

На правах рукописи



КАНАЕВ АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ТАРНОГО
СТЕКЛОБОЯ И ОТСЕВОВ ЖЕЛЕЗОКСИДНОЙ РУДЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

05.23.05 - Строительные материалы и изделия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново - 2015

Работа выполнена на кафедре «Химические технологии» в ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Христофорова Ирина Александровна

Официальные оппоненты: **Череватова Алла Васильевна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Белгородский государствен-
ный технологический университет им. В.Г.
Шухова», профессор
Цыбакин Сергей Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Костромская государственная
сельскохозяйственная академия», заведующий
кафедрой технологии, организации и эконо-
мики строительства

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный
технический университет» (г. Ярославль)

Защита состоится «20» ноября 2015 г. на заседании совета по защите дис-
сертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой сте-
пени доктора наук ДМ 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8-го Марта,
д. 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского
государственного политехнического университета (www.ivgpi.com).

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г

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

 Н.В.Заянчуковская

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Анализ свойств имеющихся теплоизоляционных материалов показывает, что самым лучшим является совмещение в одном материале структуры с закрытыми порами, характерной пенопластам, а также температурной и химической устойчивости, свойственной силикатным материалам, получаемым из расплава.

К такому материалу, который является эффективным строительно-теплоизоляционным материалом, как для заполнения внутренних, так и наружных стен малоэтажных и, особенно, высотных сооружений, можно причислить пеностекло, которое представляет собой твердую стеклянную пену с мелкоячеистой внутренней структурой. Но существенным недостатком пеностекла является относительно высокая стоимость, а также большое количество отходов, образующихся в технологии производства. Данные обстоятельства не позволяют ему конкурировать с аналогичными теплоизоляционными материалами, используемыми в строительстве.

В связи с этим актуальными являются исследования по разработке составов и технологии получения пеностекла с высокими теплофизическими свойствами на основе «бытового» стеклобоя без использования специально сваренных стекол. В свою очередь применение различных отходов промышленности позволяет получать материал с высокими теплоизоляционными и физико-механическими свойствами и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Степень разработанности темы исследования

Существующие в настоящее время технологии получения пеностекла не имеют каких-либо заметных различий. По-видимому, с их помощью можно создавать эффективный неорганический теплоизоляционный материал, уникальный по соотношению прочности и плотности, полностью негорючий, влаго-, паронепроницаемый и химически инертный, как стекло. Однако для уменьшения его стоимости нужно снизить энергоемкость производства. Одним из способов существенного сокращения потребления энергоресурсов можно считать уход от традиционной стадии технологического процесса – изготовления специально сваренного стекла.

Цели и задачи исследования

Цель исследования – разработка составов и технологических параметров изготовления пеноматериала на основе тарного стеклобоя с использованием различных добавок и отходов промышленного производства, которые позволят получить материал с кажущейся плотностью не более 250 кг/м^3 , коэффициентом те-

плопроводности менее 0,11 Вт/(м·К), водопоглощением не более 7%, прочностью при сжатии более 0,6 МПа при температуре вспенивания ниже 900°C.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

- исследование возможности замены специально сваренного стекла на бой тарного стекла для устранения операций двойного передела;
- изучение механизмов влияния добавок и температурно-временных параметров на теплофизические свойства (плотность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности) пеноматериала на основе тарного стеклобоя;
- исследование совместного влияния модифицирующей добавки, концентрации порообразователя и температуры вспенивания на свойства пеноматериала (плотность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности, предел прочности при сжатии) путем проведения активного эксперимента;
- определение экономической эффективности внедрения рекомендованного состава и температурного режима получения теплоизоляционного материала.

Научная новизна работы:

1. Установлена возможность создания пеноматериала с высокими воспроизводимыми тепло- и физико-механическими характеристиками без двойного передела, связанного со специальной варкой стекла, с применением в качестве основного сырья боя тарного стекла и добавок техногенной природы (аэросила, алюмотермического шлака, отсевов железоксидной руды металлургического производства).

2. Установлено, что введение в шихту алюмотермического шлака приводит к закрытию пор и к существенному увеличению прочности пеноматериала за счет упрочнения мембранных перегородок из-за отсутствия в них пор диаметром более $1 \cdot 10^{-6}$ м.

3. Выявлено, что введение в шихту аэросила приводит к формированию закрытых пор сферической формы, как в объеме, так и в мембранных перегородках, что существенно улучшает теплоизоляционные характеристики (для плотности 175 кг/м^3 $\lambda=0,076 \text{ Вт/(м·К)}$) при снижении прочности на сжатие до 0,5 МПа.

