

На правах рукописи



Гольцман Наталия Сергеевна

**ПЕНОСТЕКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ
И ИЗДЕЛИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2018

Работа выполнена на кафедре «Общая химия и технология силикатов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель:

Яценко Елена Альфредовна
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Котляр Владимир Дмитриевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (академия строительства и архитектуры)

Пушкарская Ольга Юрьевна
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство, технологические процессы и машины» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (Волжский политехнический институт (филиал))

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород

Защита состоится «25» мая 2018 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 999.194.02 при ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ауд. Б-203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Акчурин Т.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из главных задач ФЦП «Жилище» на 2018-2020 годы является стимулирование эффективности развития жилищного строительства в регионах. Решению проблемы дефицита доступного и комфортного жилья может способствовать развитие технологий быстровозводимого строительства. На фоне ужесточения требований к безопасности строительных материалов (Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности») и энергоэффективности зданий (Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности») становится актуальной разработка негорючих долговечных теплоизоляционных материалов, на основе которых возможно создавать конструкционные элементы для быстровозводимых зданий.

Практически единственным материалом, удовлетворяющим всем указанным требованиям, является пеностекло – ячеистое стекло, обладающее совокупностью изоляционных и эксплуатационных свойств (долговечность, инертность к воздействию внешней среды и вредителей, полная пожарная безопасность и пр.). Основным недостатком пеностекла является его сравнительно высокая цена, обусловленная использованием в качестве основного сырья дефицитного боя стекла. Одним из наиболее перспективных путей решения данной проблемы является замена стеклобоя на вторичные материалы, что позволяет снизить как себестоимость материала, так и экологическую нагрузку путем уменьшения объемов отходов.

Особенности технологии пеностекла позволяют получать на его основе широкий спектр изделий: блоки, плиты, фасонные изделия, щебень, гранулы и т.д. Плитные и фасонные изделия используются для утепления стен и поверхностей сложной формы, гранулы и щебень – как заполнитель в дорожном строительстве или для производства легких бетонов. Следовательно, на основе изделий из пеностекла возможно получение как внешних несущих, так и внутренних изоляционных слоев панелей для быстровозводимого строительства. Таким образом, исследования по разработке технологии изделий из пеностекла с применением вторичных сырьевых материалов являются актуальными.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с заданием №13.1236.2017/4.6 «Разработка энергоэффективных и экологически безопасных систем децентрализованного водо- и энергоснабжения малых рекреационных объектов в условиях Южного региона Российской Федерации».

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области получения пористых теплоизоляционных материалов и изделий, изучения их структуры и эксплуатационных свойств проводятся научными группами Донского государственного технического университета (В.Д. Котляр, Д.Р. Маилян), Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (Д.Р. Дамдинова), Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (В.И. Ефимов), Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (Е.А. Яценко) и др. Исследований в области применения изделия из пеностекла на основе вторичного сырья как

основных материалов для создания изделий для внутренней и наружной теплоизоляции ранее не проводилось.

Цель работы: разработка составов и технологии пеностекольных материалов с применением вторичного сырья для создания изделий для внутренней и наружной теплоизоляции.

Задачи:

- разработка составов и технологии пеностекла на основе вторичного сырья;
- разработка технологии изделий на основе пеностекольных материалов (плит из пеностекла, пеностекольных гранул), исследование их физико-механических свойств;
- разработка предложений по применению пеностекольных изделий для получения легких бетонов на пористых заполнителях и многослойных строительных панелей;
- анализ теплотехнических и экономических параметров предлагаемых изделий на основе пеностекла в сравнении с современными аналогами.

Научная новизна работы.

Впервые выявлены особенности формирования структуры и свойств пеностекла (плотность, пористость, прочность, теплопроводность) при использовании разработанной порообразующей смеси «глицерин : жидкое стекло : вода». Установлено оптимальное соотношение компонентов смеси (глицерин – 3, жидкое стекло – 4, вода – 3) и их влияние на процесс порообразования.

Показана эффективность применения вторичных сырьевых силикатных материалов (стеклобоя и шлаковых отходов ТЭС) при производстве пеностекла с равномерной пористой структурой. Установлены оптимальные соотношения сырьевых компонентов (шлаковый отход ТЭС – 22 мас. %; стеклобой БТ-1 – 34 мас. %; стеклобой М4 – 34 мас. %; порообразующая смесь – 10 мас. %).

Установлена зависимость физико-механических свойств синтезированных материалов от температурно-временного режима вспенивания и выявлены оптимальные параметры (температура – 840 °С, время – 10 минут).

Теоретически обосновано и доказано, что многослойная строительная панель на основе пеностекольных материалов (внешние слои (легкий бетон на пеностекольных гранулах) – 90 мм; внутренний слой (плита из пеностекла) – 90 мм) полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите (сопротивление теплопередаче 2,72 (м²·К)/Вт), огнестойкости и пожаробезопасности (класс горючести НГ), защите от переувлажнения (отсутствует конденсация влаги внутри панели).

Теоретическая и практическая значимость работы:

- выявлен оптимальный состав порообразующей смеси для производства пеностекольных материалов;
- установлено влияние температурно-временного режима, вида и соотношения сырьевых компонентов (компоненты порообразующей смеси, стеклобой различных марок, шлаковый отход) на структуру и свойства пеностекла;
- определен оптимальный состав пеностекла, мас. %: шлаковый отход ТЭС – 22; стеклобой БТ-1 – 34; стеклобой М4 – 34; порообразующая смесь – 10;

- установлены режимы синтеза изделий на основе пеностекла (гранул и плит), проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств;

- предложен состав легкого бетона на основе пеностекольных гранул, определены его основные физико-механические свойства;

- рассчитана конструкция и теплотехнические характеристики многослойной строительной панели на основе пеностекольных материалов;

- разработана технология и аппаратная схема получения изделий из пеностекла, проведена оценка экономической эффективности технологии, установившая жизнеспособность проекта и конкурентоспособность продукции.

