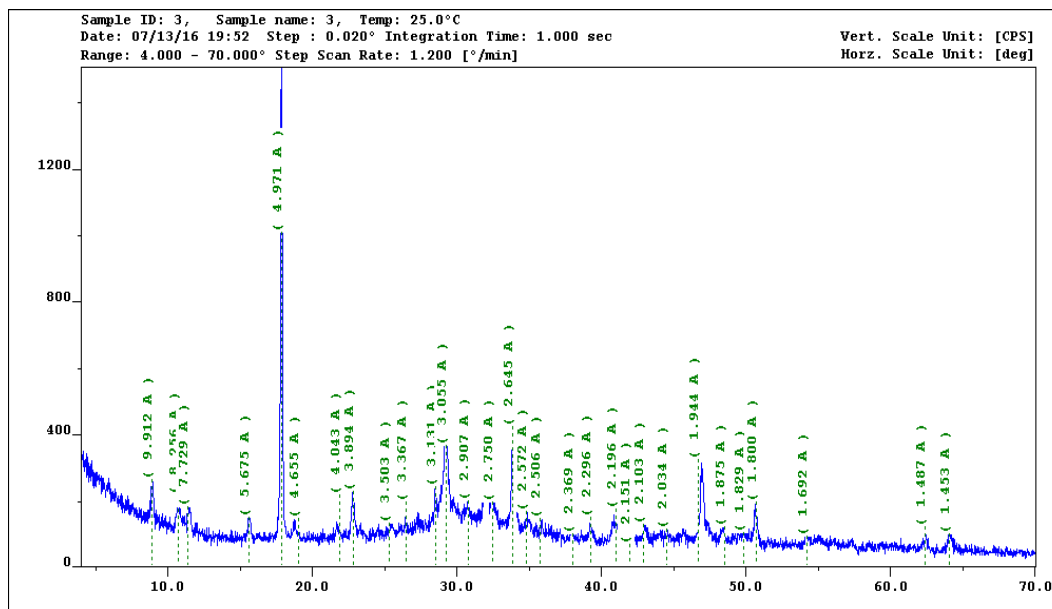


Рисунок 2 – Рентгенограмма пенобетона состава 8 после нормального твердения.

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, 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 тоберморитоподобных гидросиликатов кальция.

Был определён количественный фазовый состав пенобетона (таблица 5). Получены данные по портландиту и этtringиту, а также степень закристаллизованности гидратных фаз и степень гидратации портландцемента в пенобетоне контрольного и составов 2 и 8 после ТВО и твердения в НУ в возрасте 28 суток. Количество портландита и этtringита необходимо для оценки коррозионной стой-

кости и наличия расширяющегося компонента при применении органо-минерального модификатора в составе 8.

Таблица 5 - Количественный фазовый анализ цементного камня 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 (КМ) – 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 (КМ) – 8 Ускоритель твердения «АС» - 0,07	6,8	11,6	74	80

Была исследована микроструктура образцов пенобетона (рисунок 3).