4. Показано, что применение в качестве добавки отсевов железоксидной руды металлургического производства позволяет снизить температуру вспенивания шихты до 850°C (свойства материала находятся в пределах: плотность 272-173 кг/м^3 , прочность при сжатии 4,0-1,0 МПа, коэффициент теплопроводности 0,102-0,074 Вт/(м·К)). По фазовой диаграмме системы « $\text{SiO}_2\text{-CaO-Fe}_2\text{O}_3$ » температура начала перехода системы в вязкотекучее состояние составляет 1192°C (литературные данные).

5. Установлено, что введение в шихту на основе тарного стеклобоя алюмотермического шлака, аэросила и отсевов руды металлургического производства приводит к появлению микропор в тяжах и межпоровых перегородках. Установ-

лено, что введение добавок позволяет влиять на макро- (в объеме) и на микро-структуру (в тяжах и межпоровых перегородках).

6. Установлено, что увеличение графита от 0,4 до 1,0 масс.ч в системе содержащей отсева железоксидной руды приводит к снижению водопоглощения, что можно объяснить восстановлением части оксида железа в металлическое железо и возникновению горячих точек формирования закрытопористой микроструктуры, тогда как в других исследованных системах наблюдается эффект увеличения водопоглощения с увеличением содержания графита.

7. Определено влияние температурного режима получения на свойства получаемого пеноматериала при введении различных добавок.

8. Методами математического планирования эксперимента определена взаимосвязь свойств получаемых изделий с температурным режимом получения и составом исходной шихты.

Теоретическая и практическая значимость работы

Значимость работы состоит в теоретическом обосновании и последующей практической разработке состава и технологии получения строительного теплоизоляционного материала на основе боя тарного стекла и промышленных отходов.

В ходе работы определены основные технологические режимы, обеспечивающие создание изделий с высокими тепло- и физико-механическими показателями. Установлено, что при замене специально сваренного стекла на бой тарного стекла и с введением в шихту 2,5 - 7,5 масс.ч. отсева железоксидной руды металлургического производства температура вспенивания смеси уменьшается от 900 °С до 850°С. Это ведет к снижению себестоимости и позволяет получать пеноматериал плотностью 114-200 кг/м³, коэффициентом теплопроводности 0,058-0,093 Вт/(м·К), прочностью при сжатии 2,2–0,6 МПа.

Использование в составе исходной шихты промышленных отходов помимо прочего решает проблему по их утилизации, что благотворно влияет на экологическую нагрузку окружающей среды, так как сокращается число отвалов.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на анализе научно-технических результатов известных работ по теме диссертации, а также на проведении эксперимента. При проведении экспериментальной части исследования для получения образцов материала и нахождения их физико-механических характеристик применялись стандартные методы и методики (ГОСТы). Обработка экспериментальных данных осуществлялась математико-статистическими методами.

Положения, выносимые на защиту:

1) технологические режимы и составы для получения высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе тарного стеклобоя и промышленных отходов;

2) результаты математического моделирования совместного влияния компонентов в системе «отсевы железоксидной руды металлургического производства - порообразователь – температура» на свойства получаемого теплоизоляционного материала;

3) рекомендации для качественного проектирования и внедрения результатов разработки в промышленное производство.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности подтверждается достаточным количеством опытных образцов, оценкой ошибки эксперимента, математической обработкой результатов эксперимента.

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях регионального, всероссийского и международного уровней: XII Всеукраїнська студентська наукова конференція: Актуальні проблеми природничих та гуманітарних наук у дослідженнях студентської молоді «Родзинка-2010» (Черкаси, 2010); Международная научно-техническая конференция «Строительная наука 2010» (Владимир, 2010); XI Международная научно-практическая конференция «Наука и современность - 2011» (Новосибирск, 2011); Научно-практическая конференция в рамках Дней науки студентов и аспирантов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, 2012, 2013).

Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы, приложений и содержит 89 рисунков, 29 таблиц. Список литературы насчитывает 147 источников.

Основные положения диссертации опубликованы в 14 работах, включая 3 статьи, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК.

Основное содержание работы

Большой вклад в разработку технологических и композиционных принципов получения изделий из пеностекла и его аналогов внесли: И.И. Китайгородский, Б.К. Демидович, Ф. Шилл, Н.П. В.И. Верещагин, Ю.П. Горлов, Г.И. Горчаков, Ю.А. Щепочкина, В.А. Лотов и др.

Основной функцией теплоизоляции строительных конструкций является уменьшение потребления энергии для отопления зданий, а также сокращение тепловых потерь в теплоагрегатах и тепловых сетях. Для улучшения тепловой изоляции жилых, промышленных, офисных, строительных зданий и сооружений, сис-

тем водо- и теплоснабжения применяют различные виды теплоизоляционных материалов. Самой эффективной и долговечной на данный момент является теплоизоляция из пеностекла. Благодаря прочной и высокоразвитой пористой структуре материал отлично подходит для теплоизоляции подвалов, фасадов и крыш зданий. Кроме того, пеностекло не разрушается и держит свою форму при довольно высокой температуре и влажности, а также сохраняет свои свойства со временем. Минимальный срок эксплуатации, заявленный некоторыми производителями пеностекла, составляет от 50 лет и выше. Пеностеклу присуща высокая огнестойкость и экологическая безопасность, что особенно важно при теплоизоляции внутренних помещений. Кроме того пеностекло обладает превосходными адгезионными свойствами по отношению к цементной связке, отлично обрабатывается режущим инструментом и легко монтируется по месту назначения.