Методология и методы исследования. Методологической основой явилась теория высокотемпературной поризации пластичных масс. При нагревании шихты происходят процессы твердофазного и жидкофазного спекания. Газ, образующийся при разложении порообразователя, в процессе размягчения стекломассы формирует пористую структуру. Задачи по изучению процессов размягчения и вспенивания пеностекольных материалов, фазового состава, макро-, микроструктуры и свойств полученных материалов проводилось с использованием сканирующей электронной микроскопии и физико-химических методов испытаний согласно соответствующим ГОСТ.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности влияния температурно-временного режима, вида и соотношения сырьевых компонентов (компоненты порообразующей смеси, стеклобой различных марок, шлаковый отход) на структуру и свойства пеностекла;

- состав и температурно-временной режим получения пеностекла, оптимизированные с помощью методов планирования эксперимента;

- режимы синтеза и результаты экспериментальных исследований основных физико-механических свойств изделий на основе пеностекла:

- предложения по составу легкого бетона на основе пеностекольных гранул;

- теплотехнические характеристики многослойной строительной панели на основе пеностекольных изделий;

- разработанная технология и аппаратная схема получения изделий из пеностекла, оценка экономической эффективности технологии.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается комплексом современных физико-химических методов исследования и стандартных методик, регламентированных нормативными документами, и воспроизводимостью результатов экспериментов. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены при непосредственном участии автора.

Апробация результатов исследования. Результаты научной работы представлены на ряде международных, всероссийских и региональных конференций: Международная научная конференция «Стекло: наука и практика» (GlasSP-2017), г. Санкт-Петербург, 2017 г.; Международная научно-техническая конференция «Строительство, архитектура и техносферная безопасность», г. Челябинск, 2017 г.; региональная научно-техническая конференция (конкурс научно-технических работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области «Сту-

денческая научная весна», г. Новочеркасск, 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии и инновации (XXII научные чтения)», г. Белгород, 2016 г.; Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития науки в России и мире», г. Уфа, 2016 г.; Международная конференция «Стеклопрогресс-XXI», г. Саратов, 2014 г.

По тематике исследований диссертационной работы выполнены следующие контракты: Соглашение № 14.574.21.0124 от 27 ноября 2014 г. «Разработка ресурсосберегающей технологии многослойных теплоизоляционно-декоративных стеклокомпозиционных материалов для строительства энергоэффективных зданий», в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» Министерства образования и науки РФ.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс ЮРГПУ(НПИ) при чтении курсов «Теоретические основы моделирования новых материалов», «Технологии современных силикатных материалов», «Специальные материалы будущего». Проведена опытно-промышленная апробация разработанной технологии пеностекольных гранул в условиях ООО ИТЦ «ДонЭнергоМаш».

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в журналах, индексируемых в БД Scopus и Web of Science, 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического описания литературных источников и приложений. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включающего 62 таблицы, 26 рисунков, список литературы из 118 наименований и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований, описана апробация и внедрение полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе (Состояние вопроса, обоснование цели и задач исследования) описаны современные способы теплоизоляции зданий, виды теплоизоляционных материалов и способы их получения. Установлено, что по комплексу свойств наиболее перспективным является пеностекло (ячеистое стекло).

Рассмотрены особенности технологии пеностекла и варианты применения пеностекольных изделий, в том числе в составе композиционных материалов (легкие бетоны, многослойные строительные панели). Описаны основные мировые и отечественные разработки в области технологии пеностекла, а также применения его в современном строительстве.

По результатам анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе (Методика проведения исследований и характеристика сырьевых материалов) приведена методология исследований, описаны основные

характеристики используемых сырьевых материалов, а также технологические этапы синтеза образцов пеностекла с применением вторичного сырья, представленные на рисунке 1.

Приведена технология производства легкого бетона и многослойных строительных панелей на основе пеностекляных изделий.

Исследования структуры свойств пеностекляных изделий выполнялись согласно стандартным методикам в соответствии с действующими государственными стандартами, а также с помощью оптической и электронной микроскопии.



Рисунок 1 – Температурно-временной режим синтеза пеностекла: 1 – нагрев; 2 – вспенивание; 3 – резкое охлаждение (фиксация структуры); 4 – охлаждение (отжиг)

В третьей главе (Разработка составов и технологических параметров синтеза пеностекла) представлены исследования по влиянию соотношения исходных сырьевых материалов и технологических параметров синтеза на структуру и свойства пеностекла.

В первую очередь, было выбрано оптимальное соотношение компонентов порообразующей смеси «жидкое стекло – глицерин – вода». Для исследования за основу был взят модельный состав, мас. %: стеклобой БТ-1 – 90; порообразующая смесь – 10. На первом этапе были разработаны составы, в которых варьировалось соотношение «жидкое стекло – глицерин». Отформованные образцы подвергали термической обработке согласно рисунку 1 при температурах вспенивания 800, 825, 850 °C. Составы шихт представлены в таблице 1, а плотность синтезированных образцов – на рисунке 2.

Таблица 1 – Шихтовые составы пеностекла с различным соотношением «жидкое стекло – глицерин»

	Содержание компонентов, мас. %, в составе, №								
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
Стеклобой БТ-1	90								
Жидкое стекло	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Глицерин	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Было установлено, что со смещением соотношения «жидкое стекло : глицерин» в сторону глицерина наблюдается образование крупных дефектных пор и изменение цвета материала с равномерно темного на светлый с темными порами. Это объясняется ролью компонентов шихты в процессе вспенивания. Стеклопорошок при температуре вспенивания находится в высоковязком состоянии, и отдельные частицы стекла сплавляются с образованием силикатного каркаса, отвечающего за прочностные характеристики материала.

