

На правах рукописи



НИКОНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ВЫСОКИМИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ИЗ ОТХОДОВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА**

05.23.05 - Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" на кафедре "Химические технологии".

**Научный
руководитель:**

Панов Юрий Терентьевич
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Соков Виктор Николаевич
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», профессор кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов»

Баканов Максим Олегович
кандидат технических наук, начальник кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Защита состоится 22 декабря 2017г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2017 г.

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

Заянчуковская Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время к теплоизоляционным материалам, применяемым в строительстве, предъявляют высокие требования: они должны соответствовать всем санитарно-гигиеническим нормам и быть экологически чистыми, являться качественными тепло- и гидроизоляторами; быть способными сохранять эти показатели постоянными на протяжении длительного времени.

Современный рынок теплоизоляционных материалов весьма разнообразен, но не все они соответствуют вышеперечисленным требованиям. Основными теплоизоляционными материалами, используемыми в настоящее время в строительстве, являются различного рода минеральная вата и пенополистирол. Органическая теплоизоляция на основе пенопластов имеет низкий класс пожароопасности, при горении выделяет химические вещества, опасные для здоровья человека, недолговечна. Минераловатные изделия обладают высокой степенью водопоглощения, а использование органического связующего резко снижает эксплуатационные свойства. К одному из недостатков таких материалов относится постепенное саморазрушение их волокон, что так же неблагоприятно сказывается на здоровье человека, и приводит к потере теплоизолирующей способности. На фоне существующих теплоизоляционных материалов пеностекло уникально и обладает неоспоримыми преимуществами перед всеми другими теплоизоляционными материалами: относится к классу негорючих материалов, сохраняет свои характеристики на протяжении всего срока эксплуатации.

Кроме того, учитывая требования Технического регламента таможенного союза ТР ТС 005/2011 «О безопасности упаковки», который исключает вторичное использование отходов стекла, появляется необходимость использования этих отходов для других целей, например для производства пеностекла. Исходя из выше изложенного, данная работа по разработке теплоизоляционного материала строительного назначения, пригодного для гражданского строительства, из отходов стекла с плотностью 100 кг/м^3 является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

В процессе выполнения диссертационной работы был проведен обзор научно-технической литературы по технологиям получения, методам модификации составов и свойств неорганических теплоизоляционных материалов, технологических приемов получения и газообразователей используемых в составах пеностекла.

Цель работы и задачи исследования. Целью является разработка экологически безопасного пеностекла с низкой плотностью, пригодного для использования в качестве теплоизоляционного материала в строительстве и разработка технологии его получения.

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

1. Разработка газообразующей системы для получения пеностекла с низкой плотностью, определение оптимальных соотношений компонентов газообразователя и изучения процесса газовыделения таких смесей.
2. Изучение влияния предложенного газообразователя на процесс вспенивания
3. Изучение физико-механических свойства полученного пеноматериала
4. Разработка технологии получения пеноматериала с пониженной плотностью.
5. Выпуск опытной партии.

Научная новизна работы.

На основании проведенных исследований, изучения физических характеристик вспенивания и подбора технологических параметров:

1. Впервые установлены принципы создания пористых материалов с низкой кажущейся плотностью на основе отходов листового стекла, заключающиеся в использовании комплексного газообразователя, один из компонентов которого совмещает температуру размягчения используемого стекла с температурой интенсивного разложения второго компонента.

2. Установлены закономерности процессов вспенивания при использовании комплексного газообразователя и технологические приемы позволившие получить мелкоячеистый пеноматериал с коэффициентом теплопроводности $0,032 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, плотностью $100 \text{ кг}/\text{м}^3$, при сохранении высоких прочностных показателей.

3. Показано, что введение в систему каолина, выполняющего роль нуклеирующего агента, приводит к снижению среднего размера пор и, как следствие, повышению физико-механических свойств вспененного пеноматериала.

Теоретическая и практическая значимость и реализация результатов работы

Значимость работы заключается в теоретическом обосновании и последующей практической разработке состава и технологии получения строительного теплоизоляционного материала с кажущейся плотностью $100 \text{ кг}/\text{м}^3$ на основе отходов листового стекла. Использование принципа создания пористых систем низкой плотности путем использования комплексных газообразователей позволяющих совмещать температуру разложения основного газообразователя и температуру размягчения вспениваемого материала, позволило разработать технологию получения теплоизоляционного пеноматериала

на основе отходов стекла с пониженной кажущейся плотностью и повышенными эксплуатационными характеристиками.

Спроектирована и на базе предприятия «НПО «Трансполимер» (г. Костерево Владимирской области) изготовлена опытно-промышленная установка непрерывного действия, позволяющая получать пеноматериал шириной 900 мм и толщиной 200 мм. Выпущена опытная партия теплоизоляционного материала на основе отходов стекла плотностью 100 кг/м^3 , которая была использована в качестве теплоизоляции при строительстве жилых зданий.

На выпускаемую продукцию зарегистрирован товарный знак «Стеклозит», получены заключения СЭС, НИИМОССТРОЙ, ПОЖТЕСТ. Пеностекло «Стеклозит» включено в реестр новых технологий архитектуры города Москвы.

Получен патент на изобретение «Способ получения пеностекла и состав для получения пеностекла» №2417958.

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологической основой диссертационного исследования послужили современные теории и практика разработки и создания вспененных материалов на неорганической основе. При проведении научных исследований применялись стандартные средства измерений и методы анализа физико-механических свойств вспененных неорганических материалов, полученных с использованием современных методов дифференциально-сканирующей калориметрии, лазерной дифракции и современного испытательного оборудования.

Положения выносимые на защиту.

1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности получения теплоизоляционного материала с низкой кажущейся плотностью на основе отходов листового стекла и комплексного газообразователя;
2. Принципы создания комплексных газообразователей состоящих из двух и более компонентов, позволяющих совмещать температуру разложения основного газообразователя с температурой размягчения вспениваемого материала;
3. Способы получения пеноматериала с равномерной мелкоячеистой структурой, что обеспечивает создание материала с высокими физико-механическими свойствами.
4. Разработанную, на основе полученных экспериментальных данных, технологию получения непрерывного полотна пеноматериала со стабильными физико-механическими свойствами и минимальным количеством отходов.