На сегодняшний день предприятия в основном производят пеностекло по порошковому способу, который позволяет регулировать свойства пеностекла в широком интервале при изменении типа газообразователя, химического состава основного силикатсодержащего сырья, температурного режима получения. Суть порошкового способа состоит в том, что металлические формы заполняются шихтой, включающей в себя молотый стеклобой и газообразователь (0,5-3% по массе), вспенивают при определенной температуре, полученный материал отжигают и медленно охлаждают. Однако, не смотря на кажущуюся простоту данного метода, получение качественного изделия со структурой в виде закрытых мелких пор в силикатном расплаве является крайне сложным процессом. Для этого необходимо точно подбирать химический состав стекла и газообразователя, чтобы поверхностное натяжение и вязкость стеклянного расплава при температуре вспенивания соответствовала максимальной скорости выделения газа из газообразователя, также учитывая возможный взаимодействия последнего с расплавом.

Кроме этого пеностекло имеет сравнительно высокую стоимость, которая не дает ему наравне конкурировать с другими современными теплоизоляционными строительными материалами.

Как показали литературный обзор и патентный поиск, применение таких сырьевых материалов, как металлургический шлак и зола-уноса и другие промышленные отходы, а также бытового стеклобоя вместо сваренного стекла, позволяет удешевить технологию производства пеноматериала. При введении в состав шихты различного вида техногенных отходов, необходимо в каждом конкретном случае учитывать влияние их химического состава на свойства получаемых изделий, а также подбирать технологические и температурные параметры изготовления. Исходя из литературного обзора и патентного поиска, исследования в диссертационной работе были направлены на разработку состава и технологических параметров изготовления пеноматериала с нужным комплексом свойств на

основе тарного стеклобоя, различных добавок и отходов промышленного производства.

На сегодняшний день стекольная промышленность Владимирской области осуществляет производство в основном тарной продукции из зеленого и коричневого стекла. В данной работе в качестве основного сырья был выбран зеленый тарный стеклобой (ГОСТ Р 52022-2003), т.к. он имеет более низкую температуру и «длинный» интервал размягчения, нежели коричневое стекло, что позволяет получать более качественную пену с наименьшими усилиями. В качестве порообразователя был выбран графит марки П (ГОСТ 8295-73), т.к. его интервал максимальных скоростей газообразования совпадает с интервалом размягчения зеленого стекла, что позволяет получать закрытопористую ячеистую структуру в силикатном расплаве в диапазоне температур от 850 до 950°С. В качестве добавок в работе были использованы следующие вещества: алюмотермический шлак (ТУ 5718-004-12462473-2004), аэросил (ГОСТ 14922-77), отсеvy железooксидной руды металлургического производства (ТУ 0790-012-99637759).

Образцы пеностекла изготавливались по способу, основными операциями которого были: смешение и помол компонентов шихты, придание формовочной влажности смеси, прессование заготовки, сушка сырца, вспенивание и отжиг образцов в муфельной печи, механическая обработка охлажденной заготовки. После этого проводились физико-механические испытания для нахождения основных эксплуатационных характеристик. На стадии помола шихты осуществляется перемешивание, диспергирование, а также механоактивация частиц смеси, которая ускоряет процесс взаимной диффузии при размягчении порошка и переходе его в вязкотекучее состояние.

Для достижения наибольшего значения удельной поверхности в сырьевую смесь вводилось поверхностно-активное вещество (гретерол-п), т.к. он способствует более тонкому помолу и препятствует агрегации частиц за счет создания на их поверхности пленки. Увлажнение шихты (до 10%) производилось для придания шихте таких важных технологических свойств, как формуемость при прессовании и отсутствие пыления.

Теплоизоляционные и физико-механические характеристики получаемых образцов (плотность, коэффициент теплопроводности, водопоглощение, максимальный диаметр пор, прочность при сжатии) и исходных компонентов (влажность, удельная поверхность) определялись по соответствующим нормативным документам (ГОСТам, ТУ) и общепринятым методиками, описанными в литературе.

Первоначальные исследования были направлены на выявление закономерностей изменения свойств получаемых теплоизоляционных пеносиликатов (плот-

ности, водопоглощения, максимального диаметра пор и коэффициента теплопроводности) при варьирования технологических и композиционных параметров.