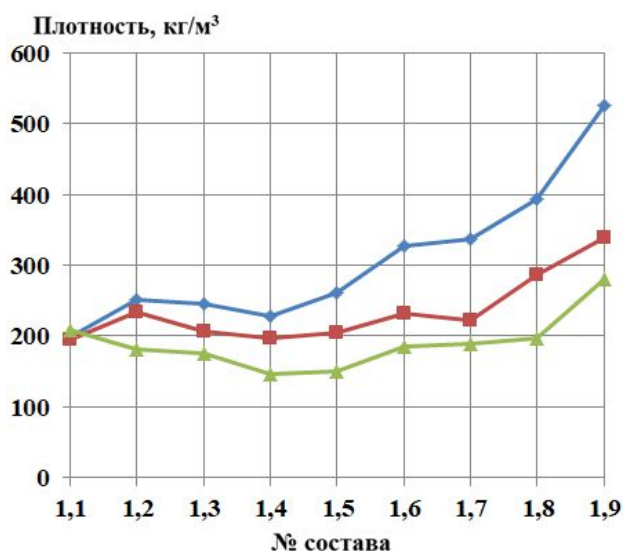


Рисунок 2 – Зависимость плотности пеностекла от соотношения «жидкое стекло – глицерин»

бран состав 1.4 с соотношением «жидкое стекло : глицерин» = 6 : 4.

Жидкое стекло и глицерин являются вязкими жидкостями, что усложняет технологические операции гомогенизации шихты. Для снижения вязкости были разработаны составы шихт, где порообразующая смесь состава 1.4 была частично заменена водой при соотношении «смесь: вода» от «9 : 1» для состава 2.1 до «1 : 9» для состава 2.5. Изменение плотности пеностекла в зависимости от количества воды представлено на рисунке 3, изменение структуры пеностекла – на рисунке 4.

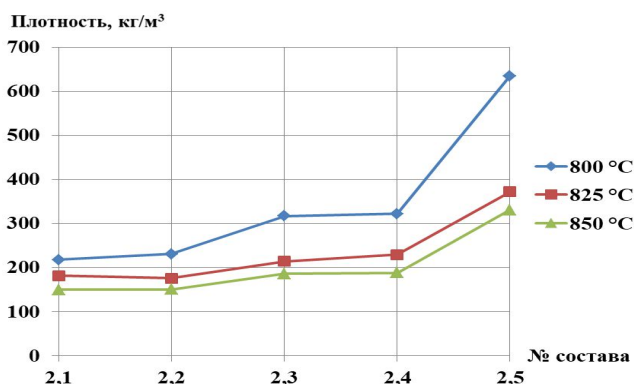
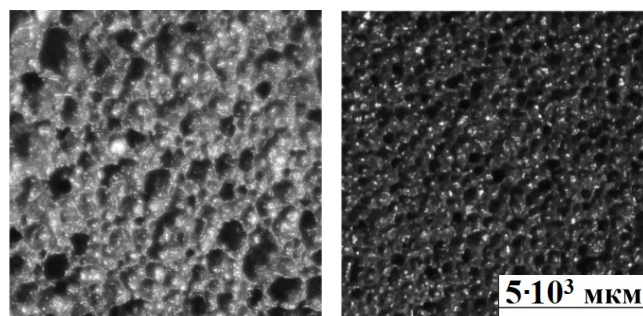


Рисунок 3 – Зависимость плотности пеностекла от содержания воды в смеси



- без воды

- с водой

Рисунок 4 – Зависимость структуры пеностекла от содержания воды в смеси

Исследования показали, что введение даже малого количества воды приводит к значительному увеличению однородности пористой структуры, что связано, в первую очередь, с уменьшением вязкости смеси и ее лучшим распределением в шихте. Оптимальным был выбран состав 2.2, соответствующий соотношению «смесь : вода» = 7 : 3. В результате был установлен оптимальный модельный состав пеностеклянной шихты, мас. %: стеклобой БТ-1 – 90; жидкое стекло – 4; глицерин – 3; вода – 3.

Было исследовано влияние технологических параметров синтеза (температура и время вспенивания, фракционный состав шихты) на структуру и свойства пеностекла.

Для исследования влияния температуры вспенивания образцы обжигали при температурах 655-880 °С с шагом 15 °С без выдержки.. Зависимость плотности образцов от температуры вспенивания представлена на рисунке 5.

Загрузка образцов в печь происходит при температуре 600 °С. Следовательно, все низкотемпературные процессы, (разложение глицерина (≈ 260 °С), испарение воды (100 °С)) начинают происходить одновременно, и в то же время начинается спекание шихты. Поэтому при температурах до 730 °С наблюдается постепенное

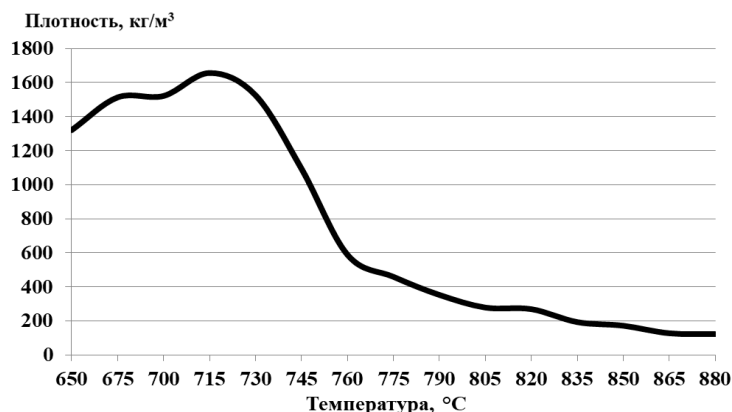
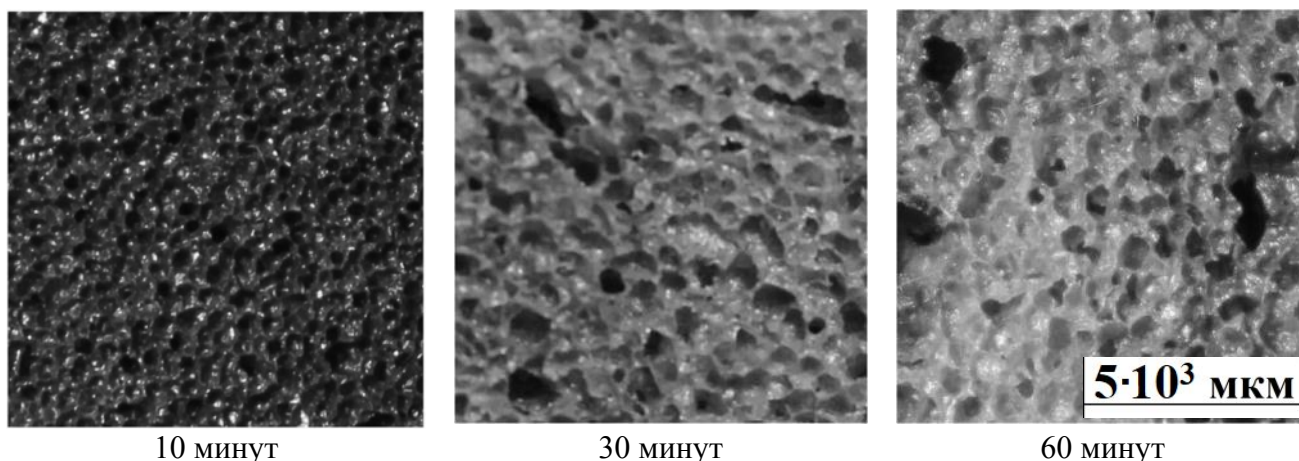


