

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (НПИ)
ИМЕНИ М.И. ПЛАТОВА»**

На правах рукописи



ГОЛЬЦМАН НАТАЛИЯ СЕРГЕЕВНА

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

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Яценко Елена Альфредовна

Новочеркасск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Современная ситуация в области теплоизоляционных материалов.....	11
1.1.1 Характеристики теплоизоляционных материалов.....	11
1.1.2 Способы получения теплоизоляционных материалов	15
1.1.3 Виды теплоизоляционных материалов	17
1.2 Технологические особенности производства и применения пеностекла	26
1.2.1 Функции компонентов пеностекольной шихты	27
1.2.2 Особенности формирования структуры пеностекла при использовании различных порообразователей	29
1.2.3 Изделия на основе пеностекольных материалов	36
1.3 Классификация легких бетонов.....	37
1.4 Классификация стеновых панелей	43
1.5 Направления исследований в области разработки технологий многослойных строительных панелей	47
1.6 Выводы	49
1.7 Цель и задачи исследования	50
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	52
2.1 Характеристика сырьевых материалов.....	52
2.2 Методики испытаний и физико-химических исследований	53
3 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ПЕНОСТЕКЛА	58
3.1 Выбор оптимального соотношения компонентов порообразующей смеси для синтеза пеностекла	58

3.2 Влияние температуры и времени вспенивания на структуру и плотность пеностекла	64
3.3 Влияние фракционного состава на структуру пеностекла	68
3.4 Влияние вида стеклобоя на структуру и свойства пеностекла	70
3.5 Влияние шлаковых отходов ТЭС на структуру и свойства пеностекла	72
3.6 Оптимизация составов и режимов синтеза пеностекла с применением метода планирования эксперимента	75
3.7 Выводы	80
4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЕНОСТЕКЛА И АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	83
4.1 Разработка режимов синтеза изделий из пеностекла	83
4.1.1 Разработка режимов синтеза плит из пеностекла	83
4.1.2 Разработка режимов синтеза пеностекольных гранул	85
4.2 Определение физико-механических свойств пеностекольных изделий	86
4.2.1 Определение свойств пеностекольных гранул	86
4.2.2 Определение свойств плит из пеностекла	91
4.2.3 Результаты исследований	96
4.3 Разработка предложений по применению пеностекольных изделий в многослойных строительных панелях	98
4.3.1 Легкий бетон на основе пеностекольных гранул	98
4.3.2 Сравнительный теплотехнический анализ многослойных строительных панелей	100
4.3.2.1 Типовая трехслойная стеновая панель	102
4.3.2.2 Многослойная строительная панель	103
4.3.3 Определение теплопроводности лабораторного образца многослойной строительной панели	106
4.4 Выводы	108

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЕНОСТЕКЛА И ОЦЕНКА ЕЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ	110
5.1 Разработка технологической схемы производства изделий из пеностекла и подбор технологического оборудования для ее производства	110
5.2 Подбор оборудования для производства изделий из пеностекла	111
5.3 Экономические показатели производства изделий из пеностекла и оценка их конкурентоспособности.....	113
5.4 Выводы	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	138

ВВЕДЕНИЕ

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, иссле-

дования 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 пено-стекла (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:

- установленные закономерности влияния температурно-временного режима, вида и соотношения сырьевых компонентов (компоненты порообразующей смеси, стеклбой 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;

- конструкция и теплотехнические характеристики многослойной строительной панели на основе пеностекольных изделий;
- разработанная технология и аппаратурная 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 «Студенческая 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Современная ситуация в области теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционными называют строительные материалы и изделия, обладающие высокой пористостью и, как следствие, низкой теплопроводностью и малой средней плотностью. Они предназначены для минимизации теплового обмена с окружающей средой через ограждающие конструкции жилых и производственных зданий, поверхностей производственного оборудования и тепловых агрегатов (печей, трубопроводов и пр.). Средняя плотность теплоизоляционных материалов не превышает 600 кг/м^3 , а теплопроводность – $0,175 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [1].

Применение тепловой изоляции в строительстве позволяет ощутимо снизить толщину и массу ограждающих конструкций (стен, кровли), уменьшить расход основных строительных материалов и, соответственно, понизить общую стоимость конструкции, уменьшить расход топлива в эксплуатационный период и т.д. В технологическом оборудовании теплоизоляция снижает теплотери, обеспечивает требуемый температурный режим, снижает удельный расход топлива на единицу продукции и улучшает условия труда. Чтобы получить достаточный эффект от применения теплоизоляции, осуществляются тепловые расчеты, в которых задаются конкретные типы теплоизоляционных материалов и учитываются их теплофизические характеристики. Эти мероприятия позволяют успешно решать проблему экономии топливно-энергетических ресурсов.

1.1.1 Характеристики теплоизоляционных материалов

Главной физико-механической характеристикой теплоизоляционных материалов является теплопроводность — способность материала передавать тепло. К прочим параметрам, характеризующим теплоизоляционные материалы, можно

отнести плотность, морозостойкость, огнестойкость, прочность на сжатие, паропроницаемость, водопоглощение, сорбционную влажность и др. Учет этих параметров в расчетах систем теплоизоляции позволяет добиться значительной экономии строительных материалов и снижения расхода энергии на отопление.

Теплоизоляционные материалы по теплопроводности разделяются на три класса: А – малотеплопроводные, Б – среднетеплопроводные и В – повышенной теплопроводности. Классы отличаются величиной теплопроводности материала, а именно: при средней температуре 25 °С материалы класса А имеют теплопроводность до 0,060 Вт/(м·К), класса Б – от 0,060 до 0,115 Вт/(м·К), класса В – от 0,115 до 0,175 Вт/(м·К). При других средних температурах измерения теплопроводность материала возрастает согласно следующей зависимости (1.1):

$$\lambda_t = \lambda_0 / (1 + \beta_t), \quad (1.1)$$

где λ_t – теплопроводность при температуре t °С; λ_0 – теплопроводность при температуре 0 °С; β – температурный коэффициент, выражающий приращение теплопроводности материала при повышении его температуры на 1 °С и равный 0,0025 (до 100 °С – по данным О. Е. Власова) [1, 2].

На величину теплопроводности пористых материалов, в том числе и теплоизоляционных, оказывают влияние вид, размеры и расположение пор, плотность материала, химический состав и структура твердой фазы, коэффициент излучения ограничивающих поры поверхностей, вид и давление заполняющего поры газа. Однако преобладающее влияние на величину теплопроводности имеют его температура и влажность. Теплопроводность материалов увеличивается с ростом температуры, однако, намного большее влияние при эксплуатации оказывает влажность.

Отличительным признаком теплоизоляционных материалов является присутствующая им высокая пористость. Воздух в порах имеет меньшую теплопроводность, чем окружающие его конденсированные фазы (твердые или жидкие). При величине пор 0,1–2,0 мм теплопроводность воздуха в них составляет 0,023–0,030 Вт/(м·К). Пористость теплоизоляционных материалов может составлять до 90–98 %, а у очень тонкого стеклянного волокна – до 99,5 %. Между тем, пори-

стость таких материалов, как тяжелый бетон, составляет 9–15 %, гранит, мрамор – 0,2–0,8 %, керамический кирпич – 25–35 %, сталь – 0 % и т.д. Поскольку пористость оказывает прямое влияние на величину средней плотности, теплоизоляционные материалы обычно различают не по пористости, а по плотности. Их делят на три группы: особо легкие ОЛ (наиболее пористые), имеющие марку по средней плотности (кг/м^3) в сухом состоянии 15, 25, 35, 50, 75 и 100; легкие (Л) – 125, 150, 175, 200, 225, 300 и 350 и тяжелые (Т) – 400, 450, 500 и 600. Материалы, имеющие среднюю плотность между указанными марками, относят к ближайшей большей марке. При средней плотности 500–700 кг/м^3 материалы применяют с учетом их несущей способности в конструкциях, т.е. как конструкционно-теплоизоляционные [1, 2].

Водопоглощение – способность поглощать, а водоудерживающая способность – способность удерживать воду при контакте с ней. Вместе с другими свойствами – гигроскопичностью, водостойкостью, водопроницаемостью – они отражают важные качества теплоизоляционных материалов.

При увлажнении теплоизоляционных материалов их теплопроводность резко возрастает, т.к. теплопроводность воды составляет 0,58 Вт/(м·К), т.е. примерно в 25 раз выше, чем у воздуха. Вода негативно влияет и на теплоудерживающие свойства, и долговечность материала в конструкциях. При замерзании увлажненного теплоизоляционного материала происходит увеличение его теплопроводности, поскольку теплопроводность льда составляет уже 2,32 Вт/(м·К). Кроме различия теплоизоляционных материалов по теплопроводности и средней плотности они подразделяются также:

- по типу исходного сырья – на неорганические и органические. К неорганическим относятся минеральная и стеклянная вата и изделия из них, вспученный керамзит, вермикулит и перлит, ячеистые бетоны, керамические теплоизоляционные изделия, пеностекло и др.; к органическим – древесностружечные и древесноволокнистые плиты, камышит, теплоизоляционные полимеры и др.;

- по форме материалов – штучные (кирпич, плиты, сегменты, блоки, цилиндры), рулонные (картон, маты, матрацы, полосы), шнуровые (жгуты, шнуры) и сыпучие материалы (вспученный перлит, минераловатная смесь и др.);

- по сжимаемости под нагрузкой (относительной деформации сжатия) – мягкие (М), сжимаемость свыше 30 % под удельной нагрузкой 2 кПа, полужесткие (ПЖ) – 6–30 %, жесткие (Ж) – до 6 %, повышенной жесткости – до 10 % под удельной нагрузкой 4 кПа и твердые – до 10 % под удельной нагрузкой 10 кПа.

К теплоизоляционным материалам предъявляются и другие требования – стабильность физико-механических и теплотехнических свойств, предельно допустимое количество выделяемых токсичных веществ, требования пожарной безопасности, экономичности. Тепловая изоляция должна выдерживать действие высокой температуры и открытого пламени в течение заданного времени. Предельная температура применения теплоизоляционных изделий: керамических – до 1200-1300 °С, ячеистого бетона и пеностекла – до 400 °С, органических – 75-100 °С [1, 2].

Структура теплоизоляционных материалов характеризуется наличием твердой и газообразной фаз; может присутствовать и жидкая фаза. Газовая и конденсированные фазы участвуют в передаче теплоты; кроме того, тепло передается через стенки пор с твердым веществом. Теплопередача пор складывается из теплопроводности газа в порах, конвективной передачи тепла и излучения газа. В порах диаметром менее 5 мм конвекция практически отсутствует и может не учитываться, но при большем диаметре пор или их непрерывности она растет. Тепловое излучение зависит от черноты стенок пор, их размера и формы, а также температуры. Величина излучения имеет существенное значение при передаче тепла в порах, особенно при высоких температурах, т.к. она пропорциональна кубу температуры. В результате теплопередача при высокой температуре высокопористых изделий может быть выше, чем менее пористых. Твердая фаза имеет более высокую теплопроводность и при ее непрерывности, теплопроводность материала оказывается в 2,0-2,5 раза выше, чем при непрерывности пор. В волокнистых теплоизоляционных материалах непрерывными в структуре являются как твердая фаза,

так и поры, поэтому их теплопроводность значительно зависит от лучистой составляющей теплопроводности.

К другим важным свойствам теплоизоляционных материалов, ощутимо влияющим на их эксплуатационные показатели, можно отнести:

– морозостойкость – способность материала выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание в насыщенном водой состоянии без признаков разрушения и без значительного понижения прочности. От этого показателя существенно зависит долговечность всей конструкции;

– механическая прочность, т.е. способность материалов сопротивляться разрушению под действием внешних сил, вызывающих деформации и внутренние напряжения в материале. Различают прочность теплоизоляционных материалов на сжатие, изгиб, растяжение, зависящие от структуры, прочности твердой составляющей и параметров пористости. Так жесткий материал с мелкими порами более прочен, чем материал с крупными неравномерными порами.