В первую очередь было исследовано влияние температурного режима получения и концентрации газообразователя на свойства материала.

В ходе исследований было выявлено, что увеличение концентрации порообразователя (графита) способствует в начале резкому (от 0,3 до 0,4 масс.ч), а затем постепенному (от 0,4 до 1,0 масс.ч) изменению всех свойств.

Далее было исследовано влияние различных концентраций добавок (алюмотермического шлака, аэросила и металлургических отходов) и температурного режима получения при их введении на свойства пеноматериала.

В ходе проведенных исследований выявлено, что повышение концентрации алюмотермического шлака в исходной шихте привело к увеличению плотности до 550 кг/м³ и коэффициента теплопроводности материала до 0,19 Вт/(м·К), а также к уменьшению водопоглощения и максимального диаметра пор. Полученный материал обладает мелкочаеистой структурой с малой открытой пористостью, но неудовлетворительными теплоизоляционными свойствами.

Использование аэросила в качестве модифицирующей добавки позволило существенно повысить теплоизоляционную способность материала (при введении 0,3 масс.ч. аэросила плотность составила 215 кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,086 Вт/(м·К)), но при этом наблюдается значительный разброс пор по размерам и повышенное водопоглощение, ввиду сложности гомогенизации аэросила в шихте.

Введение отсевов железоксидной руды в количестве от 2,5 до 7,5 масс.ч. привело к снижению кажущейся плотности до 115 кг/м³ и коэффициента теплопроводности до 0,058 Вт/(м·К).

Результаты исследования представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Влияние концентрации добавок и газообразователя на свойства пеноматериала

Параметр	без добавок	шлак	аэросил	отсев руды Fe ₂ O ₃
T _{всп} , °C	860-940	880-960	880-920	850-900
τ _{всп} , мин.	10-30	10-30	10-30	10-30
Концентрация до- бавки, масс.ч.	-	5-10	0,1-0,3	2,5-7,5
ρ, кг/м ³	500-225	550-250	290-175	280-115
W ⁿ , %	5-21	4-13	8-16	4,5-50
λ, Вт/(м·К)	0,170-0,090	0,190-0,100	0,112-0,076	0,102-0,057
σ _{сж} , МПа	2,1-1,2	4,3-1,5	2,5-0,5	2,8-0,6

Таблица 2 - Свойства пеноматериала при введении различного рода добавок ($T_{всп}=900^{\circ}\text{C}$, $\tau_{всп}=30$ мин.)

Параметр	без добавок	Шлак, 10 масс.ч.	Аэросил, 0,3 масс.ч.	отсев руды Fe_2O_3 , 7,5 масс.ч.
ρ , кг/м ³	$225^{\pm 10}$	$405^{\pm 10}$	$290^{\pm 10}$	$115^{\pm 10}$
$W^п$, %	$21^{\pm 0,2}$	$10,5^{\pm 0,2}$	$16^{\pm 0,2}$	$50^{\pm 0,2}$
λ , Вт/(м·К)	$0,090^{\pm 0,003}$	$0,136^{\pm 0,003}$	$0,110^{\pm 0,003}$	$0,058^{\pm 0,003}$
$\sigma_{сж}$, МПа	$1,2^{\pm 0,2}$	$2,9^{\pm 0,2}$	$1,7^{\pm 0,2}$	$0,6^{\pm 0,2}$

Представленные зависимости по влиянию вводимых добавок главным образом объясняются строением поровой структуры и строением микроструктуры междузлий и межпоровых перегородок (рисунок 1).

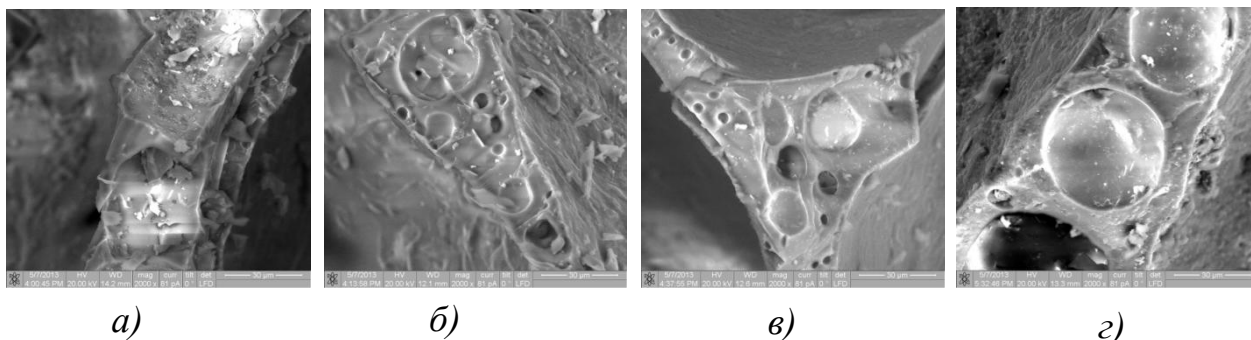


Рисунок 1 - Снимки внутренней структуры междузлий пеноматериалов, полученных на РЭМ с увеличением 2000 раз ($T_{всп} = 900^{\circ}\text{C}$, $\tau_{всп} = 30$ мин): а) без добавок; б) при введении 7,5 масс.ч. алюмотермического шлака; в) при введении 0,3 масс.ч. аэросила; г) при введении 10 масс.ч отсевок железоксидной руды металлургического производства