Рисунок 5 – Зависимость плотности пеностекла от температуры вспенивания

увеличение плотности, что свидетельствует о сближении частиц при спекании. При дальнейшем нагревании образца выше 730 °С начинается уменьшение плотности за счет увеличения количества газовых пор. При температурах выше 850 °С структура образца становится менее упорядоченной, поры деформируются, появляются дефекты. Оптимальным температурным интервалом для образования пористой структуры разрабатываемого материала был выбран интервал 800-850 °С.

Для исследования влияния времени вспенивания образцы термообработывали при температуре вспенивания 825 °С и времени 5, 10, 15, 20, 30 и 60 минут. Зависимость структуры образцов от времени вспенивания представлена на рисунке 6.



10 минут 30 минут 60 минут
Рисунок 6 – Микроструктура образцов при различном времени вспенивания

В результате было установлено, что вспенивание в течение 5 минут не обеспечивает равномерной пористости. Структура образцов, время вспенивания которых превышает 10 минут, также не является равномерной, поры приобретают

неправильную форму, появляются дефекты в виде единичных каналообразных пор. При времени выдержки 60 минут образец заметно оседает, что свидетельствует о том, что газы, обеспечивающие объем пеностекла в значительной степени испарились из образца. Выдержка в течение 10 минут позволяет усреднить и стабилизировать средний размер пор, не приводя при этом к излишнему их укрупнению, поэтому длительность вспенивания 10 минут является оптимальной.

Для исследования влияния фракционного состава шихты образцы термообработывали при температуре вспенивания 825 °С и времени 10 минут. Зависимость плотности образцов от фракционного состава шихты представлена на рисунке 6.

Таблица 2 – Зависимость плотности пеностекла от фракционного состава

№ состава	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
Размер частиц, мм	0,71-0,90	0,50-0,71	0,32-0,50	0,16-0,32	0,10-0,16	менее 0,1
Плотность, кг/м ³	506,91	487,70	435,97	344,31	176,15	178,28

Из таблицы видно, что с уменьшением размеров частиц шихты значительно уменьшается плотность пеностекла, что связано с лучшей гомогенизацией шихты и более быстрым плавлением тонкодисперсных частиц. В качестве оптимальной выбрана фракция 0,1-0,16 мм и менее.

Для расширения сырьевой базы для производства пеностекла, а также с целью утилизации несортных стеклоотходов была исследована возможность применения различных видов стеклобоя. Для исследования были выбраны самые распространенные виды боя: бой зеленого тарного стекла марки ЗТ-1, бой листового стекла М4, бой бесцветного тарного стекла марки БТ-1. С использованием этих видов стеклобоя были разработаны составы шихт, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Составы шихт на основе различных видов стеклобоя

Компонент	Содержание компонентов, мас. %					
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Бой тарного стекла БТ-1	90	0	0	45	0	45
Бой листового стекла М4	0	90	0	0	45	45
Бой тарного стекла ЗТ-1	0	0	90	45	45	0
Порообразующая смесь состава 2.2	10					

Далее отформованные образцы термообработывали при температурах вспенивания 800, 825, 850 °С и времени 10 минут. Затем была определена плотность, а также исследована пористая структура синтезированных образцов. Было установлено, что наименьшими показателями плотности обладает состав 4.1 на основе стеклобоя БТ-1 (150-230 кг/м³), а наибольшими – состав 4.3 на основе стеклобоя ЗТ-1 (300-410 кг/м³). Состав 4.2 на основе стеклобоя М4 приближен по показателям к составу на основе стеклобоя БТ-1 (280-150 кг/м³). Составы на основе смеси различных видов стеклобоя демонстрируют прямую зависимость увеличения

плотности при добавлении стеклобоя, при применении которого были получены более плотные образцы. Оптимальной для использования в качестве теплоизоляционного материала была выбрана смесь стекол БТ-1 и М4.

С целью замены стеклобоя на менее дефицитное сырье была исследована возможность применения шлаковых отходов ТЭС. Разработка составов осуществлялась посредством замещения стеклобоя в оптимальном составе разрабатываемого пеностекла шлаковым отходом в количестве от 5 (состав 5.1) до 30 мас. % (состав 5.6). Спекание осуществлялось порошковым способом при температурах вспенивания 800, 825, 850 °С с выдержкой 10 минут. Изменение плотности пеностекла в зависимости от количества шлакового отхода представлено на рисунке 7, изменение структуры пеностекла – на рисунке 8.