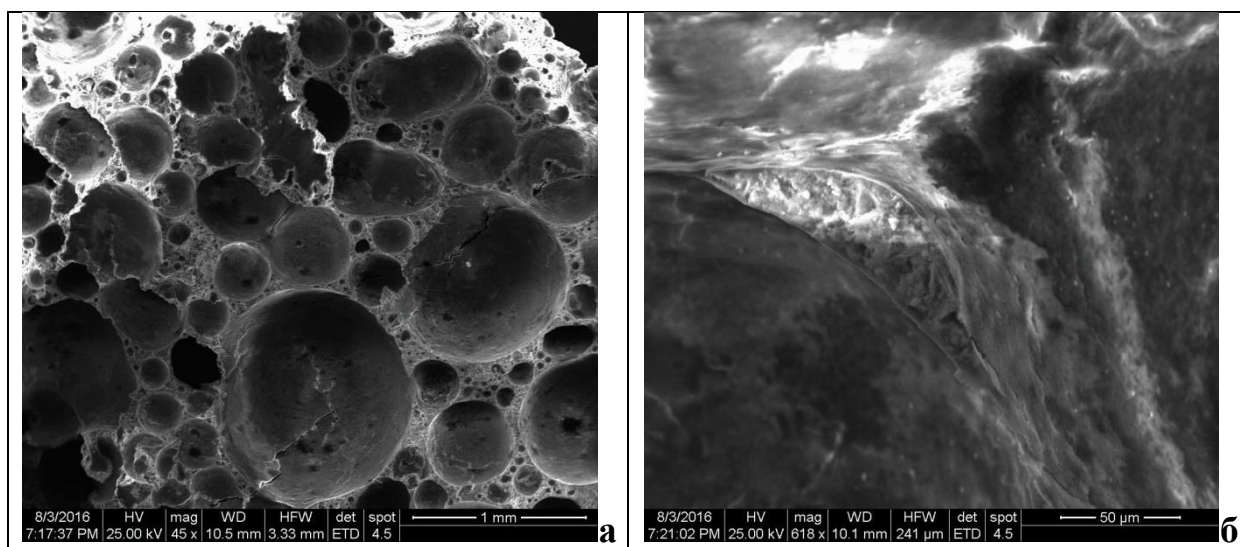


Рисунок 3 – Макроструктура (а) и микроструктура перегородок (б) пенобетона состава 8 после нормального твердения в возрасте 28 суток.

Структурные исследования показали, что пенобетон модифицированный тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ), СП С-3 и ускорителем твердения «АС» обеспечивает формирование плотной структуры межячеечных перегородок с высокой концентрацией твердой фазы, состоящих из низкоосновных 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 (таблица 6). Более того, 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 метаксаолина и микрокремнезёма, выполняющих роль «рассеивающих экранов» для фононов, значительно снижает теплопроводность пенобетона. Коэффициент теплопроводности модифицированного пенобетона уменьшается также за счёт формирования однородной тонкодисперсной ячеистой структуры с равномерно распределенными пузырьками воздуха диаметрами от 20 до 200 мкм (рисунок 3), исключая конвективную составляющую. Размеры ячеек пенобетона контрольного состава – 30-625 мкм.

Таблица 6 – Сводная таблица строительно-технических свойств

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

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 раза) по сравнению с контрольным составом марки по средней плотности D400. При этом её абсолютное значение составляют 0,64-0,65 мм/м, т.е. на уровне автоклавного газо-

бетона. Деформация усадки модифицированного пенобетона стабилизируется на 140 сутки, на 156 становится постоянной (таблица 7).

Таблица 7 – 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	$\frac{0,64}{21,5}$

При эксплуатации зданий важное значение имеют гидрофизические свойства. Они оказывают значимое влияние на надёжность сооружения и его теплозащитные показатели. Результаты исследования гидрофизических свойств представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Водопоглощение, водостойкость, влажность

№	Состав, мас. %	$W_m, \% ^1$	$K_p ^2$	Влажность по массе, %, через сут.					
				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	$\frac{29,9}{54}$	$\frac{0,834}{112}$	$\frac{16,4}{73}$	$\frac{11,7}{76}$	$\frac{8,9}{72}$	$\frac{7,1}{68}$	$\frac{5,8}{73}$	$\frac{5,1}{70}$

Таким образом, разработано научное решение 3-уровневой оптимизации дисперсного состава пенобетона с рациональным применением химических и разнодисперсных минеральных модификаторов. Это обеспечивает высокую ре-

аксионную способность твёрдых частиц и прочность матрицы, низкие значения деформации усадки, рациональный дисперсно-гранулометрический состав 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 по K_p – коэффициенту размягчения (на 12 %), а также значимое снижение водопоглощения- W_m (до 2 раз), влажности (на 29-30 %), коэффициента теплопроводности (на 26,5-.27 %) и деформацию усадки (в 4-5 раза).

По результатам выполненных исследований разработана технологическая схема производства модифицированного с повышенными эксплуатационными свойствами пенобетона неавтоклавного твердения с рациональным дисперсным составом. Технологическая линия включает: ленточные транспортёры к расходным бункерам; бункеры портландцемента, комплексного модификатора (КМ), тонкодисперсного доменного шлака, микрокремнезёма, ускорителя твердения; ёмкость для воды; дозаторы по массе; пенобетоносмеситель; бортоснастку для формирования массива; пропарочную камеру; участок разрезки массива на блоки; склад готовой продукции.