Из снимков видно, что введение в качестве добавок шлака, аэросила и отсевок железоксидной руды металлургического производства ведет к появлению в межпоровой структуре дополнительных микропор. Причем самые больше микропоры наблюдаются для материала, содержащего отсевок руды, что соответствует самым низким показателям плотности и коэффициента теплопроводности.

Алюмотермический шлак позволяет получать материал с мелкопористой ($d_{\max} \leq 0,2$ мм) закрытой структурой, но в своем составе содержит до 85 мас.% оксида алюминия Al_2O_3 . Он существенно увеличивает температуру размягчения шихты (до 960°C), а также не позволяет эффективно использовать выбранный тип газообразователя, так как при температурах выше 900°C происходит его повышенное выгорание. Кроме того, в составе шлака также присутствуют оксиды TiO_2 и V_2O_5 , которые способствуют увеличению прочностных характеристик.

Аэросил дает возможность получать развитую поровую макро и микро-структуру, являлась при этом центром образования пор, но на температурный интервал размягчения стекла и время вспенивания практически не влияет, т.к. в своем составе содержит 99 % SiO_2 и вводится в смесь в малых количествах (до 0,5 масс.%).

В составе отсевов железоксидной руды металлургического производства содержится большое количество оксида железа (52 масс.%), который способствует более быстрому и лучшему прогреву шихты, а также дополнительно содержит оксид кальция (15 масс. %), являющийся плавнем. В сумме данные оксиды приводят к существенному снижению температуры размягчения шихты и времени вспенивания заготовки, что в свою очередь позволяет получать материал с высокими теплоизоляционными свойствами.

Исходя из проведенных исследований, для дальнейшей проработки была выбрана система, содержащая отсевы железоксидной руды металлургического производства, так как позволяет получать материал с широким интервалом свойств при более низкой температуре вспенивания (таблица 1). Для этого использовалось математическое моделирование, которое позволяет точно определить влияние компонентов в системе (факторов варьирования) «отсевы железоксидной руды металлургического производства - порообразователь – температура» на свойства получаемого пеносиликата. В качестве факторов варьирования были выбраны: концентрация графита (x_1), концентрация отсевов железоксидной руды металлургического производства (x_2) и температура вспенивания (x_3).

После проведения активного эксперимента по плану Бокса-Бенкина были найдены значения свойств (плотности, коэффициента теплопроводности, водопоглощения, предела прочности при сжатии) полученных образцов. На базе этих данных были рассчитаны начальные коэффициенты уравнений регрессии для каждого свойства. Далее при помощи регрессионного анализа модели определена значимость этих коэффициентов, адекватность уравнений регрессии. В итоге получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \rho \text{ (кг/м}^3\text{)} &= 194,6 - 31,125x_2 - 43,875x_3 - 17,175x_{33} + 9,5x_{12} + 13x_{13} + 24,25x_{23} \\ W^{\text{п}} \text{ (}\% \text{)} &= 17,8 - 7,3175x_1 + 14,875x_2 + 9,8125x_3 + 5,0375x_{22} + 4,6625x_{33} - 3,75x_{12} \\ &\quad - 5,115x_{13} + 7,5x_{23} \\ \lambda \text{ (Вт/(м}\cdot\text{К))} &= 0,0804 - 0,00861x_2 - 0,01224x_3 - 0,0048x_{33} + 0,0035x_{13} + \\ &\quad 0,00698x_{23} \\ \sigma_{\text{сж}} \text{ (МПа)} &= 1,95 - 0,2349x_1 - 0,7524x_2 - 0,6996x_3 + 0,4393x_{12} + 0,3839x_{13} + \\ &\quad 0,7196x_{23}. \end{aligned}$$

По полученным уравнениям регрессии были построены поверхности отклика, моделирующие поведение системы при различных входных параметрах (рисунок 2).