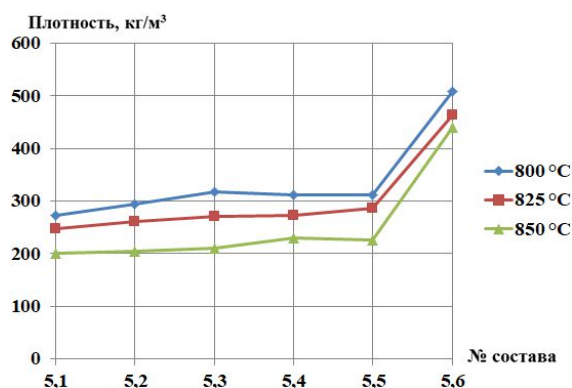
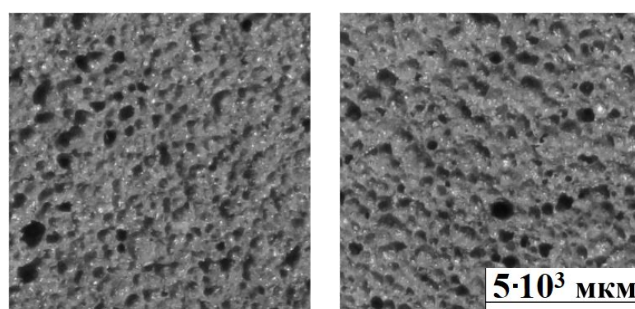


Рисунок 7 – Зависимость плотности пеностекла от содержания шлакового отхода



Состав 5.3 (15 мас. % шлакового отхода)

Состав 5.5 (25 мас. % шлакового отхода)

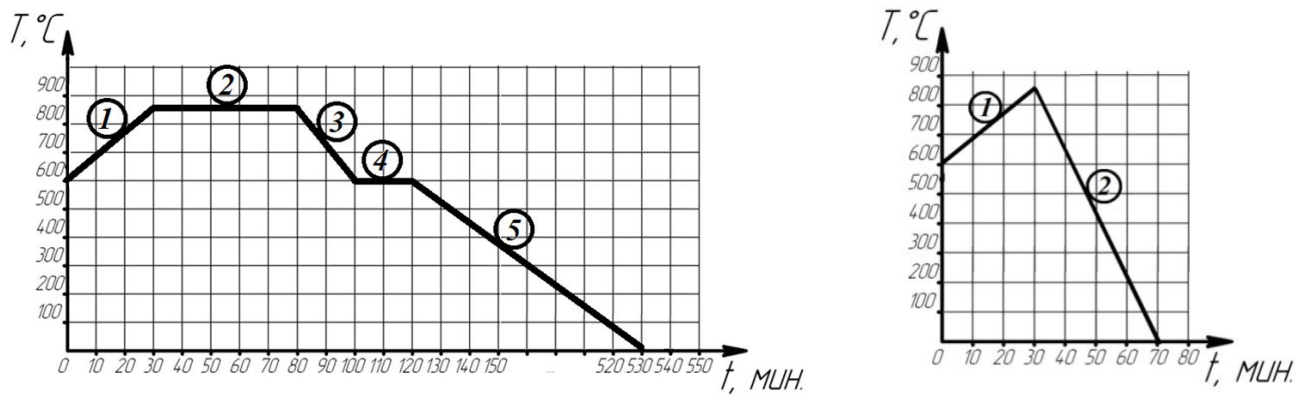
Рисунок 8 – Зависимость структуры пеностекла от содержания шлакового отхода

Было установлено, что с введением до 25 мас. % шлакового отхода наблюдается незначительное увеличение плотности образцов (200–300 кг/м³), однако, изменений структуры материала практически не наблюдается. Повышение температуры синтеза закономерно ведет к снижению плотности. У составов с содержанием шлакового отхода 30 мас. % наблюдается резкое увеличение плотности и снижение равномерности пористой структуры, плотность полученных образцов превышает 400 кг/м³. Оптимальным был выбран состав 5.5, содержащий 25 мас. % шлакового отхода ТЭС, образующий при температуре 825 °С равномерную пористую структуру с плотностью 285 кг/м³.

Далее при помощи метода планирования эксперимента была произведена оптимизация состава пеностекла, мас. %: шлаковый отход ТЭС – 22; стеклобой БТ-1 – 34; стеклобой М4 – 34; порообразующая смесь – 10. Полученный состав обладает в температурном интервале 800-850 °С плотностью 195-220 кг/м³. Оптимальный режим синтеза: температура вспенивания 840 °С, время вспенивания 10 минут.

В четвертой главе (Разработка технологии изделий из пеностекла и анализ способов их применения) выявлены особенности синтеза пеностекольных изделий (гранул и плит), определены их технико-эксплуатационные свойства согласно требованиям соответствующих государственных стандартов, разработаны предложения по применению пеностекольных изделий при производстве легких бетонов и многослойных панелей, доказана энергетическая эффективность применения таких панелей.

На основании установленных ранее зависимостей были выявлены особенности синтеза пеностекольных изделий, представленные на рисунке 9.



а) Для плит:

1 – нагрев; 2 – вспенивание; 3 – резкое охлаждение (фиксация структуры); 4 – выдержка (стабилизация температуры); 5 – охлаждение (отжиг)

б) Для гранул:

1 – нагрев; 2 – охлаждение

Рисунок 9 – Режим синтеза пеностекольных изделий

Отличия в режимах синтеза обусловлены различиями в размерах изделий. Так, плиты обладают большими размерами, что ведет к необходимости стабильного доступа кислорода со всех сторон, равномерного нагрева плиты, а также удлинения всех стадий термообработки и появления стадии 4, способствующей равномерному снятию термических напряжений по всему объему плиты. При этом, чем больше толщина изделия, тем длиннее должны быть стадии выдержки, охлаждения и отжига. В то же время из-за малых размеров гранул в стадиях выдержки с целью выравнивания температуры в объеме материала нет необходимости.

Согласно соответствующим государственным стандартам были определены технико-эксплуатационные свойства пеностекольных изделий, обобщенные результаты представлены в таблице 4. Выбранные способы и методики исследований разработанных материалов соответствуют требованиям действующей на территории РФ нормативной документации, а используемые средства (основное и вспомогательное оборудование) испытаний соответствуют современному уровню науки. Проведенные испытания позволили установить, что разработанные материалы выдержали испытания и соответствуют требованиям государственных стандартов, что подтверждает правильность разработанных технологических решений и отсутствие необходимости их доработки. Значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов разработанных изделий составляет менее 150 Бк/кг, что соответствует I классу строительных материалов ($A_{эфф} \leq 370$ Бк/кг), изделия пригодны для любых видов строительства.