Степень достоверности и апробация результатов. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Международная на-

учно-техническая конференция "Исследования и инновации в строительстве" (Пенза, ПГУАС, 2012г.); XIV Международная научно-техническая конференция "Научоемкие химические технологии - 2012"(Тула, МИТХТ,ТГПУ, 2012г.); XIII Международная научно-практическая конференция " Проблемы энергосбережения в промышленности и жилищно-коммунальном комплексе" (Пенза, ПГУАС, 2012г.); Международная научно-техническая конференция "Инновационные материалы и технологии" (Белгород, БГТУ, 2011г.); XII Всероссийская научно-техническая конференция "Новые химические технологии: производство и применение" (Пенза, ПГУ, 2011г.); Молодежная конференция "Международный год химии" (Казань, КГТУ, 2011г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 статьи в центральных изданиях из перечня рекомендованных ВАК РФ и патент РФ на изобретение «Способ получения пеностекла и состав для получения пеностекла» №2417958.

Структура работы. Диссертация изложена на 115 страницах, содержит 58 рисунков и 14 таблиц, состоит из введения, литературного обзора, методической части и четырех глав с результатами исследований, общих выводов и списка использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, поставлена цель работы, определены задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены различные виды теплоизоляционных материалов: изоляционно-строительные, используемые для утепления ограждающих конструкций зданий; изоляционно-монтажные, применяющиеся для изоляции установок глубокого и умеренного холода, промышленного оборудования и теплопроводов с рабочей температурой до 400 °С; влагозащитные, характеризующиеся водопоглощением за 360 суток не более 1,8% по объему; специального назначения (бесщелочные) и высококремнеземистые. Представлены основные свойства и общие характеристики пеностекол в сравнении с применяемыми на сегодняшний день теплоизоляционными материалами, представлены зависимости плотности пеностекла от различных факторов.

Показаны возможные варианты применения пеностекла в строительстве, использования пеностекла в качестве теплоизоляции стеновых конструкций. Применение пеностекла с низкой плотностью при высокой прочности в кровельных конструкциях способствует повышению прочности кровли, уменьшению ее прогиба, обеспечивает хорошую устойчивость против ветровых нагрузок. Пеностекло можно применять как для теплоизоляции

новых, так и для реконструкции существующих зданий. Наряду с этим применение пено-стекла решает постоянную проблему современного городского хозяйства, которой является теплоизоляция трубопроводов при температурах теплоносителя выше 60°C.

Представлены существующие технологии получения пеностекла, виды газообразователей и свойства компонентов смеси, различные виды печей для получения пеностекла, описаны процессы физического и физико-химического характера, протекающие при вспенивании стекломассы. На основании анализа данных научной литературы сформулированы цель и задачи исследований.

Вопросы связанные с разработкой теории теплопроводности и технологии получения теплоизоляционных материалов для строительства нашли отражение в работах классиков Киргизгородского А.А., Шилла Ф., Демидовича Б.К., Горлова Ю.П. и современных исследователей Сокова В.Н., Христофорова А.И., Берегового В.А., Щепочкиной Ю.А., Федосова С.В.

Во второй главе приведено описание исходных материалов и веществ, которые применялись в процессе исследования. В работе были применены современные методы исследования, такие как лазерная дифракция, дифференциально-термический анализ, эталонная порометрия. Физико-механические свойства полученных образцов определяли по стандартным методикам (ГОСТ 17177-94). Для исследования кинетики разложения была изготовлена установка для получения кривых разложения различных смесей газообразователей и разработана методика проведения испытаний.

В качестве исходных материалов применялись: стеклобой отходов листового стекла, силикат натрия, карбонат кальция (мрамор), нитрат натрия, каолин.

Стеклобой отходов листового стекла, размолотого до удельной поверхности до 4500 см²/г, имеющего постоянный химический состав: SiO₂ - 71,25%; Al₂O₃ - 1,87%; Fe₂O₃ - 0,29%; CaO - 8,0%; MgO - 3,25%; Na₂O - 15,64%.,

Силикат натрия, растворимое стекло от желтоватого до темно-зеленого цвета, используют для изготовления жидкого стекла. Силикатный модуль 2,7 - 3,5. Химический состав силиката натрия: SiO₂ - 71,5-76,5%; Na₂O - 22,5-27,5%.

Нитрат натрия (NaNO₃) - бесцветные кристаллы, плотностью 2,25 г/см³, температура плавления 308 °С, растворим в воде при температуре 80°C.

Мрамор - метаморфическая горная порода, состоящая из кальцита CaCO₃, плотность 2,3-2,6 г/см³.

В качестве модифицирующей добавки был использован каолин. При нагревании до 550—600°C он теряет воду и превращается в метакаолин (аморфный силикат алюминия).

В третьей главе рассмотрена возможность получение пеноматериала с минимальной кажущейся плотностью. По нашему мнению это возможно лишь при соответствии температур раз-

ложения газообразователя и температур размягчения исходного вещества, что можно осуществить подбором соответствующего газообразователя, либо изменением температуры размягчения исходного стекла.

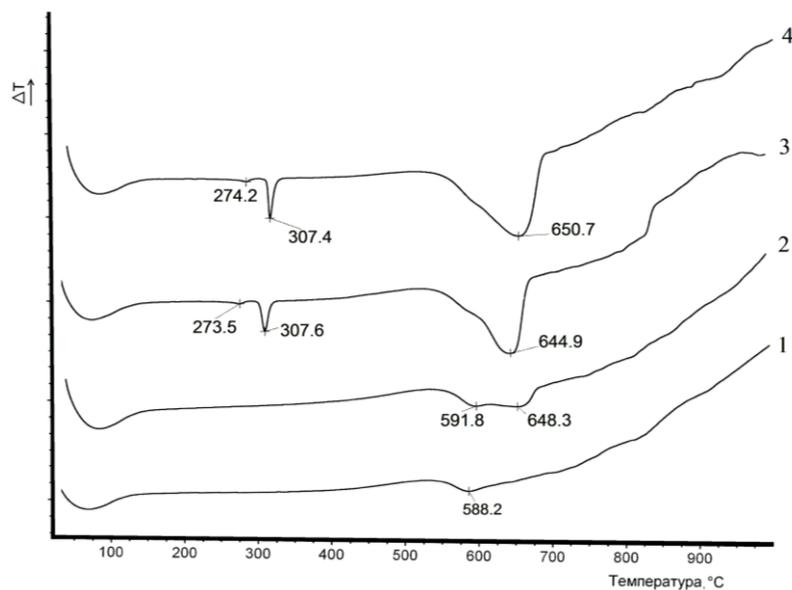


Рисунок 1 –
Дифференциально-сканирующая
калориметрия образцов:
1- стекло;
2 - стекло+CaCO₃;
3 - стекло+NaNO₃;
4 - стекло+ NaNO₃+ CaCO₃