Таким образом, оценивая весь комплекс свойств разработанного материала видно, что введение отсева железоксидной руды металлургического производства в количестве от 2,5 до 7,5 масс.ч. и повышение температуры вспенивания с 850 до 900°С способствовало снижению кажущейся плотности до 114 кг/м³, коэффициента теплопроводности до 0,058 Вт/(м·К) и предела прочности при сжатии

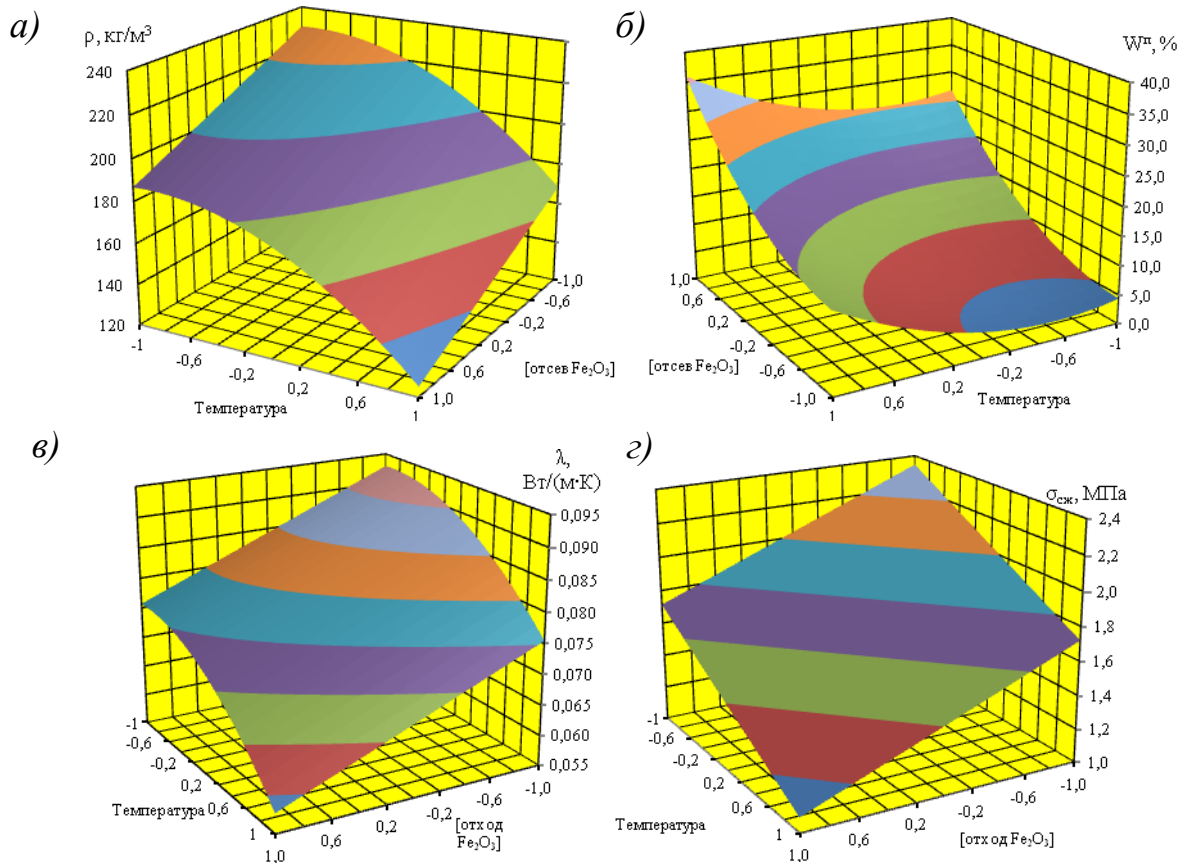


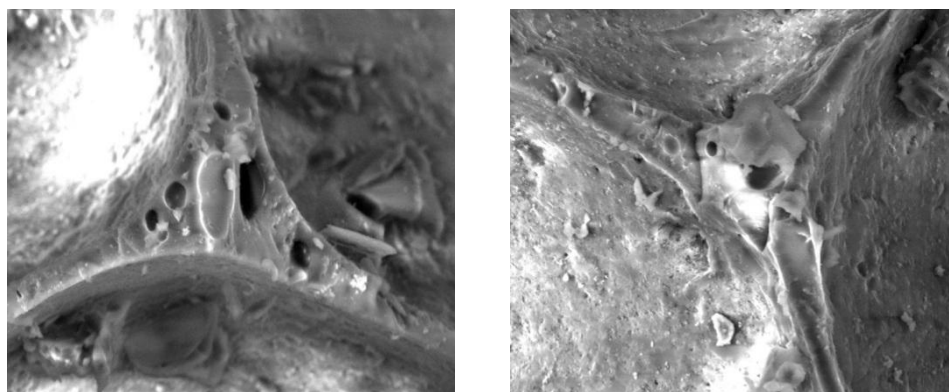
Рисунок 2 - Зависимость теплофизических свойств получаемого пеноматериала от концентрации отсева железоксидной руды металлургического производства и температуры вспенивания при содержании графита 1,0 масс.ч.: а – плотности (ρ), б – водопоглощения ($W^п$), в – коэффициента теплопроводности (λ), г – предела прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$).