Таблица 4 – Результаты исследовательских испытаний

Наименование параметра	ГОСТ	Требования к параметру	Среднее измеренное значение
а) пеностекольные гранулы			
Фракция ($d = 5$ мм; $D = 10$ мм), %	9758-2012	полный остаток на сите d : не менее 85; на сите D : не более 10	$d = 97,8$; $D = 2,6$
Насыпная плотность, кг/м ³	9758-2012	не более 400	199
Влажность, % по массе	9758-2012	не более 20	0,4
Водопоглощение, % по массе	9758-2012	не более 20	3,7
Содержание расколотых зёрен, %	9758-2012	не более 30	8,8
Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа	9758-2012	не менее 0,5	0,71
Морозостойкость при потере массы после 15 циклов замораживания и оттаивания, %	9758-2012	не более 8	5,6
Потеря массы при определении стойкости против силикатного распада, %	9758-2012	не более 5	0,175
Потеря массы при кипячении, %	9758-2012	не более 5	0,185
Содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений, %	9758-2012	не более 1	0,65
Потеря массы при прокаливании, %	9758-2012	не более 3	0,62
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	9758-2012	не более 0,16	0,06
б) плиты из пеностекла			
Плотность, кг/м ³	1602-2011	не более 500	225
Предел прочности:			
- при сжатии, МПа	826-2011	не менее 0,7	0,99
- при изгибе, МПа	12089-2011	не менее 0,35	0,40
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	25380-2014	не более 0,1	0,063
Водопоглощение по объему, %	12087-2011	не более 20	2,3
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	12086-2011	не более 0,2	0,09
Морозостойкость, циклов	12091-2011	не менее 50	50
Группа горючести	30244-94	НГ	НГ

Далее, основываясь на данных о составе, режиме синтеза и свойствах пеностекла, а также гранул и плит на его основе, были рассмотрены способы применения разработанных изделий в качестве основного материала в многослойных строительных панелях. Получение многослойных строительных панелей производилось по технологии ЗАО «Комбинат крупнопанельного домостроения» (ЗАО «ККПД»), г. Ростов-на-Дону. Панели ЗАО «ККПД» представлены трехслойными стеновыми панелями, где в качестве внешних слоев применяется керамзитобетон (1800 кг/м³), а в качестве внутреннего теплоизоляционного слоя – плиты из пенополистирола марки ПСБ-25. Учитывая свойства разработанных пеностекольных изделий, была исследована возможность замены в многослойной панели керамзитобетона на легкий бетон на основе пеностекольных гранул, а плиты из пенополистирола – на плиту из пеностекла.

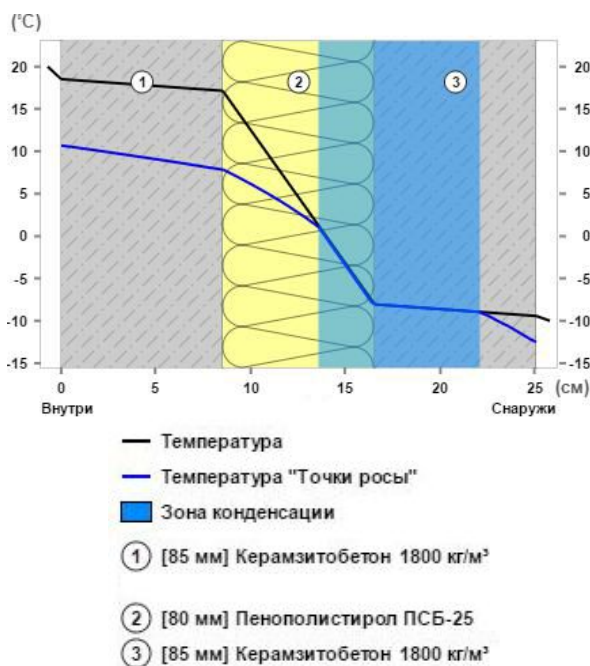
Согласно методике ЗАО «ККПД» был проведен расчет состава легкого бетона плотностью 600 кг/м³, соответствующего требованиям ГОСТ 25820-2014 для

конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона. Основные физико-механические свойства лабораторных образцов легкого бетона представлены в таблице 5.

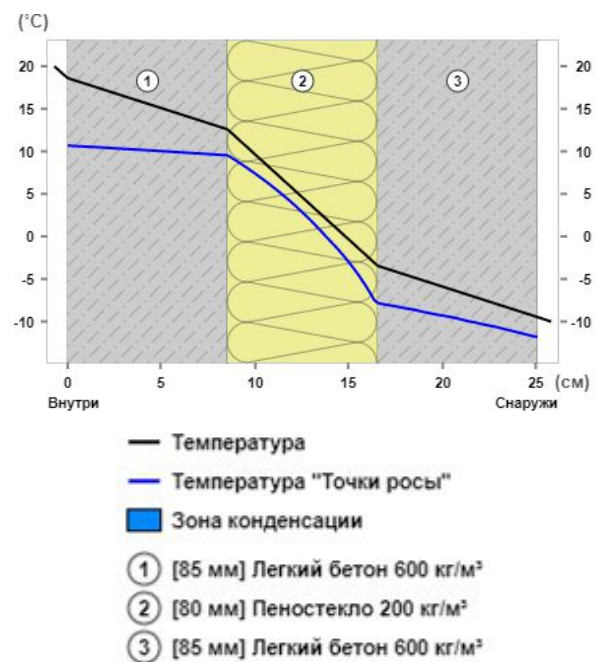
Таблица 5 – Результаты определения свойств лёгкого бетона

Прочность на сжатие, МПа	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
1,35	595	0,196

Был проведен расчет тепловых потерь разработанных многослойных строительных панелей по сравнению с типовой трехслойной стеновой панелью на основе керамзитобетона плотностью 1800 кг/м³ (наружные слои 85 мм) и плиты из пенополистирола ПСБ-25 (внутренний теплоизоляционный слой 80 мм) производства ЗАО «ККПД» (рисунок 10).