– долговечность – интегральный показатель, зависящий от целого ряда других свойств: химическая, биологическая и огневая стойкость, фазово-минералогический и химический состав и пр.

1.1.2 Способы получения теплоизоляционных материалов

С учетом физических факторов, влияющих на общую или эффективную теплопроводность в гетерогенных пористых телах, были предложены основные способы получения следующих теплоизоляционных материалов: пористо-волокнистых (минеральная и стеклянная вата, древесноволокнистые материалы с применением асбеста и др.), пористо-зернистых (перлитовые, вермикулитовые, известково-кремнеземистые и др.); ячеистых (газобетоны, пенобетоны, пеностекло, пенопласты и др.). Различие между ними заключается как в составе и структуре конечного продукта, так и в технологическом способе поризации.

К основным искусственным способам вспенивания материалов с целью придания им теплоизоляционных свойств относятся:

1) Способ газообразования, основанный на введении в сырьевую смесь компонентов, способных вызвать химические реакции с выделением большого количества газовой фазы. Газы, стремясь выйти из объема изготавливаемого материала на этапе твердения пластичной массы, собственным давлением формируют пористую структуру. Таким способом получают газобетон, газосиликат, газокерамика, ячеистое стекло (пеностекло), газонаполненная пластмасса и др.

2) Способ порообразования, основанный на введении в воду порообразующих веществ для затворения вяжущих. Стабилизированные пузыри пены представляют собой воздушные поры, формирующие структуру пенобетона, пеносиликата, пенокерамики и др. Порообразователями служат соли жирных кислот – натриевые и калиевые мыла, клееканифольный порообразователь; алюмосульфонафтенный порообразователь; гидролизованная кровь. В качестве стабилизаторов пены для повышения ее стойкости до момента затвердевания вяжущего применяются столярный клей, сернокислый глинозем, смолы и др.

3) Способ повышенного водозатворения, состоящий в применении большого объема воды при приготовлении формовочных масс и последующего ее испарения с сохранением пор при высушивании. Этот способ применяют в изготовлении древесноволокнистых плит, торфяных и других материалов.

4) Способ вспучивания, заключающийся в нагревании некоторых видов шлаков и горных пород до высоких температур. Из сырья за счет химически связанной или цеолитной воды выделяются водяные пары или газы. При способе вспучивания сырьем служат вермикулит, перлит, обсидиан, некоторые разновидности глин, особенно содержащие легкоплавкий оксид железа (II). После вспучивания во вращающейся или шахтной печи при быстром подъеме температуры до 800–1000 °С и последующем охлаждении, эти и некоторые другие сырьевые материалы формируют соответствующие теплоизоляционные материалы с развитой пористой структурой – вспученные керамзит, вермикулит, перлит, шлаковую пемзу и др.

5) Способ распушения, основанный на изготовлении из плотного минерального сырья бесформенной массы волокнистого материала с последующим прида-

нием ему формы изделий. Этот способ наиболее распространен в производстве минеральной и стеклянной ваты и изделий из них. Сырьем для минеральной ваты служат горные породы и металлургические шлаки, а для изготовления стеклянной ваты применяют стеклянный бой и отходы стекла. Органические теплоизоляционные материалы также получают способом распушения – хлопковую и шерстяную вату, ватные изделия и др. Способом распушения также получают асбест, а затем асбестовый материал, являющийся хорошим теплоизоляционным материалом, особенно в виде асбестовых бумаги и картона.

б) Способ выгорающих органических веществ, вводимых в сырье как поробразующие добавки. К керамическому сырью (диатомиту, трепелу, глине и т.п.) добавляют опилки, дробленый уголь и др. Этот способ позволяет использовать невспучивающееся сырье, учитывая дефицитность вспучивающихся глин.

1.1.3 Виды теплоизоляционных материалов

Органические теплоизоляционные материалы изготавливают с применением растительного сырья и побочных продуктов лесного и сельского хозяйства. Для таких материалов используют древесную стружку, опилки, камыш, торф, и др. Вторым распространенным видом органических теплоизоляционных материалов являются полимерные, получаемые на основе термопластичных полимерных материалов. К основным теплоизоляционным материалам с применением растительного сырья относятся древесностружечные, древесноволокнистые, фибролит, арболит, камышит, торфяные, войлочные [1, 2].

Древесностружечные плиты – искусственный строительный конгломерат (ИСК) в форме плит, изготавливаемый горячим прессованием смеси измельченной древесной стружки с полимерными веществами, выполняющими функции связующего компонента [3]. В качестве связующего используют смолы: мочевиноформальдегидные, фенолоформальдегидные и др. Для улучшения свойств плит в них вводят гидрофобизирующие и антисептирующие добавки.

Древесноволокнистые плиты – вид ИСК, изготавливаемый из отходов древесины путем ее измельчения и расщепления в волокнистую массу. К древесной массе добавляют гидрофобизирующие или антисептирующие вещества, и из нее отливают плиты. Их прессуют и сушат при температуре до 165–180 °С. Древесноволокнистые плиты используют в строительстве как изоляционный материал, не поражаемый домовыми грибами, для обшивки стен и потолков, утепления кровельных покрытий, дверных проемов и т.п. [1, 2].

Фибролит является ИСК, получаемым на основе неорганических вяжущих веществ с применением древесной шерсти – тонкую древесную стружку лентообразного вида специального назначения – в качестве армирующего компонента. Древесную шерсть подвергают «минерализации» (обработке хлористым кальцием, жидким стеклом или сернокислым глиноземом), после чего ее смешивают с вяжущим веществом и водой. Из данной смеси под давлением до 0,5 МПа формируют плиты. Отформованные плиты в течение суток отвердевают в пропарочных камерах при нормальном давлении и температуре 30–35 °С с последующей их сушкой до влажности не более 20 %. Используют фибролит для утепления стен и покрытий.

Арболит – ИСК, получаемый из смеси цемента, древесного заполнителя, воды и химических добавок. По своей структуре это разновидность легкого бетона, матричной частью которого является цементный камень. Этот материал применяют в стеновых конструкциях и как теплоизоляцию в стенах, перегородках зданий, особенно малоэтажных сельскохозяйственного назначения.

Камышит получают из стеблей камыша и тростника путем прессования и скрепления стальной проволокой поперек стеблей. В качестве антисептирующих веществ используют фтористый натрий, кремнефтористый аммоний и др. Камышит применяется для заполнения каркасных стен и перегородок. Из теплоизоляционных материалов камышит наиболее дешевый, но менее огнестоек, хотя, будучи спрессованным, он не горит открытым пламенем, но может длительное время тлеть. Его существенные недостатки – подверженность порче грызунами, загниваемость и плохая гвоздимкость.

Торфяные теплоизоляционные материалы (плиты, скорлупы и сегменты) получают из малоразложившегося торфа, сохранившего волокнистое строение. Для этого торфяную массу смешением доводят до однородного состояния с добавлением антисептиков и гидрофобизаторов, заполняют ею формы и прессуют. Спрессованные изделия подвергают термообработке при температуре 120–150 °С. В процессе обработки из торфа выделяются смолистые вещества, склеивающие волокна без внесения дополнительных вяжущих веществ. Торфяные плиты используют для утепления стен и перегородок, а также для изоляции поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов при температурах от минус 60 до плюс 100 °С.

Войлочные материалы получают из грубой шерсти с примесью льняной пакли – спутанного волокна, получаемого как отход при производстве льна. Войлок используют при утеплении стен и потолков, помещая его под штукатурку, при утеплении оконных и дверных коробок, наружных дверей и углов в рубленых домах.

Полимерные теплоизоляционные материалы характеризуются малой теплопроводностью, значительной легкостью и достаточной механической прочностью. Особый интерес представляют «заливочные» пенопласты на основе фенолформальдегидных, пенополистирольных, и полиуретановых полимеров. Образование теплоизоляционной прослойки пенопласта непосредственно при изготовлении стеновых панелей значительно упрощает и удешевляет работы.

Пенополистирол обладает пористой структурой с замкнутыми ячейками, заполненными воздухом или газом. Сырьем являются суспензионный полистирол и порофор как вспенивающий компонент. Пенополистирол не подвержен гниению, легко гвоздится и склеивается со многими строительными материалами. Он используется в конструкциях кровель, в строительстве холодильников, при устройстве внутренних перегородок, междуэтажных перекрытий, вентиляционных каналов, утепления стен [1, 2].

Весьма эффективным материалом является экструзионный пенополистирол, вспучивающийся через расплав в экструдере. Он характеризуется максимальной стабильностью теплотехнических и физико-механических свойств во времени. Он

применяется как утеплитель оснований автомобильных дорог и железнодорожного полотна, подземных частей зданий и сооружений, в конструкциях кровли, в зонах вечной мерзлоты и т.п.

Пенополивинилхлорид – жесткий, эластичный или полуэластичный пенопласт, устойчивый к действию щелочей, кислот, воды и могут применяться в интервале температур – 60...+60 °С. Пенополивинилхлорид широко используют для теплоизоляции холодильников, а также для звукоизоляционных целей.

Пенополиуретаны – газонаполненные пенопласты, получающиеся на основе полиэфиров и применяемые в интервале температур -60...+170 °С в качестве тепло- и звукоизоляционного материала; фасонные изделия широко используют для изоляции трубопроводов горячего и холодного водоснабжения.

Сотопласты – тепло- и звукоизоляционные материалы, получаемые путем горячего формования гофрированных листов бумаги, ткани или древесного шпона, предварительно пропитанных фенолформальдегидным резольным полимером. Физико-механические свойства сотопластов зависят, в первую очередь, от формы и размеров сот, а также от природы образующего стенки полостей материала. Из-за низкой стоимости и малой теплопроводности наиболее широкое применение в строительстве получили сотопласты с наполнителем из хлопчатобумажных тканей и бумаги.

К группе *неорганических теплоизоляционных материалов* относятся: минеральная и стеклянная вата и изделия из них; ячеистое стекло (пеностекло); легкие бетоны с применением вспученного заполнителя; ячеистые теплоизоляционные бетоны; асбестовые и асбестосодержащие материалы; керамические теплоизоляционные изделия и огнеупорные легковесы. Главной особенностью неорганических теплоизоляционных материалов является их высокая огнестойкость, малая теплопроводность, низкая гигроскопичность, невосприимчивость к загниванию.

Минеральная вата применяется для теплоизоляции холодных (до -200 °С) и горячих (до +600 °С) поверхностей. Укладывание ваты слоем – весьма трудоемкий процесс, поэтому при засыпной изоляции ее чаще превращают в гранулы. Основными типами изделий с использованием минеральной ваты являются полу-

жесткие и жесткие плиты на битумном или синтетическом связующем. Волокна минеральной ваты смешивают со связующим веществом, и из полученной массы в результате нагревания под давлением формуют изделия [1, 2].

Стеклянная вата и изделия из нее обладают практически теми же свойствами, что и минеральные. Этот вид ваты применяют для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий, поверхностей промышленного оборудования при температуре до $+200...450\text{ }^{\circ}\text{C}$, трубопроводов с температурой до $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из стеклянной ваты формируют изделия в виде плит, матов, скорлуп.

Вспученные перлит и вермикулит представляют собой теплоизоляционные материалы в виде гранул для засыпки полостей, и особенно в качестве заполнителей легких бетонов и растворов для монолитного и сборного строительства. Из вспученного перлита с применением минеральных или органических связующих веществ изготавливают различные виды перлитобетона, в том числе жаростойкий ($500\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также изделия из керамзитоперлитобетона, силикатоперлитовые, перлитобитумные изделия и т.д. Из вспученного вермикулита получают плиты, скорлупы и сегменты на основе связующих веществ с применением асбеста и других добавок. Вермикулитобетон применяют для изготовления трехслойных панелей. С использованием вспученного перлита и вермикулита можно получать материалы трех групп: рядовая изоляция с температурой применения до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – песок и пудра, перлитопластбетоны, пр.; среднетемпературная изоляция (до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$) – перлитоцементы, обжиговый легковес, пр.; высокотемпературная изоляция ($800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) – перлитокерамические изделия, жароупорный перлитобетон, перлитовые огнеупоры и др.