с 2,3 до 1,1 МПа, но также и увеличению водопоглощения до 49%. Это связано с тем, что увеличение температуры и концентрации отсева ведет к снижению вязкости расплава, что способствует росту пор в образце, утонению междоузлий и межпоровых перегородок, а также уменьшению микропор в них.

На рисунке 3 представлены снимки междоузлий внутренней структуры образцов пеноматериала, сделанные на растрово-электронном микроскопе с увеличением в 2000 раз.

В результате проведенных исследований для производства блочного теплоизоляционного материала можно рекомендовать следующий состав [тарный стеклобой] = 100 м.ч., [графит]=1,0 м.ч., [отсев железоксидной руды металлургического производства]=3,5 м.ч., [гретерол]=0,35 м.ч. и температурный режим получения $T_{всп}=850^\circ\text{C}$, $\tau_{всп}=30$ мин. Свойства получаемого при этом материала будут

соответствовать следующим значениям: плотность - $220^{\pm 10}$ кг/м³, коэффициент теплопроводности - $0,088^{\pm 0,003}$ Вт/(м·К), водопоглощение - $5^{\pm 0,2}\%$, максимальный диаметр пор - $0,2^{\pm 0,09}$ мм, предел прочности при сжатии - $2,2^{\pm 0,2}$ МПа.



а)

б)

Рисунок 3 - Снимки внутренней структуры междуузлий пеноматериала состава [ЗС] = 100 мас.ч; [графит] = 0,7 масс.ч. при введении: а) 5 масс.ч. отсеков железоксидной руды ($T_{всп} = 875^{\circ}\text{C}$, $\tau_{всп} = 30$ мин); б) 7,5 масс.ч. отсеков железоксидной руды ($T_{всп} = 900^{\circ}\text{C}$, $\tau_{всп} = 30$ мин).

Далее был проведен сравнительный анализ разработанного пеноматериала с существующими аналогами, предложена технологическая схема производства, рассчитана экономическая эффективность и приведены сравнительные технико-экономические показатели базового и нового вариантов.

Разработанные составы и технологические параметры получения неорганического пеноматериала были внедрены в учебный процесс, а также приняты ООО НПО «ТИС» (г. Владимир) для продвижения на производство и рынок строительных теплоизоляционных материалов в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве по профилю «Рациональное использование сырьевых и энергетических ресурсов», что подтверждено актами внедрения.

Технико-экономические показатели базового (ОАО «Гомельстекло») и нового вариантов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технико-экономические показатели базового и нового вариантов

Показатели	Ед. измер.	Варианты	
		Базовый	Новый
Вид продукции		Пеностекло	Пеноматериал
Характеристика продукции:			
1. Плотность	кг/м ³	190-240	$220^{\pm 10}$
2. Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,06 – 0,10	$0,088^{\pm 0,003}$
3. Предел прочности при сжатии	МПа	0,7 – 1,2	$2,2^{\pm 0,2}$
4. Водопоглощение	%	0-5	$5^{\pm 0,2}$
5. Максимальный диаметр пор	мм	0,2-0,6	$0,2^{\pm 0,09}$
6. Температура начала деформации	°С	540	550

Объем производства	м ³ /год	100000	
Годовой экономический эффект	млн.руб/год	-	404,736

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработаны технологический режим и составы шихты для получения теплоизоляционного материала на основе тарного стекла и отсевов железоксидной руды с требуемым набором характеристик: плотностью $220^{\pm 10}$ кг/м³, коэффициентом теплопроводности $0,088^{\pm 0,003}$ Вт/(м·К), водопоглощением $5^{\pm 0,2}\%$, прочностью при сжатии $2,2^{\pm 0,2}$ МПа.

2. Изучены механизмы влияния добавок алюмотермического шлака, аэросила, отсевов железоксидной руды и температурного режима вспенивания на плотность, коэффициент теплопроводности, прочности при сжатии и водопоглощение.

3. Установлено, что введение в состав шихты алюмотермического шлака позволяет получать теплоизоляционно-конструкционный материал с плотностью 250-550 кг/м³, коэффициентом теплопроводности 0,10-0,19 Вт/(м·К), прочностью при сжатии 1,5-4,3 МПа и водопоглощением до 4%.

4. На основании исследований по введению аэросила возможно получение теплоизоляционного материала с плотностью 175-290 кг/м³, коэффициентом теплопроводности 0,076-0,112 Вт/(м·К), прочностью при сжатии 0,5-2,5 МПа и водопоглощением до 8%.