Типовая трехслойная панель (ЗАО «ККПД»)



Разрабатываемая панель

Рисунок 10 – Сопротивление теплопередаче трехслойных панелей

Было установлено что типовая панель не удовлетворяет нормам поэлементных требований к тепловой защите ($R < R_T$; $2,32 < 2,57$ (м²·К)/Вт). Трехслойная панель на основе легкого бетона на пеностеклянных гранулах плотностью 600 кг/м³ (наружные слои 85 мм) и плиты из пеностекла плотностью 200 кг/м³ (внутренний теплоизоляционный слой 80 мм) не полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите ($R < R_T$; $2,49 < 2,57$ (м²·К)/Вт). Однако в сравнении с типовой панелью, имеется ряд преимуществ, таких как отсутствие конденсации влаги внутри панели, меньший вес панели при более высоких показателях теплоизоляционных свойств, снижение нагрузки на основание здания, снижение материалоемкости конструкции, повышение огнестойкости и пожаробезопасности здания, повышение сроков эксплуатации здания.

По результатам расчета было установлено, что трехслойная панель на основе легкого бетона на пеностеклянных гранулах плотностью 600 кг/м³ (наружные

слои 90 мм) и плиты из пеностекла плотностью 200 кг/м³ (внутренний теплоизоляционный слой 90 мм) полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите ($R > R_T$; $2,72 > 2,57$ (м²·К)/Вт) и, учитывая перечисленные выше преимущества, является эффективной заменой существующим панелям.

Для подтверждения расчетных данных было проведено экспериментальное определение теплопроводности разрабатываемой панели с помощью измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03 «ПОТОК». Экспериментально определенный коэффициент теплопроводности (0,167 Вт/(м·К)) соответствует расчетному (0,166 Вт/(м·К)), что подтверждает верность рассчитанных теплотехнических параметров и эффективность предлагаемой панели.

В пятой главе (Разработка технологии производства изделий из пеностекла и оценка ее конкурентоспособности) описаны технологические и аппаратурно-технологические схемы производства пеностекольных изделий (плит и гранул), а также проведена технико-экономическая оценка предлагаемых технологий.

Технологическая схема производства пеностекольных изделий представлена на рисунке 11 и включает следующие стадии: подготовка сырьевых материалов; смешение сырьевых материалов; формование изделий заданной формы и размеров (гранулы или плиты); термическая обработка; механическая обработка.



Рисунок 11 – Технологическая схема производства изделий из пеностекла

На основании технологических схем были разработаны аппаратурно-технологические схемы производства пеностекольных гранул и плит, и произведена оценка их экономической эффективности. Было установлено, что все показатели экономической эффективности соответствуют значениям, показывающим окупаемость и доходность проекта. Также было проведено сравнение разработанных пеностекольных изделий с рыночными аналогами, установившее конкурентоспособность разработанных материалов и изделий на современном рынке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполнения исследования:

1. Установлен оптимальный состав порообразующей смеси и рассмотрено влияние технологических параметров синтеза на структуру и свойства пеностекла. Оптимальный состав порообразующей смеси, мас. %: жидкое стекло – 4; глицерин – 3; вода – 3. Длительность вспенивания 10 минут позволяет усреднить и стабилизировать средний размер пор, вследствие чего является оптимальной. Оптимальным температурным интервалом для образования пористой структуры является интервал 800-850 °С. Установлено, что с уменьшением фракционного состава шихты значительно уменьшается плотность и увеличивается объем пеностекла из-за лучшей гомогенизации и большей интенсивности нагрева тонкодисперсных частиц, что интенсифицирует процессы плавления и вспенивания образцов. В качестве оптимальной выбрана фракция 0,16 мм и менее.

2. Детально изучено и систематизировано влияние различных видов вторичных материалов на структуру и свойства синтезируемого пеностекла. Установлено, что при использовании стеклоотходов наименьшими показателями плотности обладает состав на основе тарного стеклобоя БТ-1 (230-150 кг/м³), а наибольшими – состав на основе тарного стеклобоя ЗТ-1 (410-300 кг/м³). Оптимальной для использования в качестве теплоизоляционного материала была выбрана смесь тарного стеклобоя БТ-1 и боя листового стекла М4. Установлено, что при использовании шлаковых отходов ТЭС до 20 мас. % изменений структуры и свойств материала практически не наблюдается. При содержании шлакового отхода выше 30 мас. % наблюдается снижение равномерности пористой структуры.

3. При помощи методов математического планирования эксперимента установлен оптимальный состав пеностекла, мас. %: шлаковый отход ТЭС – 22; стеклобой БТ-1 – 34; стеклобой М4 – 34; порообразующая смесь – 10. Оптимальный режим синтеза: температура вспенивания 840 °С, время вспенивания 10 минут. Полученный состав обладает плотностью 210 кг/м³.

4. Выявлены основные технологические стадии синтеза изделий на основе пеностекла, определены их температурно-временные параметры и физико-механические свойства:

а) пеностекольные гранулы: фракция (5-10) мм 97,8 %; (10-20) мм 2,6 %; насыпная плотность 199 кг/м³; влажность 0,4 % по массе; водопоглощение 13,7 % по массе; содержание расколотых зёрен 8,8 %; прочность при сдавливании в цилиндре 0,71 МПа; морозостойкость при потере массы после 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания 5,6 %; потеря массы при определении стойкости против силикатного распада 0,175 %; потеря массы при кипячении 0,185 %; содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений 0,65 %; потеря массы при прокаливании 0,62 %; коэффициент теплопроводности 0,06 Вт/(м·К); значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов 140±14 Бк/кг;

б) плиты из пеностекла плотность 225 кг/м³; предел прочности при сжатии 0,99 МПа; предел прочности при изгибе 0,40 МПа; коэффициент теплопроводности 0,063 Вт/(м·К); водопоглощение по объему 2,3 %; паропроницаемость

0,09 мг/(м·ч·Па); морозостойкость 50 циклов; группа горючести НГ; значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов 142 ± 18 Бк/кг;

5. Предложен состав легкого бетона на основе пеностеклянных гранул, соответствующий требованиям ГОСТ 25820-2014 для конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона при наименьшей плотности. Получение бетона производилось по технологии ЗАО «ККПД». Определены его основные физико-механические свойства: средняя плотность 595 кг/м^3 ; прочность на сжатие 1,35 МПа; коэффициент теплопроводности $0,196 \text{ Вт/(м·К)}$.