Ячеистые бетоны и силикаты используют как теплоизоляционные материалы и изделия при их плотности ниже 400 кг/м^3 . По виду применяемого порообразователя и вяжущего вещества их называют пенобетонами, пеносиликатами, газобетонами, газосиликатами. Возможно использование смешанного порообразователя, в таком случае их называют пеногазосиликатами, пеногазобетонами, керамзитопенобетонами и т.п. Плиты из ячеистых бетонов применяют для теплоизоляции стен и перекрытий, покрытия поверхностей оборудования и трубопроводов.

Асбестовые и асбестосодержащие теплоизоляционные материалы представлены асбестовой бумагой, картоном, плитами, скорлупами, сегментами, шнурами и др., мастичными изоляциями с применением асбестовых порошков. Данные материалы применяют для тепловой изоляции оборудования и трубопроводов при температуре до $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Представителями этой группы материалов являются асбестотрепельные, асбестоизвестководиаомитовые, асбестодоломитовые и т.д. Используя эти материалы, получают обычно мастичную изоляцию. Особенно часто такие изделия используют при температурах не выше $550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Пеностекло – тепло- и звукоизоляционный материал, являющийся вспененной стекломассой (ячеистое стекло). Для его производства используется способность силикатных стёкол размягчаться и (в случае наличия газообразователя) пениться при температурах $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. По мере нарастания вязкости при охлаждении вспененной стекломассы до комнатной температуры получившаяся пена приобретает существенную механическую прочность.

Подробный сравнительный анализ ТИМ, наиболее распространенных на современном рынке, представлен в таблицах 1.1-1.2.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика блочных теплоизоляционных материалов

Параметр	Ед. изм.	Пеностекло	Плиты из минеральной ваты	Пенополистирол	Экструдированный пенополистирол	Пенополиуретан	Пенобетон
Средняя плотность	кг/м ³	200 - 600	50 - 200	40 - 150	33 - 40	32 - 80	400 - 1100
Коэффициент теплопроводности	$\frac{Вт}{(м \cdot К)}$	0,063-0,14	0,048 - 0,07	0,038 - 0,05	0,031 - 0,038	0,030 - 0,041	0,09 - 0,29
Толщина материала для обеспечения $R_0=2,7 \text{ м}^2 \cdot К/Вт$	мм	170	130	103	84	81	243
Прочность на сжатие	МПа	1,5 - 7,5	0,03 - 0,15	0,04 - 0,2	0,12 - 0,2	0,15 - 0,3	0,9 - 7,5
Усадка	%	$\leq 0,1$	≤ 10	≤ 30	$\leq 0,5$	≤ 1	$\leq 0,5$
Горючесть	группа	НГ	НГ-Г2 (негорючие – умеренно горючие)	Г2-Г3 (умеренно – нормально горючие)	Г1 (слабо горючие)	Г3-Г4 (нормально – сильно горючие)	НГ
Воспламеняемость	группа	-	В1-В2	В2-В3	В2-В3	В3	-
Морозостойкость	циклов	более 100	не более 5	не более 15	не более 20	не более 15	не более 50
Водопоглощение, не более	об. %	2 - 20	34	4	0,4	8	5 - 10
Температурный интервал эксплуатации	°С	-100...+500	-200...+650	-180...+80	-50...+75	-160...+130	-50...+450
Срок службы	лет	> 100	< 15	< 15	< 20	< 15	< 50
Средняя стоимость в 2016 г.	тыс.руб. за м ³	12,5 – 16,5	2,2 - 7,0	2,5 - 5,0	4,5 - 16,0	4,0 - 15,0	1,5 - 3,0

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика гранулированных теплоизоляционных материалов

Параметр	Ед. изм.	Гранулированное пено-стекло	Керамзит	Вспученный пер-лит	Вспученный верми-кулит	Пенополистирол гранулиро-ванный
Насыпная плот-ность	кг/м ³	150 - 400	200 - 800	50 - 600	100 - 200	6 - 30
Коэффициент теплопроводности	$\frac{Вт}{(м \cdot К)}$	0,045 - 0,1	0,1 - 0,18	0,052 - 0,093	0,055 - 0,065	0,037 - 0,054
Водопоглощение	об. %	2 - 20	8 - 20	20 - 400	300	2 - 5
Температура применения	°С	-100...+500	-50....+100	-200...+875	-260...+1200	-180...+80
Прочность на сжатие	МПа	0,5 - 2,5	0,6 - 5,5	0,1 - 0,6	не нормируется	0,005 - 0,026
Средняя стоим-ость 1 м ³ в 2014 году	тыс. руб.	3,5 - 5,0	1,2 - 1,7	1,0 - 1,5	4,0 - 6,0	1,5 - 3,5
Основные недо-статки	-	высокая цена	высокая плотность и водопоглощение, низкие теплоизоляцион-ные качества	высокое водопо-глощение, низкая прочность	высокое водопо-глощение, низкая прочность	низкая проч-ность, токсич-ность

Как видно из таблиц 1.1-1.2, из всего спектра существующих в настоящее время теплоизоляционных материалов по совокупности характеристик особо выделяется пеностекло. За счет стеклообразной структуры пеностекло обладает уникальной совокупностью свойств, обеспечивающих ему широчайшее применение (таблица 1.3) [4-8].

Таблица 1.3 – Области применения пеностекла

Свойства	Применение
Низкая плотность материала при высокой прочности	<ul style="list-style-type: none"> - строительство на слабых грунтах; - наполнитель для лёгких бетонов; - теплоизоляция перекрытий, кровель, полов; - наполнитель для теплоизоляционной штукатурки и сухих строительных смесей; - надстройка верхних этажей зданий; -изготовление понтонных и иных плавучих конструкций.
Разнообразие размеров ячеек и цвета материала	<ul style="list-style-type: none"> - использование в качестве отделочного материала.
Огнестойкость, негорючесть	<ul style="list-style-type: none"> - теплоизоляция в высотном строительстве; - создание огнепреградительных конструкций; - теплоизоляция трубопроводов и промышленного оборудования, работающего в условиях повышенных температур (до 500°C).
Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - строительство резервуаров и технологических линий в пищевой и фармацевтической промышленности.
Низкая теплопроводность	<ul style="list-style-type: none"> - теплоизоляция в промышленном (в том числе, и в агрессивных средах), гражданском и индивидуальном строительстве; - использование для термоизоляции трубопроводов и газопроводов
Низкая паропроницаемость	<ul style="list-style-type: none"> - паро- и гидроизоляция в промышленном и гражданском строительстве.
Химическая инертность, высокая коррозионная устойчивость	<ul style="list-style-type: none"> - изготовление многоразовой изоляции; - строительство резервуаров и трубопроводов для кислот и нефтепродуктов; - защита зернохранилищ, хозяйственных и жилых помещений.
Высокая морозоустойчивость	<ul style="list-style-type: none"> - теплоизоляция дорожного полотна.

Учитывая подобный комплекс свойств, рассмотрим основные особенности производства и применения пеностекла и изделий на его основе.

1.2 Технологические особенности производства и применения пеностекла

Как указывалось выше, пеностекло – это долговечный, сверхлегкий, виброустойчивый, влагонепроницаемый материал, обладающий атмосферной и химической устойчивостью. Пеностекло обладает высокими теплоизоляционными свойствами. В зависимости от химического состава, плотности и текстуры пеностекло может применяться как теплоизоляционный, строительно-изоляционный, звукоизоляционный, декоративный, плавучий, электроизоляционный, конструкционный материал и т.д.

Преимущества пеностекла, заключающиеся в уникальном сочетании теплоизоляционных и конструкционных свойств, пожаробезопасности, безусадочности и биостойкости, переносят его в разряд долговечных теплоизоляционных материалов. Пеностекло – это уникальный материал, с практически неограниченным сроком службы. Он сохраняет свои свойства в течение всего срока службы здания.

Пеностекло производится в форме штучных изделий и изоляционных заполнителей – щебня и гранул. Пеностекло основных производителей обладает значительной прочностью (0,6–1,1 МПа), малой плотностью (120–170 кг/м³), теплопроводностью (0,04–0,06 Вт/(м·К)) водопоглощением (≤ 5 кг/м² за 28 суток) [9–11].

Основной причиной недостаточно широкого применения пеностекла в практике строительства, являются не его эксплуатационные характеристики, а цена, связанная с технологическими особенностями его получения. В связи с этим первостепенную важность приобретают проблемы модернизации технологии синтеза пеностекла с применением оптимизированных составов и технологических параметров синтеза. С учетом того, что существующие технологии пеностекла были ориентированы, в первую очередь, на получение теплоизоляционных мате-

риалов, масштабные исследования проводились в отношении пеностекол с низким коэффициентом теплопроводности на основе недорогого сырья. Очень важно при этом создать условия формирования оптимальной пористой структуры пено-стекла, обуславливающей качество получаемого материала.

1.2.1 Функции компонентов пеностекольной шихты

На вспенивание влияет каждый компонент шихты. Порошок стекла – это основа материала. В области высоких температур стекло должно находиться в вязком состоянии для вспенивания. Интервал температур при этом лежит в диапазоне 580–740 °С. При более высоких температурах стекло – это вязкая масса, подвергаемая деформациям во всех трех измерениях [12-14].

В настоящее время существуют варианты получения ячеистого стекла на основе различного сырья. Пеностекло получают на основе боя листового и тарного стекла, горных пород, промышленных отходов и специально сваренных стекол. Особо значимы два параметра, изменяемые температурно-временными параметрами вспенивания:

- формирование каркаса пеностекла должно обеспечивать протекание миграционных и химических процессов в силикатном каркасе исходного стеклопорошка;
- процесс вспенивания должен влиять на физические свойства получаемого материала.

Процесс взаимодействия между отдельными частицами порошка стекла, обеспечивающий устойчивость каркаса стекла из-за формирования связей Si–O–Si, обусловлен перемещением ионных ассоциатов. Поверхностное натяжение также оказывает существенное влияние на все те технологические процессы, которые сопровождаются изменением поверхности раздела «расплав – газ».

Современное производство пеностекла предусматривает два метода к образованию пеностекла: порообразование с помощью углеродсодержащих веществ (глицерин, антрацит, сажа и др.) или неорганических карбонатов, оксидов бора и

фосфора. Углеродные материалы формируют т.н. «черное» пеностекло, карбонатные – «белое». В первом случае кроме получения CO_2 образуется спектр соединений углерода. При вспенивании стекла CO_2 формирует замкнутые поры сферической формы. Учитывая сложность процессов газо- и порообразования, особенно конкретных порообразователей будут рассмотрены далее.

Следующими необходимыми компонентами шихты для получения пеностекла (особенно гранулированного) являются различные добавки, разделяемые на два типа: 1) технологические; 2) снижающие проявление щелочно-силикатных реакций [15].

К первой группе относятся связующие и опудривающие материалы. Связующие применяют для улучшения гранулообразования. В качестве них применяют лигнины, жидкое стекло, карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ), крахмальный клейстер [16]. Широко распространено жидкое стекло (раствор силиката натрия). Его применение объясняется обеспечением более высокого содержания связанной воды на этапе составления шихты. Итогом спектра исследований [11, 16, 17] стал факт, что ввод в шихту долей процента связанной воды снижает вязкость стекла в интервале 740–840 °С в 2,5–4 раза. Другой функцией жидкого стекла является обеспечение сохранности порообразователя возле каждой частицы стекла до определенной температурной и более полного контакта между частицами.

Известно также [17], что водяной пар снижает поверхностное натяжение расплава стекла более чем на 30 %. Поверхностное натяжение расплава уменьшается с ростом парциального давления пара. Было установлено, что рост давления пара понижает температуру вспенивания [17].