5. При разработке технологии производства теплоизоляционного материала на основе тарного стекла и отсевов железоксидной руды с требуемым набором характеристик был применен активный эксперимент при варьировании температурно-композиционных параметров системы. Получены уравнения регрессии «состав - свойства» позволяющие рассчитать состав шихты и режим ее переработки для получения материала с заданными свойствами.

6. По итогам математического моделирования для получения теплоизоляционного материала с требуемым набором характеристик к применению рекомендованы композиция [тарный стеклобой] = 100 м.ч., [графит]=1,0 м.ч., [отсев железоксидной руды]=3,5 м.ч. и температурный режим получения $T_{всп}=850^{\circ}\text{C}$, $\tau_{всп}=30$ мин.

7. Опыт внедрения результатов исследований и экономические предпосылки развития производства строительных материалов при использовании зеленого стеклобоя и металлургических отходов открывают перспективу высокоэффективного внедрения разработанного материала в стройиндустрию, обеспечивают экологическую безопасность производства и потребления. Определена экономиче-

ская эффективность внедрения рекомендованного состава и температурного режима получения пеноматериала. При применении разработанного материала реализуются энерго- и ресурсосберегающие технологии.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Канаев, А.Ю. Теплоизоляционный пеноалюмосиликат, модифицированный отходами металлургической промышленности [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Строительство и реконструкция*. - Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012. - № 1. - С. 69 – 73.

2. Канаев, А.Ю. Пеносиликат, модифицированный железоксидными промышленными отходами [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. - Новосибирск: Изд-во Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2012. № 7-8. - С. 27-31.

3. Канаев, А.Ю. Теплоизоляционные пеноалюмосиликаты [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Строительство и реконструкция*. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013. № 1. – С. 76-80.

4. Канаев, А.Ю. Регулирование структуры пеносиликатов, получаемых из отходов промышленных предприятий [Текст] // XII Всеукраїнська студентська наукова конференція: Актуальні проблеми природничих та гуманітарних наук у дослідженнях студентської молоді «Родзинка – 2010». – Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2010. – С. 33-37.

5. Канаев, А.Ю. Влияние температуры вспенивания на свойства пеностекла при использовании смеси газообразователей [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Строительная наука 2010: Материалы международной научно-технической конференции*. Влад. гос. ун-т. Владимир, 2010. – С. 174-176.

6. Канаев, А.Ю. Зависимость свойств пеностекла от времени вспенивания шихты [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Строительная наука 2010: материалы международной научно-технической конференции*. – Владимир: ВлГУ, 2010. – С. 176-178.

7. Канаев, А.Ю. Модификация структуры пеностекла [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Строительная наука 2010: Материалы международной научно-технической конференции*. – Владимир: ВлГУ, 2010. – С. 179-181.

8. *Канаев, А.Ю.* Современное состояние технологии строительных материалов на основе техногенных отходов производства [Текст] // Наука и современность – 2011: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции / Под общ. Ред. С.С.Чернова. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. – С. 254-257. ISBN 978-5-7782-1695-2.

9. *Канаев, А.Ю.* Наномодифицированный теплоизоляционный материал на основе силикатов [Текст] / А.Ю. Канаев, С.С. Коробова, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Сборник научных статей «Труды ВлГУ. Индустрия наносистем и материалов». – Владимир: ВлГУ, 2011. – № 8. – С. 121-125.

10. *Канаев, А.Ю.* Теплоизоляционный материал на основе отходов стеклобоя [Текст] / А.Ю. Канаев, Е.А. Ильина, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Сборник научных статей «Труды ВлГУ. Индустрия наносистем и материалов». – Владимир: ВлГУ, 2011. – № 8. – С. 14-18.

11. *Канаев, А.Ю.* Разработка состава и химической технологии получения пеноалюмосиликатного материала [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, С.С. Папонова // Материалы Научно-практической конференции в рамках Дней науки студентов и аспирантов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012. – С.403-404. ISBN 978-5-9984-0254-8.

12. Табуева, И.С. Неорганические теплоизоляционные материалы и изделия [Электронный ресурс] / И.С. Табуева, А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова // VI Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум». – 2014. – Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/5500.pdf> (дата обращения 12.06.2014 г).

13. *Канаев, А.Ю.* Пеностекло на основе тарного стеклобоя и промышленных отходов [Электронный ресурс] / А.Ю. Канаев, К.И. Гордеев // VI Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум». – 2014. – Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/4263.pdf> (дата обращения 12.06.2014 г).

14. Христофоров, А.И. Влияние температуры вспенивания и состава на прочность пеностекла, модифицированного отсевами металлургического производства [Текст] / А.И. Христофоров, И.А. Христофорова, А.Ю. Канаев // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции 31 января 2015 г.: в 10 ч. / Под общ. ред. М.Г. Петровой. – Белгород: ИП Петрова М.Г., 2015. – Часть III. – С. 141-145. ISBN 978-5-9906141-8-5.