Применяя метод ДСК (рис. 1), было установлено, что $t_{\text{разл}}\text{CaCO}_3=648,3^\circ\text{C}$, $t_{\text{разл}}\text{NaNO}_3=307,6^\circ\text{C}$, $t_{\text{разм}}\text{стекла}=588,2^\circ\text{C}$. Как видно из рисунка 1, кривая температуры размягчения исходной стекломассы сместилась с температуры $588,2^\circ\text{C}$ и составила $644,9^\circ\text{C}$, что очень близко к температуре разложения CaCO₃.

Исходя из данных литературного обзора, в качестве основного газообразующего компонента был выбран CaCO₃, а в качестве дополнительного газообразователя - NaNO₃, который может изменить кристаллическую структуру стекла, тем самым изменять температуру размягчения последнего.

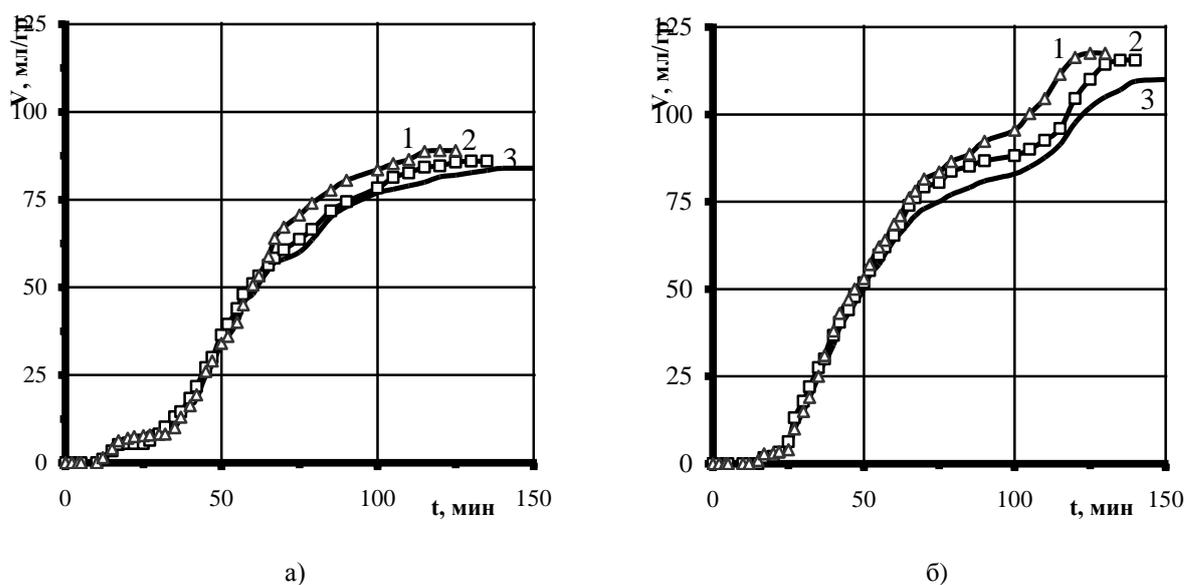


Рисунок 2 - Кинетика разложение NaNO₃(а) и CaCO₃(б) при температурах
1 - 600 °C; 2 - 650 °C; 3 - 700 °C

Далее представлены результаты исследований по разработке газообразующей системы для получения пеностекла пониженной плотности. На рис. 2 представлена кинетика

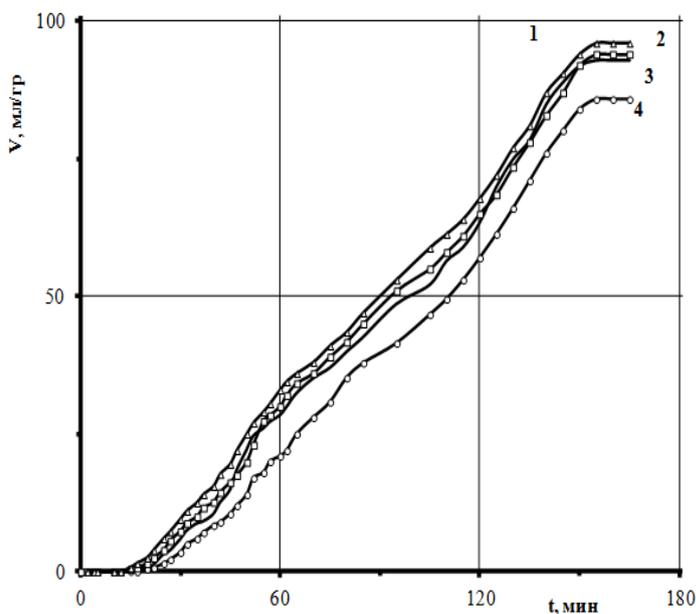


Рисунок 3 - Кинетика разложение смеси NaNO_3 , CaCO_3 , при 650°C , при соотношении компонентов (масс.ч.) $\text{NaNO}_3:\text{CaCO}_3$: 1:0,8(1); 1:0,6(2); 1:0,37(3); 1:0,2(4)

разложения исследуемых газообразователей при различных температурах. На рисунке видно, что разложение отдельных компонентов происходит не равномерно во всем исследуемом температурном интервале, что, как будет показано в дальнейшем, приводит к получению изделия с неравномерной структурой с образованием раковин.

Как видно из рисунка 3 процесс газовыделения смеси газообразователей CaCO_3 и NaNO_3 проходит более плавно, что способствует равномерному образованию мелкоячеистой струк-

туры в период перехода стекла из твердого состояния в пиропластическое и обратно.