Другим видом добавок являются опудривающие материалы, предотвращающие склеивание гранул при термообработке и прилипание к форме и футеровке печи. Для этого используют тугоплавкие порошки: технический глинозем, тальк, тонкоизмельченные отходы огнеупоров, водные эмульсии тугоплавких глин (каолина) в соотношении 2:1 [16, 18].

Опудриватели также участвуют в снижении активности щелочно-силикатных реакций (ЩСР) при использовании пеностекла как заполнителя для

бетонов. Причиной ЩСР при использовании цемента и любого компонента на основе стекла являются реакции аморфного кремнезема со щелочами цемента. Итогом реакции является образование щелочно-силикатного геля. Кальций повышает вязкость геля и водопоглощение, что ведет к появлению внутренних напряжений, расширяющих бетон и ведущих к трещинообразованию [19-21].

Применение пеностекла как заполнителя для бетонов требует мер по снижению ЩСР, обеспечиваемых следующими путями: 1) снижать количество щелочно-земельных металлов в пеностекле в пределах 8–15 %; 2) вводить не менее 5 % соединений циркония; 3) покрывать гранулы связками, снижающими степень взаимодействия пеностекла с цементом (силикат натрия, полиуретан, эпоксидная смола). Таким образом, применение жидкого стекла снижает также активность ЩСР, что ведет к дополнительному повышению качества бетона [22-25].

1.2.2 Особенности формирования структуры пеностекла при использовании различных порообразователей

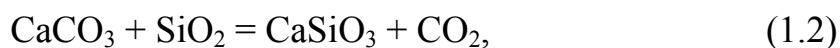
При вспенивании, как правило, не наступает химического разложения всего порообразователя и, помимо этого, после разложения могут остаться твердые частицы. При формировании пеностекла, вместе с жидкой (стеклообразной) и газообразной фазами, всегда имеется некоторое количество твердой фазы. При вспенивании происходит быстрое перемещение неразложившейся твердой части порообразователя (как правило, с меньшей плотностью) в сторону вновь образующейся поверхности стеклофазы. Вещества с малым химическим сродством к жидкой фазе стекла, концентрируются на поверхности границы между газовой и жидкой фазами и поэтому оказывают поверхностно-активное действие. В противоположность этому, вещества с большим химическим сродством к стеклу растворяются в нем, а иногда и химически взаимодействуют, и поэтому эти вещества не будут оказывать активного действия.

Действие твердой фазы на границе жидкой и газовой фаз проявляется тем, что твердые частицы приклеиваются к поверхности стекла, или же, в зависимости

от смачиваемости стеклом, в некоторой степени погружаются в его поверхностный слой. В такой системе свободная поверхностная энергия пограничного слоя существенно уменьшается, и возникает энергетический барьер, за счет чего пена стабилизируется. Было доказано, что наибольшее стабилизирующее действие на пену имеют такие твердые вещества, которые незначительно смачиваются жидкой фазой, т.е. когда между поверхностями жидкой и твердой фазы образуется максимальный предельный угол. Таким веществом является, например, углерод, имеющий весьма малое химическое сродство к расплаву стекла, а также весьма незначительно смачивается им. Микроскопические исследования позволяют установить, что черная окраска пеностекла, синтезированного с помощью углеродистого порообразователя, обусловлена малыми частичками непрореагировавшего углерода, приклеивающимися на поверхности стенок ячеек.

Таким образом, последнее обстоятельство является основным объяснением возможности получения весьма качественного пеностекла с малым водопоглощением при применении углеродистых порообразователей. В то же время, большинство минеральных порообразователей, прежде всего карбонатных, – доломит или известняк – характеризуются существенным химическим сродством к стеклу, поэтому ни сами порообразователи, ни продукты их диссоциации (CaO , MgO) не могут оказывать на стекольную пену стабилизирующего действия. Применяя эти порообразователи, до сих пор не удалось получить пеностекла с объемным весом менее 200 кг/м^3 , которое не имело бы значительного водопоглощения.

Группа *нейтрализационных порообразователей*, действие которых является результатом реакции нейтрализации, в настоящее время за малым исключением в промышленности уже не используется. Некоторые компоненты стекла, прежде всего SiO_2 , B_2O_3 и P_2O_5 , являются в реакции нейтрализации кислой составляющей, а порообразователь, которым обычно бывает карбонат щелочно-земельного металла, – основной составляющей. Выделение газа в момент, когда стекло уже оказывается достаточно жидким для того, чтобы образовать пену, можно выразить с помощью простой схемы, например для известняка (1.2):



Реальный механизм взаимодействия между стеклом и карбонатом является более сложным. Начало разложения относится к реакции между частицами известняка и стекла в твердом состоянии. Большое значение имеют также и щелочные металлы, находящиеся в стекле, нарушающие непрерывную сетку тетраэдров SiO_2 и повышают, таким образом, реакционную способность стекла. Одновременно с реакцией нейтрализации происходит и термическое разложение известняка, зависящее не только от температуры, но и от парциального давления углекислого газа в ячейках пеностекла. При использовании бесцветного стекла пеностекло получается чисто белого цвета, из цветных стекол можно получить пеностекло различной окраски.

С использования карбоната кальция начинали свои работы многие известные исследователи в области пеностекла, такие как, например, И.И. Китайгородский, Б. Лонг, Е. Шульц и др. Первым патентом, относящимся к способу производства пеностекла с использованием известняка, является чехословацкий патент № 63398 [26]. Вместо карбоната кальция можно использовать и другие карбонаты: магнезия (доломит, сидерит) и даже натрия (соду) и калия (поташ). Эти порообразователи применяются в количестве 1–2 % от веса стекла. Порообразование при этом протекает бурно и обычно при температурах на 30–50 °С ниже, чем при использовании описанных ниже углеродистых порообразователей. Однако пеностекло с объемным весом меньше 200–250 кг/м³ удастся получить лишь с большим трудом.

О полученном таким способом пеностекле правильнее говорить как о губчатом, поскольку в нем отдельные ячейки неравномерны как по величине, так и по форме, а, кроме того, между ними даже невооруженным глазом можно различить много связанных друг с другом каналов. Водопоглощение таких изделий бывает весьма высоким – от 30 до 90 % по объему, в среднем около 70 %. Шульц [26] весьма подробно изучал порообразование с помощью известняка и предложил весьма сложный способ спекания и вспенивания, по которому форму с порообразующей смесью необходимо нагревать 6 ч с соблюдением предельно строгих

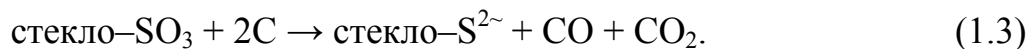
требований температурного режима, и затратами времени в среднем в 3 раза дольше, чем при применении углеродистых порообразователей.

Невозможность получить пеностекло с незначительным водопоглощением при применении карбонатных порообразователей обусловлена рядом причин. Карбонат кальция может оказывать благоприятное влияние на рекристаллизацию стекла при вспенивании, т.к. технические стекла с высоким содержанием оксидов двухвалентных металлов характеризуются высокой склонностью к ней. При нагревании порошковой смеси стекла и известняка также нельзя достаточно отделить процесс спекания стекла от процесса образования газов, т.к. у тонко молотого известняка термическое разложение происходит при сравнительно низких температурах и совпадает с собственно реакцией нейтрализации в течение всего времени порообразования.

Встречающиеся в литературе сведения о получении пеностекла с использованием карбонатных порообразователей, имеющего незначительное водопоглощение, могут быть объяснены различными методами его измерения. Капилляры, пронизывающие отдельные ячейки карбонатного пеностекла, в основном имеют незначительный диаметр и расположены лабиринтообразно. Простое погружение образца пеностекла в холодную воду не обеспечивает полного удаления всего воздуха из исследуемых материалов и заполнения капилляров водой. Естественно, что в этом случае пеностекло показывает меньшее значение водопоглощения, чем это соответствует действительному объему пор. Однако достаточно удалить воздух из пор, например, кипячением, и водопоглощение этих изделий достигает весьма высоких значений, более соответствующих действительности.

Способ производства пеностекла с применением *окислительно-восстановительных порообразователей* был впервые опубликован во французском патенте № 786818 [26]. Процесс производства по этому патенту в дальнейшем подвергался постоянной модернизации, и в настоящее время по этому способу производится практически все пеностекло в мире. В основе этого способа лежит реакция, по которой определенный компонент стекла восстанавливается порообразователем с образованием газов. Восстанавливаемым компонентом стекла

обычно бывает SO_3 , восстанавливающим порообразователем – углерод или содержащее его органическое вещество. Схему реакции при формировании пеностекла можно представить реакцией (1.3):



Записанная так реакция является только схемой. Если о нейтрализационных порообразователях было сказано, что действительный механизм протекания реакций с их участием весьма сложный, то в еще большей степени это справедливо для порообразователей окислительно-восстановительных. В схеме реакции представлено восстановление шестивалентной серы, содержащейся в стекле, до серы сульфидной, тогда как в некоторых источниках приводится восстановление лишь до четырехвалентной серы с образованием сернистого газа SO_2 . Однако готовое пеностекло, полученное по этому способу, всегда имеет запах сероводорода и никогда не имеет запаха сернистого газа, а при длительном нагревании готового пеностекла в больших полостях, образованных в результате объединения отдельных ячеек, образуется и SO_2 . Однако он может образовываться как взаимной реакцией с образовавшейся ранее сульфидной серой или с непрореагировавшей трехокисью серы, так и восстановлением трехокиси серы углеродом.

В связи с образованием в пеностекле сероводорода, который как чувствуется по запаху при царапании пор, так и определяется химическим путем (в количестве нескольких процентов) [26], весьма важным является вопрос функции воды. Для формирования сероводорода необходимо наличие водорода, значительное количество которого в пеностекле может возникать только за счет разложения воды. Наличие воды объясняется, в первую очередь, тем, что сырьевая смесь, как любое тонкоразмолотое техническое стекло, достаточно гигроскопична и даже при герметизации транспортных коммуникаций готовой смеси всегда содержит несколько десятых процента влаги. Совместное присутствие воды и углерода при температурах около 800°C неизбежно ведет к взаимной реакции с образованием водяного газа ($\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$). Скорость этой реакции в порообразующей смеси может быть весьма высока вследствие большой поверхности контакта. В лабораторных условиях удалось доказать, что хорошо высушенная порообразую-

щая смесь вспенивается существенно хуже, чем смесь, высушенная на воздухе, т.е. содержащая гигроскопическую влагу.

Кроме реакции углерода с водой или другими компонентами стекла следует учитывать также непосредственное окисление кислородом воздуха, содержащемся в сырьевой смеси и в атмосфере печи, и обратимые реакции между углеродом и различными продуктами реакций, прежде всего CO , CO_2 и H_2 . Кроме того, в протекании окислительно-восстановительных реакций участвуют и другие компоненты, прежде всего оксиды железа. В одном из патентов по производству пеностекла из кремнезема описывается даже восстановление SiO_2 углеродом с образованием SiO и CO .

Независимо от механизма реакций между порообразователем и компонентами сырьевой смеси, очевидно, что благодаря протеканию этих реакции формируется необходимый объем газов, причем в самый благоприятный момент, когда стекло уже спеклось и может формировать пену. В качестве главного окисляющего компонента в стекле была приведена трехокись серы. Она содержится в количестве 0,1–0,5 % почти во всех технических стеклах. Как было отмечено раньше, трехокись серы в присутствии избытка кислорода содержит также и стекла, которые были сварены из шихты без добавления сульфата, но находились в соприкосновении с соединениями серы (например, из генераторного газа).