Результаты исследований были использованы при разработке ТУ 5741-005-29888514-2016. На их основе в 2016 году изготовлена партия стеновых блоков общим объёмом 250 м³. Кроме того, была рассчитана эффективность завода по производству модифицированного пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами мощностью 200 тыс. м³ в год, капиталовложения на строительство которой составят более 290 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Разработаны научные решения создания рационального дисперсного состава неавтоклавно модифицированного пенобетона за счёт многоуровневой оптимальной упаковки твёрдых частиц, обеспечивающей высокую концентрацию твердой фазы в единице объема с минимальной толщиной прослойки гидратных фаз цементного камня. Упорядоченный таким образом за счет оптимальных геометрических и физических свойств и энергетического состояния дисперсный состав позволяет получить максимально стеснённые условия формирования структуры плотных межячеистых перегородок, высокую прочность, низкую теплопроводность и усадку неавтоклавно пенобетона.
2. Разработаны научные применения химических и минеральных модификаторов различной дисперсности с оптимальными параметрами. Это обеспечивает большую реакционную способность твёрдых частиц матрицы с высокой их концентрацией в единице объема и получение высокой прочности, низкие значения усадки, рациональный дисперсно-гранулометрический состав пенобетонной смеси. Создание структуры на основе означенных положений уменьшает на 9-12 % пустотность между твёрдыми частицами, обеспечивая значимое повышение прочности (в 2 раза), однородности структуры, водостойкости (на 12 %), а также значимое снижение водопоглощения (до 2 раз), влажности (на 29-30 %), коэффициента теплопроводности (на 26,5-27 %), усадки (в 4-5 раз) пенобетона.
3. Применение 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 росту прочности ячеистой структуры с 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 в плотном контакте) и высокодисперсных аморфных метакаолина и микрокремнезёма, выполняющих роль «рассеивающих экранов» для

фононов, значительно уменьшает коэффициент теплопроводности. Он также снижается за счёт формирования однородной пористой структуры с равномерно распределёнными воздушными пузырьками диаметров от 20 до 200 мкм, исключаящими конвективную составляющую теплопроводности, что значительно меньше диаметров ячеек пенобетона контрольного состава (30-625 мкм).

5. Прочность пенобетона, модифицированного тонкодисперсным шлаком, комплексным модификатором (КМ) и ускорителем твердения «АС», повышается в 2 раза за счёт формирования однородной плотной структуры межячеистых перегородок с высокой концентрацией твердой фазы, состоящих из низкоосновных тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, этtringита и др. Минимальная толщина межячеистой перегородки пенобетона оптимизированного состава с повышенными эксплуатационными свойствами составляет 23,3-24,8 мкм. Для пенобетона контрольного состава - 40,2-42,8 мкм.

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

7. Усадка модифицированного пенобетона в 4-5 раз ниже значений усадки контрольного состава. Абсолютные показатели усадки модифицированного пенобетона составляют 0,64-0,65 мм/м, или находятся на уровне требований к автоклавному газобетону.

8. Деформация усадки модифицированного пенобетона стабилизируется на 140 день, на 156 день становится постоянной. 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.

9. 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 ра-

циональным 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 дисперсно-гранулометрического 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.

Публикации по теме диссертации:

- в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Касумов, А.Ш., Разработка рациональных параметров компонентов состава пенобетона / А.Ш. Касумов, Е.Г. Величко // Строительные материалы. –2016. – № 8. С. 52–56.
2. Исаева, Ю.В., Оптимизация структуры сверхлегкого цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов / Ю.В. Исаева, Е.Г. Величко, А.Ш. Касумов // Строительные материалы. –2015. – № 8. С. 84–86.
3. Стасилович, Е.А., Перспективы производства ячеистого бетона / Е. А. Стасилович, А.Ш. Касумов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 8–1. – С. 77–80;
4. Серова Р.Ф., Проблемы производства и применения ячеистого бетона / Р.Ф. Серова, А.Ш. Касумов, Е.Г. Величко // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 7–2. – С. 267–271;

Касумов Аяз Шахин Оглы

**ПЕНОБЕТОН С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
СВОЙСТВАМИ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Подписано в печать
Формат 60x90/16
усл. – печ. л. – 1,75

Заказ №
Тираж 80 экз.

МИИТ, 127944, Россия, г. Москва, Ул. Образцова, дом 9, стр. 9