Четвертая глава. С использованием результатов предыдущей главы были определены основные технологические параметры процесса получения пеностекла.

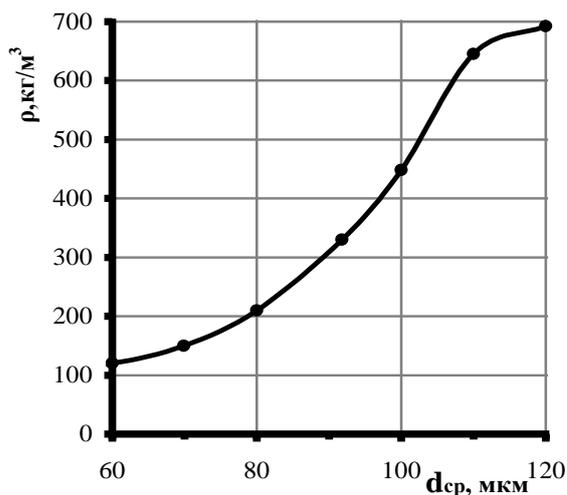


Рисунок 4 – Зависимость кажущейся плотности пеностекла от среднего размера частиц стекла.

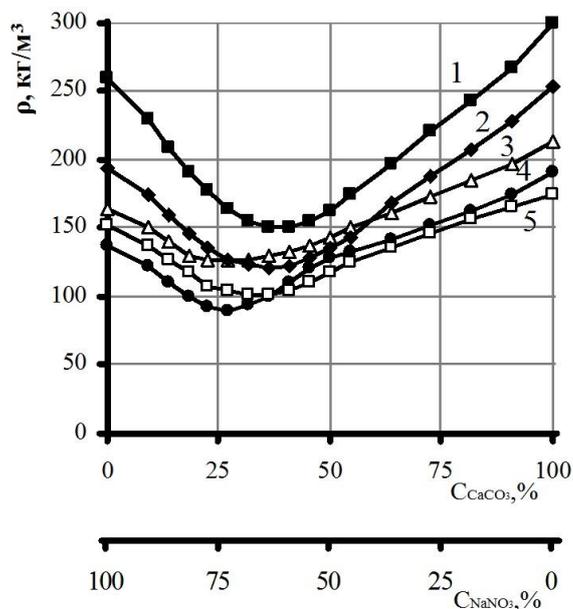


Рисунок 5 – Зависимость кажущейся плотности вспененного материала от соотношения компонентов газообразователя при $\text{NaNO}_3=\text{const}$ и температурах, $^\circ\text{C}$:

500(1), 550(2), 600(3), 650(4), 700(5).

При использовании порошкового способа изготовления пеностекла одним из важнейших факторов, влияющих на качество пеноматериала, является средний размер частиц стекла. На рисунке 4 видно, что уменьшение среднего размера частиц позволяет снизить плотность с 700 до 110 кг/м³. Поэтому в дальнейшем эксперименты проводили на фракции стекла 60-70 мкм.

Было исследовано влияние соотношения используемых газообразователей на кажущуюся плотность исследуемого пеноматериала. Установлено (рис.5), что эти зависимости имеют экстремальный характер во всем диапазоне исследуемых температур. Оптимальное соотношение газообразователей зависит от температуры. Так при температуре 500°C минимальная плотность наблюдается при соотношении NaNO₃:CaCO₃ (% масс.) 1,4:0,8, а при температуре 700 °C оптимальное соотношение составляет 1,6:0,6, которое позволяет получить пеноматериал с плотностью менее 100 кг/м³.

Результаты, представленные на рисунке 6, позволяют определить минимальное

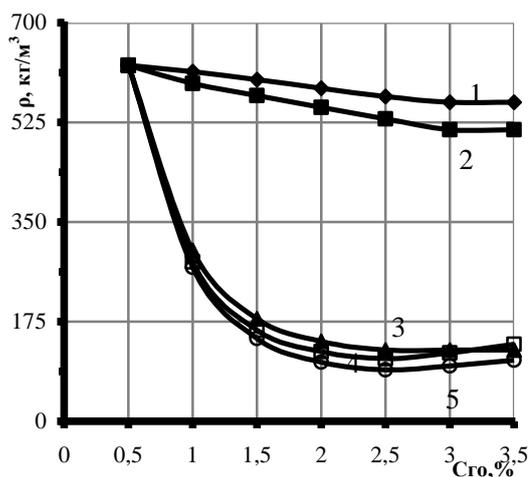


Рисунок 6 – Зависимость кажущейся плотности пеноматериала от количества газообразователя при температуре, °C: 500(1), 550(2), 600(3), 650(4), 700(5).

количество газообразующей композиции для получения пеностекла с минимальной кажущейся плотностью, которая составляет более 2%. В дальнейшем при разработке технологии получения пеноматериала, использовали концентрацию газообразующей смеси 2,2%.

С использованием методов математического моделирования были получены зависимости кажущейся плотности пеноматериала от содержания газообразователя (NaNO₃:CaCO₃ = 1:0,37) и времени вспенивания, которые позволяют определить

оптимальное время вспенивания при различных температурах.

На рисунке 7 представлена такая зависимость при температуре 660 С. Как видно из графика при времени вспенивания 20 минут и содержании газообразователя 1,5% минимальная плотность материала составила 240 кг/м³, тогда как при вспенивании 40 минут плотность составляет 120 кг/м³. При разработке технологии получения пеноматериала с низкой кажущейся плотностью за основу был выбран порошковый способ изготовления пеностекла, состоящий из двух стадий: производство вспенивающейся композиции и производство из нее пеноблоков.