Трехокись серы при этом не является единственным окисляющим компонентом, способным формировать пеностекло. В лаборатории возможен синтез стекла с мышьяком, оксидами сурьмы, марганца, перманганатом калия, бихроматом калия и другими окислителями. Однако, поскольку углерод служит и для стабилизации стекломассы, в пеностекле всегда должно оставаться определенное количество непрореагировавшего углерода, зависящее в большей степени от объема, чем от веса. Наибольшая зависимость этого количества – от удельной поверхности частиц углерода; поэтому углеродистые добавки с большей удельной поверхностью, применяются в меньшем количестве, чем уголь и кокс. Последние измельчаются или одновременно со стеклом, или отдельно приблизительно до того же размера, что и порошок стекла.

Меньший остаток углерода проявляется во внешнем виде готового пено-стекла: пеностекло, полученное на основе сажи, оказывается более блестящим и светлым, чем на основе угля и кокса, получаемое черным и матовым. С другой стороны, тонкозернистый углерод склонен к окислению, вследствие чего при его использовании необходимо применение плотных форм или вспенивание в явно не окислительной атмосфере. Иначе порообразователь выгорит раньше, чем спечется стекло, из-за чего вспенивания или вообще не произойдет, или получится пено-стекло низкого качества и с большим водопоглощением. После спекания стекла, оно обволакивает отдельные частички углерода, препятствуя его преждевременному окислению.

Достойны упоминания еще некоторые другие формы углеродистых порообразователей, рекомендуемых в некоторых зарубежных патентах. Так, например, Д. Эустахио в патенте № 2775524 [26] предлагает использовать углерод, распределенный в каком-либо инертном веществе с удельной поверхностью около 100–500 тыс. $\text{см}^2/\text{г}$. В качестве последнего пригодны гель двуокиси кремния или силиката кальция. Инертная масса с большой поверхностью насыщается раствором органического легко разлагающегося вещества, например сахара, глицерина, многоосновных спиртов, из которых при дальнейшем восстановлении образуется тонко распределенный углерод. Количество углерода, вводимого в инертный наполнитель, должно быть 5–50 %. Приготовленный таким образом порообразователь вводится в сырьевую смесь в количестве 0,2–8 %. По сравнению с использованием чистой сажи достигается лучшее качество пеностекла, поскольку углерод лучше распределяется в порообразующей смеси и поэтому может быть использован в меньшем количестве. Здесь следует отметить еще одно преимущество жидкофазных порообразователей – отсутствие необходимости в ультратонком помоле (не менее 6000–7000 $\text{см}^2/\text{г}$), без которого не может быть достигнута требуемая однородность и пористость. Описание порообразователей, применяемых различными научными коллективами, приведено в таблице 1.4 [27–34].

Таблица 1.4 – Порообразователи, применяемые научными коллективами

Порообразователь	Руководитель коллектива	Организация
Сажа	Д.О. Байджанов	Карагандинский государственный технический университет
Сажа	О.В. Казьмина	Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Технический углерод	О.В. Пучка	Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Коксовый орешек	В.А. Лотов	Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Сахар	А.А. Кетов	Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Глицерин	Е.А. Яценко	Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
Глицерин, Кальцит	Л.К. Казанцева	Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
Мрамор (микрокальцит)	О.С. Татаринцева	Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук
Доломит	Д.Р. Дамдинова	Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Полученные на данный момент научные результаты указывают, что применение углеродных порообразователей позволяет получать более равномерную структуру и, соответственно, более качественный материал. Карбонатные порообразователи применяются обычно при решении специфичных задач, в частности, при применении нетипичного сырья.

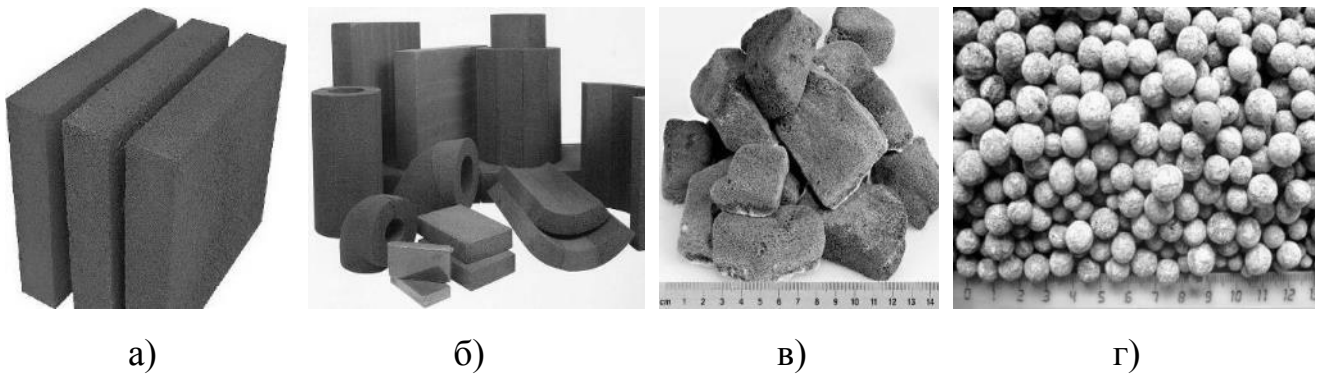
1.2.3 Изделия на основе пеностекольных материалов

На сегодняшний день имеется два основных вида изделий из пеностекла – гранулы и блоки (рисунок 1.1).

Пеностекло блочного типа обладает структурой с замкнутыми ячейками. Этот материал оптимально подходит для теплоизоляции фасадов зданий, цоколей, отмосток, фундаментов, потолков, межэтажных перекрытий, трубопроводов. Он выдерживает даже самые суровые условия эксплуатации. А поскольку утеплитель

не дает усадки, то его используют и как основной строительный материал. Плиты имеют размер 450х600 мм. Толщина пеностекла — от 60 до 120 мм. При этом на основе блочного пеностекла возможно получение изделий любой формы: плиты; блоки; скорлупы и другие фасонные изделия.

Гранулированное пеностекло имеет вид микропористых сферических гранул. По форме это может быть крошка, песок, щебень (гравий). Размер фракций разный — 1-5 мм, 5-7 мм, 7-20 мм. Такие изделия используют для теплоизоляции полов и перекрытий, внутренних стен.



а) плиты; б) фасонные изделия; в) щебень; г) гранулы

Рисунок 1.1 – Внешний вид изделий из пеностекла

Кроме указанных выше способов применения изделий из пеностекла, гранулированное пеностекло может применяться также в различных видах композиционных материалов. Наибольшее применение в настоящий момент получили легкие бетоны, где пеностекольные гранулы применяются в качестве заполнителя.

1.3 Классификация легких бетонов

Бетон – это искусственный камень, получаемый при твердении рационально подобранной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды и заполнителей (щебня, гравия или песка). Смесь этих материалов до затвердевания называют бетонной смесью. Зерна песка и щебня составляют каменную основу бетона. Цементное тесто, образующееся после затворения бетонной смеси водой, обволакивает зерна песка и щебня, заполняет промежутки между ними и играет вначале роль смазки заполнителей, придающей подвижность (текучесть) бетонной смеси,

а после затвердевания связывает зерна заполнителей, образуя искусственный камень.

Легкие бетоны представляют для российского строительства значительный практический интерес. По сравнению с тяжелым бетоном они имеют ряд преимуществ. Наиболее важным из них является более низкая плотность. Так, плотность легкого бетона высоких марок примерно в 1,5 раза меньше, чем тяжелого. Разница в весе легких бетонов невысокой прочности по сравнению с тяжелым – еще больше и может достигать до 2-3 раз. В этом случае легкие бетоны приобретают и другое весьма важное преимущество – хорошие теплозащитные свойства. По причине меньшего веса легкобетонных элементов по сравнению с железобетонными значительно упрощаются условия их транспортирования и монтажа.

Технология легких бетонов, разработанная Н. А. Поповым [35], в настоящее время получила широкое развитие. Легкий бетон – это бетон с объемной массой не более 1800 кг/м^3 . Его получают, либо используя пористые (легкие) заполнители, гравий или щебень без мелкого заполнителя, либо поризуя (вспенивая) цементное тесто (ячеистый бетон). Наиболее распространены легкие бетоны на пористых заполнителях: керамзитобетоны, шлакобетоны, аглопоритобетоны, вермикулитобетоны, и др. Благодаря малой плотности и теплопроводности, а также достаточной прочности легкие бетоны широко применяются в сборных бетонных и железобетонных конструкциях и изделиях [36].

Легкие бетоны в соответствии с требованиями ГОСТ 25192-2012 классифицируют по следующим признакам: виду заполнителей; основному назначению; структуре.

По виду крупного пористого заполнителя бетоны подразделяют на: керамзитобетон (бетон на керамзитовом гравии); перлитобетон (бетон на вспученном перлитовом щебне); аглопоритобетон (бетон на аглопоритовом щебне или гравии); шунгизитобетон (бетон на шунгизитовом гравии); бетон на щебне из пористых горных пород; термолитобетон (бетон на термолитовом щебне или гравии); вермикулитобетон (бетон на вспученном вермикулите); шлакопемзобетон (бетон на шлакопемзовом щебне или гравии); шлакобетон (бетон на золошлаковых сме-

сях тепловых электростанций – ТЭС или на топливном шлаке, гранулированном доменном или электротермофосфорном шлаке). Допускается применять другие виды бетонов на крупных пористых заполнителях: на зольном, стеклозитовом, азеритовом гравии и др.

По области применения легкие бетоны подразделяют на конструкционные (в том числе конструкционно-теплоизоляционные) и специальные (теплоизоляционные, жаростойкие, химически стойкие, декоративные и др.). Следует выделить три наиболее распространенные вида бетонов (согласно ГОСТ 25820-2014): конструкционный (плотность не более 2000 кг/м^3), к которому предъявляются требования по механическим свойствам и долговечности; конструкционно-теплоизоляционный (плотность не менее 500 кг/м^3), к которому предъявляются требования по механическим свойствам, долговечности и теплотехническим показателям; теплоизоляционный (плотность не более 500 кг/м^3), предназначенный для изготовления теплоизоляционных изделий, устройства теплоизоляции строительных конструкций, оборудования и трубопроводов. Классификация легких бетонов по области применения приведена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Область применения легкого бетона на основе различных видов пористых заполнителей

Вид бетона	Назначение бетона		
	теплоизоляционный	конструкционно-теплоизоляционный	конструкционный
Керамзитобетон	+	+	+
Пеностеклобетон	+	+	+
Шунгизитобетон	+	+	±
Аглопоритобетон	-	±	+
Шлакопемзобетон	±	+	+
Перлитобетон		+	±
Бетон на щебне из пористых пород	±	+	+
Термолитобетон	-	±	+
Вемикулитобетон	+	-	-
Шлакобетон	-	+	+
Примечание – Знак "+" означает, что данный бетон рекомендуется, "±" – допускается, "-" – не рекомендуется для применения			

По структуре бетоны подразделяют на: поризованные; крупнопористые; ячеистые; плотные.

Поризованный легкий бетон. Поризацию растворной части бетона применяют для улучшения теплофизических свойств легкого бетона на пористом заполнителе, или заменяют растворную часть поризованным цементным камнем. К поризованным легким бетонам относят бетоны, содержащие более 800 л/м^3 легкого крупного заполнителя с объемом воздушных пор 5...25 %. Поризацию таких бетонов осуществляют либо предварительно подготовленной пеной, либо за счет введения воздухововлекающих или газообразующих добавок. Воздухововлекающими добавками поризуют только смеси с песком, пеной – только беспесчаные смеси, газообразующими добавками – смеси с песком и без песка. В зависимости от применяемого заполнителя и способа поризации бетоны называют: керамзитопенобетон, керамзитогазобетон, керамзитобетон и т.д. [35].

Прочность поризованного бетона составляет 5...10 МПа, а плотность – $700...1400 \text{ кг/м}^3$. Прочность и плотность бетона зависят от его структуры. Расход керамзитового щебня или гравия не должен превышать $0,9 \text{ м}^3$ на 1 м^3 бетона. Расход цемента в керамзитобетоне для неармированных конструкций должен составлять не менее 120 кг/м^3 , для армированных – не менее 200 кг/м^3 .