6. На основе теплотехнического расчета установлено, что стандартная панель (внешние слои – керамзитобетон плотностью 1800 кг/м^3 , внутренний слой – пенополистирол марки ПСБ-25) не удовлетворяет нормам поэлементных требований к тепловой защите. Панель на основе разработанных материалов (внешние слои – плита из легкого бетона на основе пеностеклянных гранул плотностью 600 кг/м^3 , внутренний слой – плита из пеностекла плотностью 200 кг/м^3) полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите, а также имеет ряд преимуществ: отсутствие конденсации влаги внутри панели; меньший вес при более высоких показателях теплоизоляционных свойств; повышенная огнестойкость, пожаробезопасность и сроки эксплуатации здания.

7. Разработана технология производства изделий из пеностекла (гранул и плит), рассчитаны экономические показатели их производства, демонстрирующие его рентабельность и высокую конкурентоспособность продукции в сравнении с рыночными аналогами.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к внедрению в промышленности теплоизоляционных материалов, а также использованы в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата по направлению 18.03.01 «Химическая технология» и магистратуры по направлению 18.04.01 «Химическая технология».

Исследование целесообразно продолжить в направлении изучения: возможности замены стеклосырья на природное и техногенное кремнеземистое и алюмосиликатное сырье; физико-химических процессов взаимодействия цементного раствора с изделиями из пеностекла; влияния марки цемента на прочность легкого бетона; проектирования и внедрения участков по производству многослойных строительных панелей с использованием стандартного оборудования.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Измайлов, Р. Р. Возможность расширения сырьевой базы производства шлакощелочного бетона за счет отходов топливно-энергетического комплекса / Р. Р. Измайлов, Н. С. Карандашова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2013. – № 3 (172). – С. 80-82.

2. Гольцман, Б. М. Анализ эффективности применения многослойных теплоизоляционных строительных панелей / Б. М. Гольцман, Е. А. Яценко, Л. А. Яценко, **Н. С. Карандашова** // Научное обозрение – 2016. – № 18. – С. 23-27.

3. **Гольцман, Н. С.** Анализ способов получения многослойных строительных панелей / **Н. С. Гольцман**, Б. М. Гольцман, Е. А. Яценко, Л. А. Яценко, В. А. Смолий // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2018. – № 1 (197). – С. 127-131.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

4. Yatsenko, E. A. Technological features of production of foamed glass applied as thermal insulating layer in silicate multilayer composite material for insulation and decoration / E. A. Yatsenko, A. S. Kosarev, **N. S. Karandashova**, B. M. Goltsman, V. A. Smolii // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Т. 11. – № 22. – С. 11076-11080.

5. **Karandashova, N. S.** Analysis of Influence of Foaming Mixture Components on Structure and Properties of Foam Glass / **N. S. Karandashova**, B. M. Goltsman, E. A. Yatsenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 262. – # 012020.

6. Yatsenko, E. A. Application of Computer Technologies for Modeling the Process of Formation of the Porous Structure of Foamed Glass / E. A. Yatsenko, B. M. Gol'tsman, L. A. Yatsenko, **N. S. Karandashova**, V. A. Smolii // Glass and Ceramics. – 2017. – Vol. 74. – Is. 7-8. – P. 9-11.

7. Yatsenko, E. A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerin Pore-Forming Mixture / E. A. Yatsenko, B. M. Gol'tsman, A. S. Kosarev, **N. S. Karandashova**, V. A. Smolii, L. A. Yatsenko // Glass Physics and Chemistry. – 2018. – Vol. 44. – № 2. – P. 152–155.

В других изданиях:

8. Гольцман, Б. М. Исследование использования многослойных теплоизоляционных панелей в строительстве и анализ их энергоэффективности / Б. М. Гольцман, Л. А. Яценко, **Н. С. Карандашова** // Проблемы и перспективы развития науки в России и мире: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., г. Уфа, 01 дек. 2016 г.: В 7 ч. / НИЦ "АЭТЭРНА" – Уфа: АЭТЭРНА, 2016. – Ч. 5. – С. 45-47.

9. Яценко, Е.А. Изучение особенностей формирования пористой структуры пеношлакостекла при использовании глицериновой порообразующей смеси / Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, В. А. Смолий, А. С. Косарев, **Н. С. Карандашова**, Л. А. Яценко // В сборнике: Наукоемкие технологии и инновации: сборник докладов международной научно-практической конференции, 2016. – С. 478-482.

10. Яценко, Е. А. Влияние воды на вспенивание пеностекла с использованием комплексного порообразователя / Е. А. Яценко, **Н. С. Карандашова**, Ю. А. Кузьмина // Студенческая научная весна – 2017 : материалы регион, науч.-техн. конф. (конкурса науч.-техн. работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл. 25-26 мая 2017 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2017. – С. 231.

11. Гольцман, Б. М. Формирование пористой структуры пеностекла для сельскохозяйственных целей / Б. М. Гольцман, Е. А. Яценко, **Н. С. Карандашова**, И. В. Малахов // Центральный научный вестник. – 2017. – Т. 2. – № 12 (29). – С. 60-61.

12. Яценко, Е. А. Синтез пеношлакостекла на основе глицериновой порообразующей смеси / Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, А. С. Косарев, **Н. С. Карандашова**, В. А. Смолий, Л. А. Яценко // Стекло: наука и практика – GlasSP2017 : сб. тез. Междунар. конф., г. Санкт-Петербург, 6-8 июня 2017 г. / Ин-т химии и силикатов РАН – СПб. : ООО «Издательство «ЛЕМА», 2017. – С. 214-215.

Гольцман Наталия Сергеевна

**ПЕНОСТЕКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ
И ИЗДЕЛИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 23.03.2018.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 46-0227.

Отпечатано в ИД «Политехник»
346400, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166
idp-npi@mail.ru