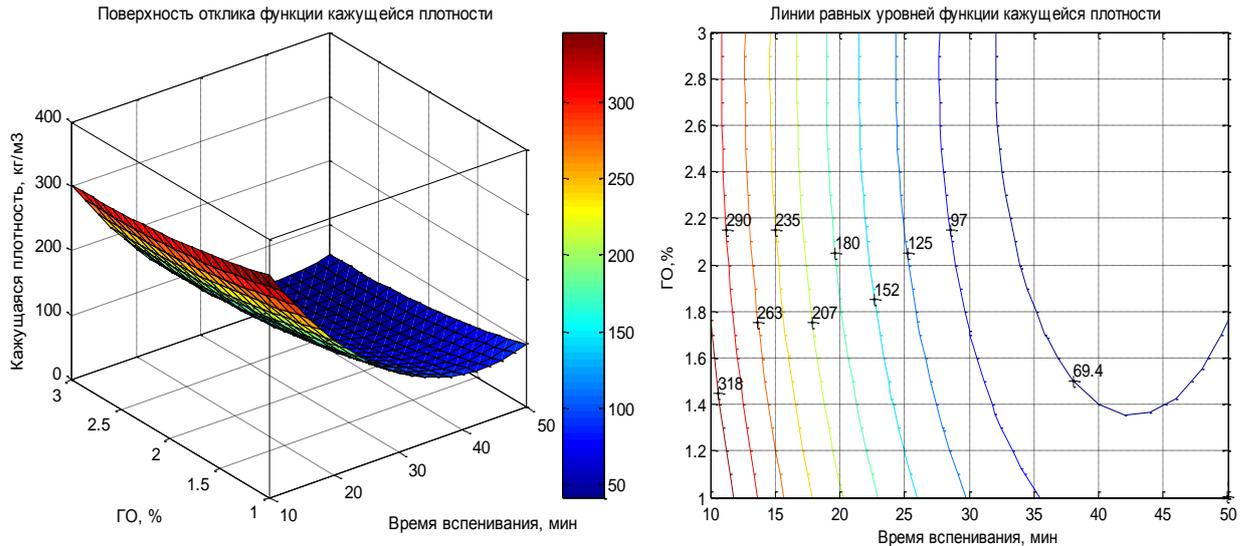
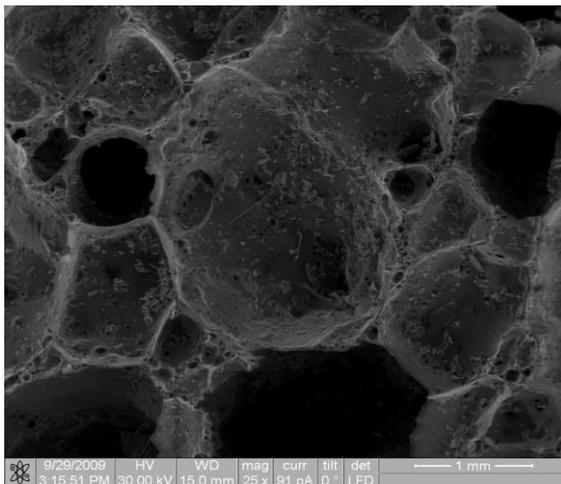
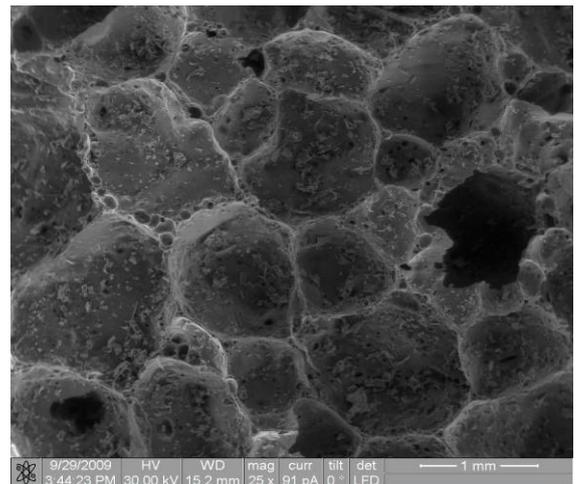


Рисунок 7 - Зависимость кажущейся плотности пеноматериала от содержания газообразователя ($\text{NaNO}_3:\text{CaCO}_3 = 1:0,37$) и времени вспенивания при температуре 660°C .

В пятой главе представлены результаты исследований физико-механических свойств полученных пеностекол. Как известно важнейшими параметрами, влияющими на свойства пеноматериала, является его плотность, равномерность пористой структуры и средний размер пор. Получение равномерной мелкоячеистой структуры возможно при использовании нуклеирующих агентов. На рисунке 8 представлены микрофотографии образцов с нуклеирующим агентом - каолином (рис. 8б) и без нуклеирующего агента (рис. 8а). Как видно из рисунков, введение каолина уменьшает средний размер пор и делает всю структуру более равномерной. Поэтому во всех дальнейших экспериментах использовалась композиция содержащая в качестве нуклеирующего агента каолин в количестве 4%.



(а)



(б)

Рисунок 8 - Микрофотографии образцов пеноматериала без нуклеирующего агента (а) и с нуклеирующим агентом (б)

На рисунке 9,10,11 представлены зависимости теплопроводности, прочности при сжатии, водопоглощения от кажущейся плотности пеностекла. Как видно из рисунков

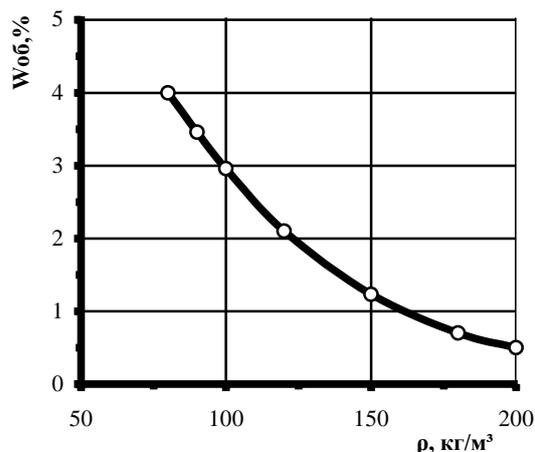


Рисунок 9 - Зависимость водопоглощения от кажущейся плотности

прочностные свойства практически не зависят от состояния образцов. В тоже время с понижением плотности происходит увеличение водопоглощения. Так при плотности 150 кг/м³ водопоглощение составляет 1,2%, а при плотности 100 кг/м³ водопоглощение составляет уже 3%. Наряду с этим выявлено, что теплопроводность образца ухудшается в водонасыщенном состоянии на 4%-13%.