Крупнопористый легкий бетон – это бетон на легких крупнопористых заполнителях (керамзитовый гравий, аглопорит и пр.). Такие бетоны обладают высокой жесткостью, поэтому существует необходимость дополнительного контроля расслаиваемости смеси [36].

Ячеистый бетон – это особо легкий бетон с большим количеством (до 85 об.%) воздушных ячеек размером до 1... 1,5 мм [37]. Пористость ячеистым бетонам придается: механическим путем за счет смешения теста с отдельно приготовленной пеной с получением при твердении пористого материала, называемого пенобетоном; химическим путем за счет введения в тесто специальных газообразующих добавок, последующей реакции газообразования (вспучивания) с получением после затвердения материала, называемого газобетоном. По плотности бе-

тоны делят на теплоизоляционные ($300...600 \text{ кг/м}^3$) и конструкционные ($600...1200 \text{ кг/м}^3$).

Легкие бетоны характеризуют следующими показателями качества: прочностью на сжатие, средней плотностью, морозостойкостью, водонепроницаемостью, теплопроводностью.

Основные параметры легких бетонов приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Параметры легких бетонов

Назначение бетона	Марка бетона		Класс бетона по прочности на сжатие для бетона на различных видах пористого заполнителя					
	по средней плотности	по морозостойкости	на вспученном вермикулите	на вспученном перлитовом щебне	на керамзитовом, шунгзитовом, зольном гравии	на щебне из пористых горных пород	на шлакопемзовом щебне или гравии	на термолитовом щебне или гравии
Теплоизоляционный	D200	не нормируется	B0,35-B0,75	-	-	-	-	-
	D300		B0,35-B2	B0,35-B0,75	-	-	-	-
	D400		B0,35-B2	B0,35-B2	B0,35-B2	-	-	-
	D500		B1-B2	B1-B2	B1-B2	-	-	-
Конструкционно-теплоизоляционный	D600	-	-	B2,5	B2,5	-	-	-
	D700	F25	-	B2,5; B3,5	B2,5; B3,5	-	-	-
	D800	F25	-	B2,5-B5	B2,5-B5	B2,5	-	-
	D900	F25-F50	-	B2,5-B7,5	B3,5-B7,5	B2,5; B3,5	-	-
	D1000	F25-F100	-	B5-B10	B3,5-B10	B2,5-B5	B2,5	-
	D1100	F25-F100	-	B5-B10	B3,5-B10	B2,5-B7,5	B2,5; B3,5	-
	D1200	F35-F100	-	B7,5; B10	B5-B10	B2,5-B10	B2,5-B5	-
	D1300	F35-F100	-	B10	B5-B10	B3,5-B10	B2,5-B7,5	-
	D1400	F35-F100	-	-	B5-B10	B5-B10	B3,5-B10	-
	D1500	F35-F100	-	-	-	B7,5; B10	B5-B10	-
	D1600	F75; F100	-	-	-	B10	B7,5; B10	-

Опыт крупнопанельного строительства подтвердил, что легкий бетон – наиболее подходящий материал для крупнопанельных наружных ограждающих конструкций. При таком строительстве применяют решения, обеспечивающие возведение пятиэтажных жилых домов и выше по бескаркасной конструкции.

Наиболее распространенная схема – с панельными перекрытиями, опирающимися по контуру на несущие перегородки – лучше всего отвечает конструктивным качествам легких бетонов на пористых заполнителях.

Ряд специалистов, и в их числе Н. Я. Спивак, М. З. Симонов, И. А. Иванов, Л. П. Курасова, неоднократно высказывали мнение о том, что в строительстве многоэтажных зданий или производственных одноэтажных сельскохозяйственных предельный класс керамзитобетона не должен превышать В 15 [38-40]. При выполнении этого условия достигается ряд позитивных результатов: экономия цемента, более высокая стабильность модуля упругости бетона во времени, снижение ползучести; повышение надежности бетонных конструкций в условиях эксплуатации.

Применение легких бетонов в качестве наружного и внутреннего слоев многослойной стеновой панели позволяет уменьшить вес зданий до 30 % и получить другие положительные эффекты. Легкие бетоны на пористых заполнителях [36, 37, 41] являются главным материалом ограждающих конструкций и особенно стеновых панелей и блоков. В климатических условиях России применение многослойных стеновых панелей с применением легкого бетона обеспечивает эффективное применение его свойств. Легкобетонные стеновые конструкции эффективны в условиях сейсмостойкого строительства или при наличии просадочных грунтов. Крупнопористый легкий бетон теплоизоляционного слоя крыши обладает положительным качеством – быстрой десорбцией в сложных условиях ее эксплуатации.

Использование легкого бетона внутри зданий не менее эффективно [36], чем в снаружи за счет снижения веса конструкций и существенного снижения расхода сырьевых материалов. Имеется положительный опыт применения комплексных крупнопанельных керамзитобетонных междуэтажных перекрытий с высокой заводской готовностью. Достижения в области производства искусственных пористых заполнителей – керамзита, гранулированного ячеистого стекла и др. позволяют создать эффективные крупнопанельные дома. При этом эффект от использования легкого бетона растет с ростом этажности.

Разработка технологии получения необходимо й структуры легких бетонов в зависимости от их назначения, применение факторов заводской технологии для получения требуемых характеристик конструкций – основные достижения науки в области легких бетонов.

Таким образом, учитывая специфические особенности легких бетонов (невысокая плотность и хорошие теплоизоляционные свойства), панели стен и покрытий из них наиболее целесообразно применять в отапливаемых жилых и промышленных зданиях. При этом стеновые панели из конструкционно-теплоизоляционных бетонов выполняют одновременно несущие и теплоизоляционные функции, не требуя для изготовления и монтажа сложного оборудования и большого количества рабочих. Применение легких бетонов для стеновых панелей зданий и сооружений позволит снизить вес элементов по сравнению с железобетонными и за счет этого сократить транспортно-монтажные расходы.

1.4 Классификация стеновых панелей

В связи с развитием новых технологий строительства быстровозводимых жилых и производственных зданий традиционные материалы не обеспечивают необходимого уровня термического сопротивления в однослойной стене. Вследствие этого необходимо дополнительная теплоизоляция ограждающих конструкций с помощью многослойных ограждающих конструкций, содержащих эффективный теплоизоляционный материал [41].

Стеновые панели подразделяются по следующим признакам:

- по местоположению – внутренние и наружные;
- по материалам – из ячеистых бетонов, керамзитобетона, и др. материалов;
- по характеру статической работы – несущие, самонесущие, навесные;
- по конструктивному устройству – однослойные, двухслойные, трёхслойные, многослойные.

В современном российском крупнопанельном домостроении распространение получили трехслойные стеновые панели для жилых и общественных зданий с

эффективным утеплителем, выпускаемые домостроительными комбинатами по ГОСТ 31310-2005.

В жилищном строительстве наиболее распространены несущие и самонесущие панели. По конструктивному решению наиболее распространены следующие виды панелей:

- однослойные из лёгких или ячеистых бетонов с армированием (рисунок 1.2, а);
- двухслойные, из наружного слоя из легких бетонов и внутреннего несущего – из тяжелого бетона;
- трёхслойные, из двух внешних (наружного и внутреннего) слоев из тяжёлого бетона и внутреннего слоя из теплоизоляционного материала (рисунок 1.2, б);
- многослойные, изготавливаемые из нескольких слоёв различных материалов.

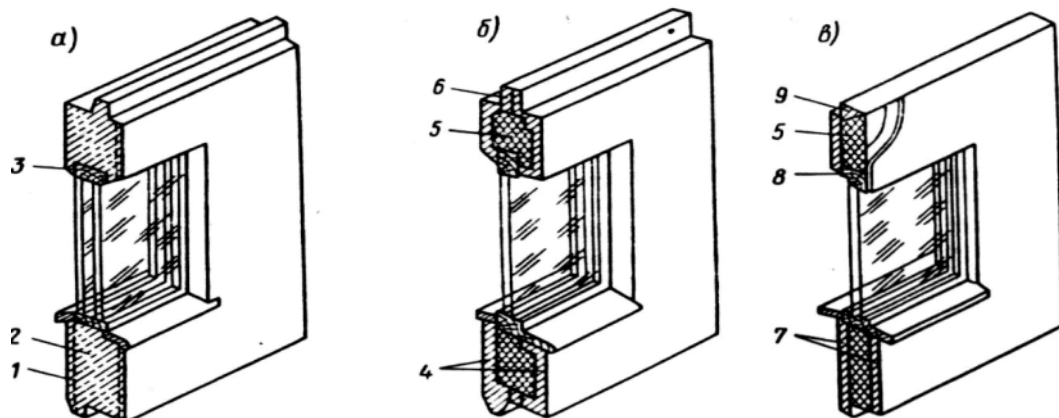


Рисунок 1.2 – Конструктивное устройство панелей

а – однослойные; б – трёхслойные; в – многослойные;

1 – фактурный отделочный слой; 2 – лёгкий или ячеистый бетон; 3 – арматурный каркас; 4 – железобетон; 5 – утеплитель; 6 – керамзитобетонное ребро; 7 – асбестоцементные листы; 8 – пароизоляция; 9 – асбестоцементные бруски.

Общий вид наружных стеновых панелей, их классификация, конструктивные решения и основные элементы приведены на рисунке 1.3. Толщина наружных стеновых панелей определяется расчётами.

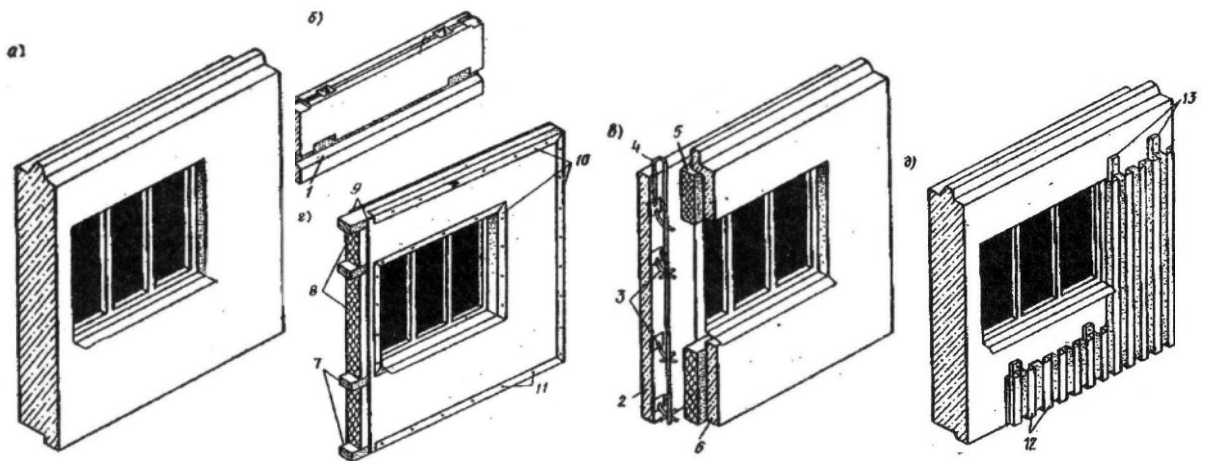


Рисунок 1.3 – Общий вид панелей наружных стен

а – однослойная; б – то же, поясная; в – трёхслойная; г – слоистая; д – то же, с экраном из профилированного листа; 1 – паз для плит междуэтажного перекрытия; 2 – внутренний несущий железобетонный слой; 3 – гибкие связи; 4 – монтажная петля; 5 – утеплитель; 6 – наружный декоративный отделочный слой; 7 – деревянный каркас; 8 – утеплитель; 9 – асбестоцементные листы; 10 – алюминиевые профили; 11 – шурупы; 12 – стальной профилированный лист; 13 – деревянные рейки

Наружные панели изготавливают с декоративно обработанными фасадами, Обработка производится с помощью следующих методов: окраска акремнийорганической эмалью, создающей влаго-, морозо- и светостойкое покрытие; отделка каменной крошкой; отделка керамической плиткой и т.д. Заводской метод изготовления предусматривает закладку оконных и дверных проемов. Внутренняя поверхность панелей подготавливается для внутренней отделки краской или обоями.