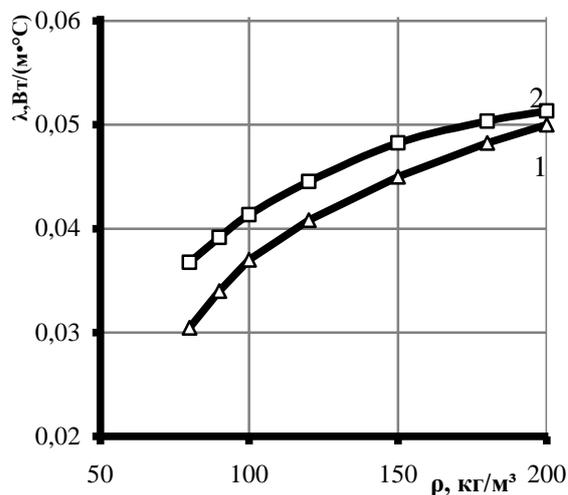


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента теплопроводности от кажущейся плотности пеноматериала 1 - сухое состояние, 2 - водонасыщенное состояние

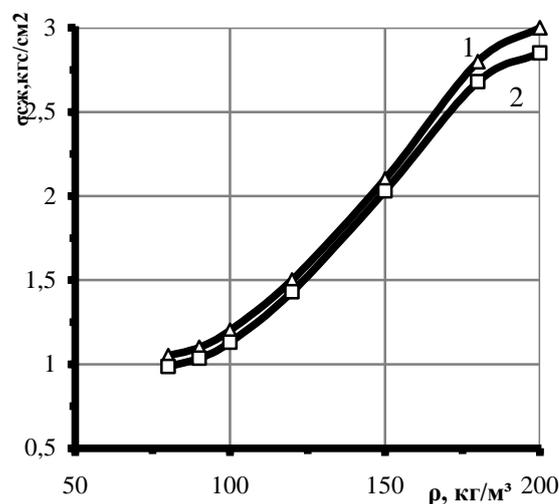


Рисунок 11 - Зависимость прочности при сжатии от кажущейся плотности пеноматериала 1-сухое состояние, 2-водонасыщенное состояние

По нашему мнению, такое изменение свойств пеноматериала обусловлено тем, что полученные образцы имеют частично открытопористую структуру, и с уменьшением плотности пеноматериала увеличивается число открытых пор.

Большое значение для строительных материалов имеет их морозостойкость, поэтому в работе изучалась зависимость выше исследованных свойств от количества циклов заморозки. Для исследования влияния морозостойкости (рис.12,13) на эксплуатационные свойства пеноматериала был проведён активный эксперимент. К реализации был принят D-оптимальный план, полученный с помощью команды системы Matlab, позволяющий провести математическую, статистическую обработку экспериментальных данных при варьировании 2-х факторов (плотность - x_1 , число циклов заморозки - x_2) на 3-х уровнях.

Также были построены поверхности отклика выходных параметров и графики равных уровней. После обработки экспериментальных данных на ПЭВМ с помощью разработанной Matlab программы были получены уравнения регрессии, имеющие следующий вид:

$$\lambda = 0,0491 + 0,0101 \cdot (x_1 - 140) / 60 + 0,0039 \cdot (x_2 - 50) / 50 + 0,0001 \cdot (x_1 - 140) / 60 \cdot (x_2 - 50) / 50 - 0,0051 \cdot ((x_1 - 140) / 60)^2 - 0,0001 \cdot ((x_2 - 50) / 50)^2; \quad (1)$$

$$\sigma_{сж} = 1,8578 + 0,9233 \cdot (x_1 - 140) / 60 - 0,1500 \cdot (x_2 - 50) / 50 - 0,0625 \cdot (x_1 - 140) / 60 \cdot (x_2 - 50) / 50 - 0,0567 \cdot ((x_1 - 140) / 60)^2 + 0,0133 \cdot ((x_2 - 50) / 50)^2; \quad (2)$$

$$W_{об} = 5,5833 - 2,733 \cdot (x_1 - 140) / 60 + 2,125 \cdot (x_2 - 50) / 50 - 0,7500 \cdot (x_1 - 140) / 60 \cdot (x_2 - 50) / 50 - 0,2000 \cdot ((x_1 - 140) / 60)^2 - 1,3250 \cdot ((x_2 - 50) / 50)^2; \quad (3)$$

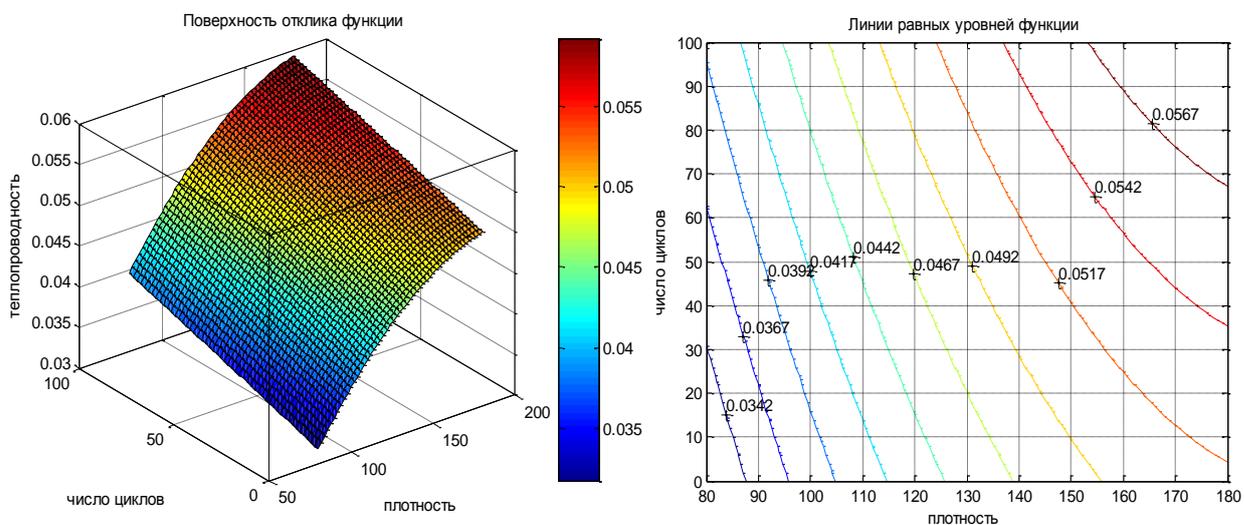


Рисунок 12 - Зависимость коэффициента теплопроводности пеностекла различной плотности от количества циклов заморозки

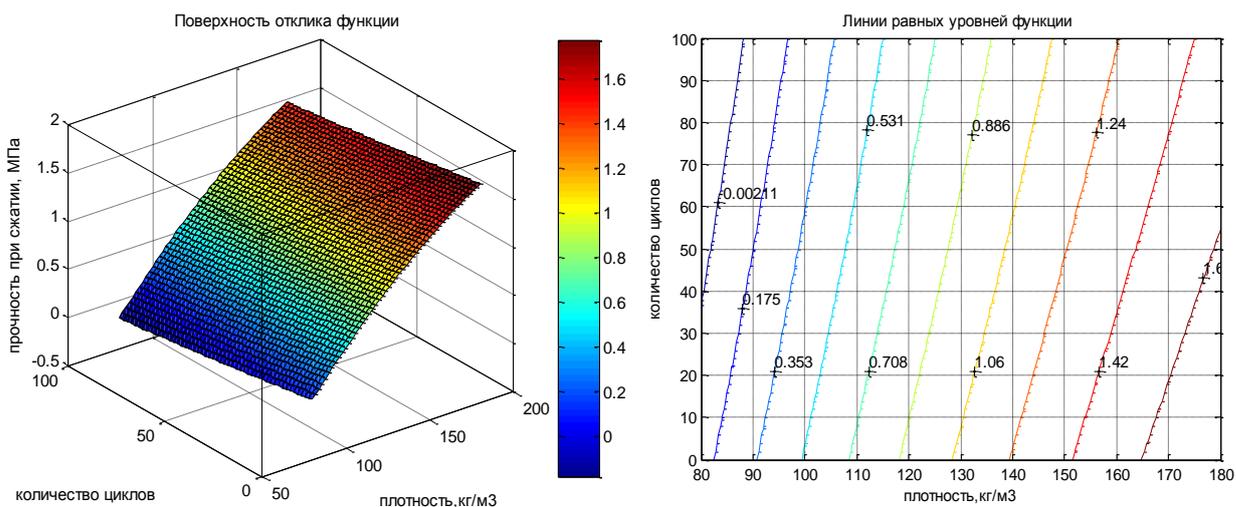


Рисунок 13 – Зависимость прочности при сжатии пеностекла различной плотности от количества циклов заморозки

Так же по аналогии были выполнены исследования зависимости объемного водопоглощения пеноматериала от количества циклов заморозки для пеностекол различной

плотности. Установлено, что при 30 циклах заморозки водопоглощение пеноматериала при плотности 100 кг/м^3 составляет 4,5 %, а при плотности 200 кг/м^3 не превышает 1,5 %. Таким образом можно сделать вывод, что разработанный материал соответствует требованиям к строительным теплоизоляционным материалам.

В шестой главе представлено практическое использование результатов диссертации. Разработана принципиальная технологическая схема производства пеностекла, которая отличается от известных:

- наличием участка подготовки вспенивающейся композиции, которая включает в себя дробильное оборудование позволяющее измельчить компоненты композиции до среднего размера частиц 70 микрон.
- конструкцией печи вспенивания, которая позволяет осуществлять вспенивание в непрерывном режиме, с получением вспененной стекломассы непрерывной длины.

Для реализации предложенной технологии была спроектирована и сконструирована опытно-промышленная линия по производству пеностекла на промышленной площадке компании "Трансполимер" (г. Костерево, Владимирская область).

Отходы дробленного листового стекла поступают на участок разгрузки сырья, где происходит растаривание мешков и подача шнековым питателем стеклопорошка в зону дробления, отходы подвергаются повторному дроблению и усреднению в шаровой вибрационной мельнице типа МВ-400 методом сухого дробления в течении 40 минут. В процессе дробления происходит введение газообразователя в количестве 2,2 %, а также введение модифицирующей добавки в количестве 4%. Полученная композиция поступает в смеситель турболопастной горизонтальной непрерывного действия типа ТЛГ- 025, где проходит равномерное смешение и усреднение уже готовой композиции.

Приготовленный таким образом состав для получения пеностекла направляют в барабанную сушилку для удаления остаточной влажности.

Готовая вспенивающаяся композиция подается на участок производства пеноблоков к бункеру дозатору двухъярусной печи, который равномерно распределяет композицию по непрерывно движущемуся транспортеру вспенивания на заданную высоту. При прохождении через печь вспенивания в течение 210 минут происходит поднятие стекломассы, далее вспененная стекломасса помощи робота перекладывается на нижний ярус печи в зону отжига, где проходит постепенное охлаждение пеноматериала в течении 840-960 минут.

После выхода готовый пеноматериал поступает на механическую обработку для придания ему правильных геометрических форм, упаковывается и отправляется на склад.

Основным элементом линии является печь вспенивания пеностекла, длина которой составляет 14 метров, скорость движения пластинчатого транспортера 4 метра в час. За период прохождения печи вспенивания, подготовленная композиция подвергается постепенному разогреву и дальнейшему вспениванию с максимальным поднятием пены до 220 мм, с последующей стабилизацией пены, поперечной резкой вспененной стекломассы в горячей зоне на блоки размером 1200*600*50-150 или 900*600*50-150 мм с последующей их перекладкой в печь отжига, длина которой составляет 20 метров, со скоростью движения транспортера 1,25 метра в час.

Непрерывно движущийся транспортер в печи вспенивания позволил создать бесконечное полотно пеностеклянной ленты с одинаковой пористостью, физико-механическими показателями и заданной плотностью.

На ряду с этим разработанный технологический процесс позволил снизить потери при производстве с 30% до 10% по сравнению с аналогичными производствами за счет снижения потерь при механической обработке изделия, а производительность данной линии составила 4600 м³ в год.

Предложенная технология позволила получить в промышленных условиях теплоизоляционный материал, основные свойства которого в сравнении с производимым в настоящее время материалом представлены в таблице.

Таблица. Свойства теплоизоляционных материалов

Характеристики	Разработанное пеностекло	Пеностекло «Foamglass» США	Пеностекло «Гомельстекло» Беларусь	Пеностекло «Неопорм» Россия	Базальтовые плиты «Техноколь» Россия
Кажущаяся плотность, кг/м ³	80-150	120-250	170-190	130-160	150-200
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК	0,03-0,05	0,04-0,1	0,048	0,047-0,05	0,05-0,06
Прочность при сжатии, МПа	1,0-3,0	0,7-4,0	< 0,7	1-2	0,02-0,03
Водопоглощение, % об., не более	3	2	5	<1	1-5
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,025	0	0,001	0	0,53
Верхняя температура эксплуатации, °С	450-550			490	250
Группа горючести	НГ				Г2
Период эксплуатации, лет	50				10-15

Как видно из таблицы, разработанный материал имеет более низкий коэффициент теплопроводности, более высокую прочность и низкую плотность. Кроме того он не выделяет сероводород при эксплуатации.

В настоящее время выпущено 1500 м³ пеностекла, которые были использованы рядом строительных предприятий в различных сферах строительства.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ научной и патентной литературы показал, что в строительном материаловедении накоплен большой теоретический и практический материал о теплоизоляции зданий и сооружений. Установлено, что не один из представленных материалов полностью не отвечает требованиям предъявляемым к теплоизоляционным строительным материалам, что связано с недостаточностью как теоретической так и практической проработки вопросов возникающих при получении легкого пористого материала на основе неорганического связующего, в частности практически не рассмотрен вопрос о необходимости совместимости температуры разложения газообразователя и размягчения исходного материала.
2. Разработан теплоизоляционный материал с коэффициентом теплопроводности 0,032 Вт/(м·К) и кажущейся плотностью 100 кг/м³, строительного назначения из отходов листового стекла, имеющий высокие конечные свойства.
3. Показано, что получение пеноматериала с минимальной плотностью возможно лишь при использовании комплексного газообразователя, состоящего из основного газообразователя (CaCO₃) и дополнительного (NaNO₃), выполняющего роль газообразователя и вещества, способного изменять температуру размягчения стекла.
4. Исследованы факторы, влияющие на свойства полученного материала. Определен состав предложенного газообразователя и его оптимальное количество. Показано что, для получения мелкоячеистой равномерной структуры в композицию необходимо вводить нуклеирующий агент, работающий при температурах 600-800 °С. Установлено минимальное количество каолина (4%), способного играть роль такого нуклеирующего агента.
5. Изучены физико-механических свойств полученного пеноматериала. Установлено, что пеноматериал содержит как закрытые, так и открытые ячейки. Благодаря сочетанию открытых и закрытых пор материал имеет высокую прочность как в сухом так и в водонасыщенном состоянии (разница в свойствах не более 10%) и высокую морозостойкость до 100 циклов.
6. Разработан технологический процесс получения пеностекла, в виде непрерывной ленты шириной 900 мм и толщиной 50-200 мм., позволяющий сократить на 30% количество отходов при одновременном повышении производительности, а так же снижение энергозатрат

за счет снижения температуры вспенивания с 850 °С (в случае применения углеродных газообразователей) до 660 °С (для разработанной композиции).

7. Выпущена опытная партия теплоизоляционного материала, которая была использована строительными организациями при гражданском и промышленном строительстве.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в перечень, определенный ВАК:

1. Никонов А.С. Ресурсосберегающие неорганические материалы в строительстве/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Экология и промышленность России, №10 октябрь 2012. -С. 26-27
2. Никонов А.С. Газообразователи для получения пористого стекла пониженной плотности/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Известия вузов. Химия и химическая технология. Т 56, №.8 2013. -С.67-70
3. Никонов А.С. Эксплуатационные свойства теплоизоляционного материала на основе отходов стекольной промышленности/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Известия вузов. Строительство. №7 (655) 2013. -С.37-40
4. Никонов А.С. Вспенивающая система для получения пеностекла низкой плотности/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Приволжский научный журнал. № 2 (38) 2016. -С.89-93

Патенты РФ:

5. Патент РФ на изобретение «Способ получения пеностекла и состав для получения пеностекла» №2417958, зарегистрированный 10 мая 2011 года.

Публикации в других изданиях:

6. Никонов А.С. Инновационный теплоизоляционный материал в строительстве/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Исследования и инновации в строительстве: материалы международной научно-технической конференции - г. Пенза: ПГУАС, 2012г.-С.63-65
7. Никонов А.С. Разработка технологии производства теплоизоляционного материала на неорганической основе с использованием отходов стекла /Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Научно-технические материалы XIV Международной научно-технической конференции - г. Тула, ТГПУ, МИТХТ, 2012г.-С.346
8. Никонов А.С. Ресурсосберегающие теплоизоляционные материалы в строительстве/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Проблемы энергосбережения в промышленности и жилищно-коммунальном комплексе: материалы XIII Международной научно-практической конференции- г. Пенза: ПГУАС, 2012г.-С.168-170
9. Никонов А.С. Теплоизоляционные материалы пониженной плотности на основе отходов стекольной промышленности/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Инновационные мате-

риалы и технологии: материалы международной научно-технической конференции- г. Белгород: БГТУ, 2011г.-С.36-40

10. Никонов А.С. Использование отходов стекольной промышленности для получения теплоизоляционного материала/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Новые химические технологии: производство и применение: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции - г. Пенза: ПГУ, 2011г. -С.63-64
11. Никонов А.С. Разработка газообразователя для получения пористого стекла с низкой кажущейся плотностью на основе измельченного стеклобоя/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Международный год химии: материалы молодежной конференции- г. Казань: КГТУ, 2011г.-С.207
12. Никонов А.С. Энергоэффективные теплоизоляционные материалы в строительстве/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Экономические и технические аспекты безопасности строительных критических инфраструктур: материалы международной конференции- г. Екатеринбург: УрФУ, 2015г.-С.130-132
13. Никонов А.С. Разработка рецептуры и технологии производства эффективного теплоизоляционного материала на неорганической основе/ Никонов А.С., Панов Ю.Т.// Научно-технические химические технологии: материалы XIII Международной научно-технической конференции- г. Иваново-Суздаль, 2010г.-С.63