Трёхслойные панели классифицируют по следующим признакам: назначение; конструктивное решение; статическая схема работы; тип соединительных связей.

По назначению панели делятся на панели: цоколя; стен надземных этажей; чердака. Конструктивные решения панелей определяются принятыми при проектировании параметрами, отражающими архитектурные, технологические и конструктивные особенности панелей. По статической схеме работы панели делятся на ненесущие и несущие (поэтажно несущие и самонесущие). По типу соединительных связей атели делятся на: с гибкими связями из коррозионностойкого материала; с жесткими железобетонными связями (перемычками или ребрами).

Длину и высоту панели указывают в дециметрах (округляя до целого числа), а толщину – в сантиметрах. Во второй группе указывают, при необходимости, вид бетона и обозначения конструктивных особенностей панели. Пример условного обозначения (марки) трехслойная наружная цокольная ненесущая панель с гибкими связями длиной 4000 мм, высотой 3300 мм и толщиной 400 мм из тяжелого бетона: 3НЦГ40.33.40.

Номинальную толщину наружного и внутреннего бетонных слоев панели следует устанавливать статическим расчетом с учетом заданной несущей способности, жесткости и трещиностойкости панелей, перемычек (шпонок), требований к узлам сопряжения панелей между собой и другими конструкциями здания, к узлам закрепления в панелях окон и дверей. С учетом указанных факторов номинальные толщины бетонных слоев следует принимать не менее: внутреннего слоя ненесущих панелей – 80 мм; внутреннего слоя несущих панелей – 120 мм; внутреннего слоя поэтажно несущих панелей – 80 мм при тяжелом бетоне и 100 мм – при легком бетоне; наружного слоя панелей – 65 мм при тяжелом бетоне и 80 мм – при легком бетоне [41-46]. Перечисленные выше номинальные толщины слоев включают номинальную толщину бетона или защитно-декоративного раствора и внутреннего отделочного слоев.

Отделку внешних (фасадных) поверхностей многослойных панелей из легкого и тяжелого бетона принимают следующих типов: облицовка плитками, стеклянными, из природного камня или декоративного бетона; отделка слоем раствора или бетона с рельефной или с ровной гладкой поверхностью; отделка декоративным бетоном с обнаженным заполнителем; отделка керамической глазурью; отделка слоем цветного бетона или раствора; присыпка или втапливание декоративного щебня или другого декоративного материала; отделка мелкозернистыми материалами на клеящей основе; окраска атмосферостойкими красками.

Номинальную толщину слоя раствора или бетона в наружном защитно-декоративном слое однослойных панелей из легкого бетона и слоистых панелей с наружным слоем из легкого бетона или из тяжелого бетона при отсутствии облицовки следует принимать не менее: 15 мм – в сплошных трехслойных панелях;

20 мм – в однослойных панелях (кроме панелей для цокольного этажа и технического подполья) и в сплошных двухслойных панелях с наружным теплоизоляционным слоем из легкого бетона плотной структуры; 30 мм – в однослойных панелях для цокольного этажа и технического подполья и в сплошных двухслойных панелях с наружным теплоизоляционным слоем из легкого бетона крупнопористой структуры.

Учитывая указанные особенности, рассмотрим основные направления исследований и разработок в области синтеза многослойных строительных панелей на основе современных материалов.

1.5 Направления исследований в области разработки технологий многослойных строительных панелей

Мировые исследования в области разработки многослойных строительных панелей, крайне немногочисленны. При этом подавляющее большинство исследований посвящено теплотехническим расчетам панелей из стандартных типов бетона. Ведущим коллективом в данной области является коллектив К. Динчер (Турция, университет Сельчука) [47-49]. Также встречаются одиночные несистематические исследования других коллективов [50-52].

Исследования по разработке технологии многослойных строительных панелей из новых материалов посвящены, в основном, использованию комбинаций легких и тяжелых бетонов с различными заполнителями. Над данным направлением наиболее активно работает коллектив Ю. Валивонас (Литва, Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса) [53-55].

В то же время, исследования по разработке и применению легких бетонов с пеностекольным заполнителем в настоящее время находятся на начальном этапе и не рассматривают особенностей их производства и применения [56-58].

В России в области получения многослойных панелей, исследования их структуры и эксплуатационных свойств активно работают научные коллективы

ДГТУ, НИТУ «МИСиС», ВСГУТУ, ЮРГПУ(НПИ). В указанной области у перечисленных научных групп имеются следующие исследования.

Коллектив ученых Академии строительства и архитектуры Донского государственного технического университета под руководством д.т.н. Маиляна Дмитрия Рафаэловича, д.т.н. Котляра Владимира Дмитриевича занимается исследованиями в области синтеза пористых силикатных заполнителей, а также технологии многослойных панелей на основе легких армированных керамзитобетонов [59-65].

Под руководством д.т.н. Дамдиновой Даримы Ракшаевны на базе Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления ведется разработка многослойных стеновых панелей по канадской технологии с использованием ориентированно-стружечных плит в качестве внешних слоев и пено-стекла в качестве внутреннего теплоизоляционного слоя [66-68].

Сотрудники Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» под руководством д.т.н. Ефимова Виктора Ивановича занимаются разработкой легковесного заполнителя на основе отходов углеобогащения для получения легких бетонов [69-70].

В ЮРГПУ(НПИ) под руководством д.т.н. Яценко Елены Альфредовны ведутся разработки ресурсосберегающей технологии производства многослойных теплоизоляционных строительных панелей и их компонентов на основе ячеистого стекла с применением различных типов вторичного сырья [71-74]. Проведенные исследования позволили установить особенности состава и структуры сырьевых материалов, а также принципиальную возможность производства строительных материалов на их основе.

Следует также отметить, что во всех указанных выше исследованиях в качестве компонентов многослойных панелей рассматривались стандартные изделия, в первую очередь, армированный железобетон и полимерный утеплитель. Не учитывались также экономические, экологические и противопожарные требования к получаемым изделиям.

1.6 Выводы

1. Применение тепловой изоляции в строительстве позволяет ощутимо снизить толщину и массу ограждающих конструкций (стен, кровли), уменьшить расход основных строительных материалов и, соответственно, понизить общую стоимость конструкции, уменьшить расход топлива в эксплуатационный период и т.д. Кроме того, новые требования к экологической и пожарной безопасности, а также долговечности обуславливают необходимость разработки новых видов теплоизоляционных материалов, соответствующих классу горючести НГ, не подверженных влиянию грибков, бактерий, грызунов, а также имеющих регламентированный срок службы не менее 50 лет. Среди всего многообразия современных теплоизоляционных материалов можно выделить две наиболее распространенные группы: вспененные органические полимеры и волокнистые неорганические материалы. Основным недостатком обеих групп является малый срок их службы, не превышающий 20 лет.

2. По совокупности характеристик всем выше перечисленным требованиям соответствует пеностекло и изделия на его основе. За счет стеклообразной структуры пеностекло обладает уникальной совокупностью свойств (долговечность, виброустойчивость, влагонепроницаемость, атмосферная и химическая стойкость и пр.). Но широкому распространению пеностекла препятствует его относительно высокая цена, сложность транспортировки, необходимость дополнительных клеящих агентов для монтажа на объекте. Для снижения стоимости пеностекла необходимо обеспечить расширение сырьевой базы, особенно за счет привлечения недорогого и широко распространенного вторичного и местного сырья.

3. На основе пеностекла возможно получение широкого спектра изделий: плит, щебня, гранул и пр. В то же время, на основе пеностекольных изделий за счет их химической инертности возможно получение ряда композиционных материалов, важнейшими из которых являются легкие бетоны. Они представляют для российского строительства значительный практический интерес за счет низкой плотности, обеспечивающей хорошие теплозащитные свойства, значительное

упрощение их транспортирования и монтажа и т.д. Традиционно легкие бетоны содержат в качестве пористого заполнителя керамзит, который, как правило, имеет плотность более 600 кг/м^3 при современных требованиях, предполагающих использование заполнителей плотностью менее 300 кг/м^3 . Также производство керамзита, как и любых материалов на основе глинистого сырья, является сезонно ориентированным и требует географической близости месторождения. Производство гранул из пеностекла лишено всех этих недостатков. Плиты из легкого бетона на пористых заполнителях находят широкое применение в качестве наружного и внутреннего слоев многослойной стеновой панели.

4. В связи с развитием новых технологий строительства малоэтажных быстровозводимых жилых и производственных зданий необходима разработка технологии строительства с помощью многослойных ограждающих конструкций, где в качестве утеплителя будет применен эффективный теплоизоляционный материал. Установлено, что в климатических условиях России весьма эффективным будет использование многослойных стеновых панелей с применением легкого бетона на пористом заполнителе в качестве внешних слоев и плиты из пеностекла в качестве внутреннего теплоизоляционного слоя.

1.7 Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка составов и технологии пеностекольных материалов с применением вторичного сырья для создания изделий для внутренней и наружной теплоизоляции.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие **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.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Согласно сформулированным целям и задачам, была разработана структурно-логическая схема проведения исследований диссертационной работы, представленная на рисунке 2.1. Методика синтеза лабораторных образцов представлена ниже. Физико-механические свойства полученных материалов исследованы с помощью стандартных методик и испытаний.

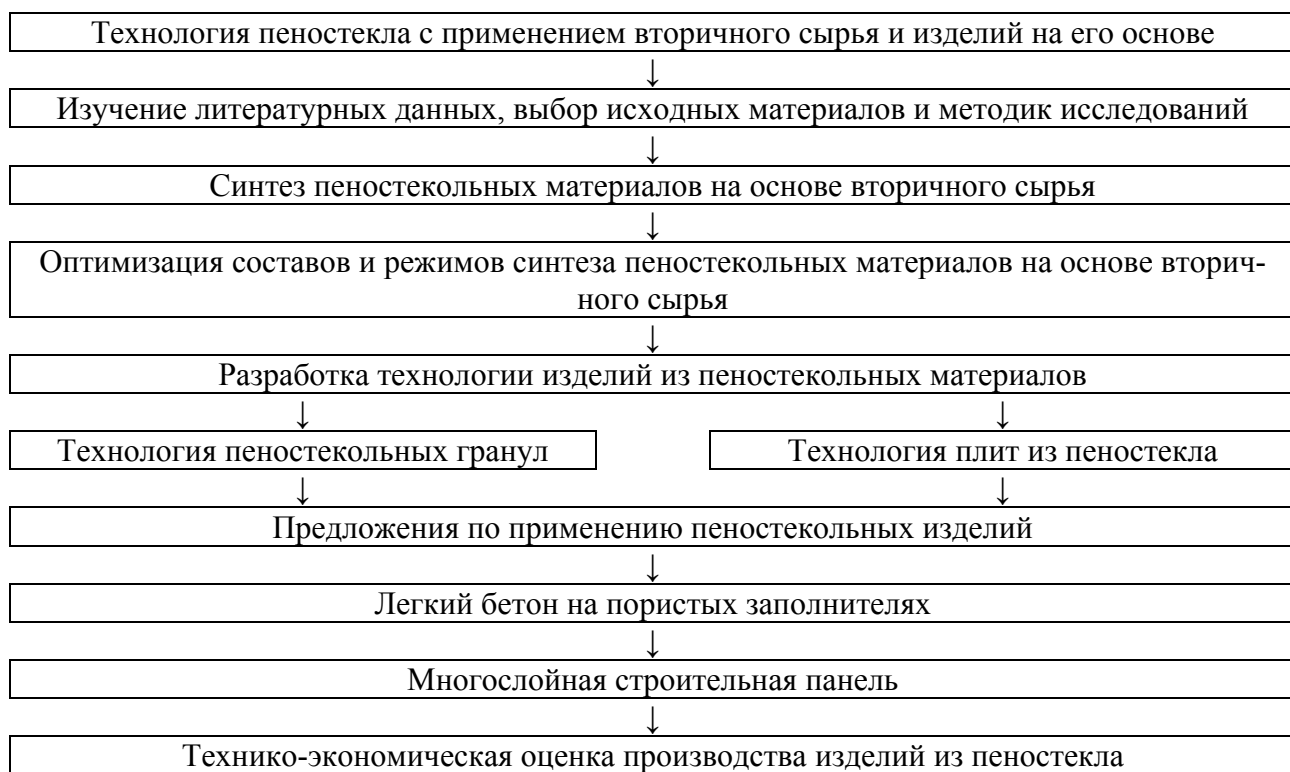


Рисунок 2.1 – Структурно-логическая схема исследований

2.1 Характеристика сырьевых материалов

Материалы, применяемые для получения многослойных строительных панелей, должны соответствовать требованиям государственных стандартов или технических условий, действующей нормативной документации:

- Стеклобой – ГОСТ Р 52022-2003 «Тара стеклянная для пищевой и парфюмерно-косметической продукции. Марки стекла», «ГОСТ Р 54170–2010. Стекло листовое бесцветное. Технические условия»;
- Вода техническая – ГОСТ 23732-79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия»;
- Стекло натриевое жидкое марка Б – ГОСТ 13078-81 «Стекло натриевое жидкое. Технические условия»;
- Глицерин чистый – ГОСТ 6259-75 «Реактивы. Глицерин. Технические условия»;
- Шлаковый отход – ГОСТ 26644-85 «Щебень и песок из шлаков тепловых электростанций для бетона. Технические условия»;
- Портландцемент ПЦ 500-Д0 – ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия»;
- Песок кварцевый полифракционный – ГОСТ 6139-2003 «Песок для испытаний цемента. Технические условия».

Химический состав сырьевых материалов приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав сырьевых материалов

Материал	Содержание компонентов, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	ппп
Стеклобой ЗТ-1 (тарное зеленое стекло)	71,8	2,2	0,8	7,8	3,0	14,0	-	0,3	-
Стеклобой БТ-1 (тарное прозрачное (белое) стекло)	72,0	2,4	0,1	9,0	2,0	14,3	0,1	0,2	-
Стеклобой М4 (листовое прозрачное стекло)	71,8	2,0	0,1	6,7	4,1	14,8	-	0,5	-
Шлаковый отход Новочеркасской ГРЭС	57,1	24,7	10,2	1,9	1,2	0,9	3,6	-	0,4
Жидкое стекло марка Б	29,4	0,1	0,2	0,1	-	10,1	-	-	60,1
Портландцемент ПЦ 500	22,6	4,6	3,4	65,7	1,3	-	-	2,4	-
Песок кварцевый	98,5	0,6	0,1	0,1	-	-	-	-	0,7

2.2 Методики испытаний и физико-химических исследований

Исследования по разработке технологии пеностекла и изделий из него проводились согласно нормативной документации на теплоизоляционные материалы.

Помол сырья осуществлялся в барабанной мельнице. Сырьем являлись стеклобой, шлаковый отход Новочеркасской ГРЭС, глицерин, вода, жидкое стекло. Термическая обработка проводилась в муфельной печи согласно выбранным температурным режимам. Для этого образцы получали по порошковому способу.

Порошковый способ. При нагревании тонкоизмельченного порошка стекла и порообразователя (шихты) до температуры 800-950 °С газы, формирующиеся при разложении порообразователя, вспенивают размягченную стекломассу. Дальнейшее резкое охлаждение позволяет зафиксировать вспененную структуру за счет резкого твердения стекла. Полученный материал в дальнейшем подвергается отжигу.

Процесс получения пеностекла включает ряд этапов:

- подготовка сырья;
- смешение сырья и получение шихты;
- температурная обработка;
- механическая обработка (при необходимости).

Для синтеза пеностекла применяют смесь шлакового отхода Новочеркасской ГРЭС и стеклобоя. Перед помолом стекло и шлак дробят до размера частиц 1-2 мм. Шихту составляют путем тщательного смешивания всех сырьевых компонентов до однородной массы [75]. Оптимальный размер зерен порошка стекла и шлакового отхода менее 160 мкм. Наилучшее перемешивание достигается смешиванием всех сырьевых материалов в мельнице.

Полученную смесь загружают в формы и уплотняют при постоянном давлении, после чего образцы извлекают и помещают в зону термической обработки в печь. Там образцы устанавливают в зоне постоянных температур. Температурную обработку проводят согласно температурно-временному режиму, приведенному на рисунке 2.2.

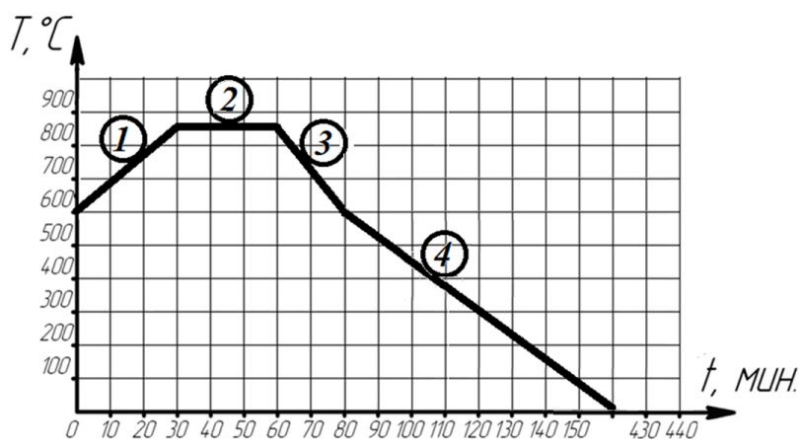


Рисунок 2.2 – Температурно-временной режим синтеза лабораторных образцов пеностекла:

1 – нагрев; 2 – вспенивание; 3 – резкое охлаждение (фиксация структуры); 4 – охлаждение (отжиг)

Приведенные на графике параметры могут быть скорректированы в зависимости от соотношения сырьевых материалов и размера образцов. Так, температура обжига может измениться в пределах 775-900 °C, время – 5-50 мин. После стадии вспенивания идет резкое охлаждение для фиксации пористой структуры. Далее предусмотрена стадия снятия остаточных напряжений и отжига, происходящая при самопроизвольном охлаждении печи в течение 4-5 ч. После извлечения образцов проводят их опиловку для придания правильных размеров, осмотр образцов для установления однородности структуры и др.

Возможность применения шлакового отхода Новочеркасской ГРЭС объясняется тем, что шлак по составу и структуре является силикатным стеклом, что видно из таблицы 2.1 и рисунка 2.3. Стеклообразная структура шлака обусловлена особенностями получения шлака: при сгорании угля негорючая минеральная часть в виде расплава стекает под камеру сгорания, где резко охлаждается с образованием стекловидного материала. Кроме того, по фракционному составу шлак представлен частицами остроугольной формы, что способствует повышению реакционной способности. По результатам спектрометрических исследований эффективная удельная активность природных радионуклидов Ra-226, Th-232, K-40 в шлаковом отходе составляет 230 ± 28 Бк/кг, что не превышает 370 Бк/кг. Исследуемая продукция относится к 1-му классу строительных материалов и может

быть использована для всех видов строительства, в том числе в жилых и общественных зданиях.

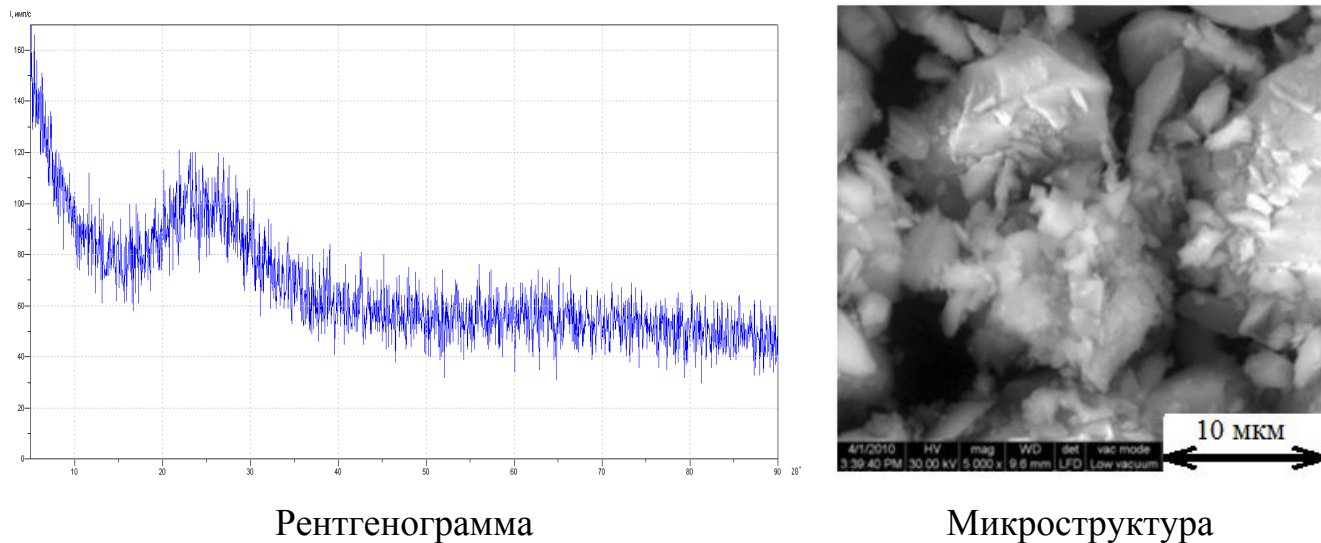


Рисунок 2.3 – Фазовый и фракционный состав шлакового отхода
Новочеркасской ГРЭС

Производство легкого бетона и многослойных строительных панелей осуществлялось согласно технологии ЗАО «Комбинат крупнопанельного домостроения» (г. Ростов-на-Дону), включающей следующие стадии: подготовка форм (очистка, смазка и сборка); укладка арматуры и утеплителя; укладка и распределение и уплотнение бетонной смеси; тепловлажностная обработка; обработка лицевой поверхности; извлечение изделий.

Физико-механические свойства образцов определяли согласно стандартным и специальным методикам [76-90].

1) Для пеностекольных гранул:

- по ГОСТ 9758-2012: зерновой состав; насыпная плотность; влажность; водопоглощение; содержание расколотых зерен; прочность при сдавливании в цилиндре; морозостойкость; потеря массы при определении стойкости против силикатного распада; потеря массы при кипячении; содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений; потеря массы при прокаливании; теплопроводность;

- по ГОСТ 30108-94 значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов;

2) Для плит из пеностекла:

- по ГОСТ EN 822-2011 и ГОСТ EN 823-2011 размер плит;
- по ГОСТ EN 1602-2011 плотность;
- по ГОСТ 826-2011 предел прочности при сжатии,
- по ГОСТ EN 12089-2011 предел прочности при изгибе;
- по ГОСТ 25380-2014 коэффициент теплопроводности;
- по ГОСТ EN 12087-2011 водопоглощение по объему;
- по ГОСТ EN 12086-2011 паропроницаемость;
- по ГОСТ EN 12091-2011 морозостойкость;
- по ГОСТ 30244-94 группа горючести;
- по ГОСТ 30108-94 значение суммарной удельной эффективной активности

естественных радионуклидов.

3) Для легкого бетона:

- по ГОСТ 10180-2012 прочность на сжатие;
- по ГОСТ 12730.1-78 средняя плотность;
- по ГОСТ 7076-99 коэффициент теплопроводности;

4) Для многослойных строительных панелей:

- по ГОСТ 7076-99 коэффициент теплопроводности.

3 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ПЕНОСТЕКЛА

3.1 Выбор оптимального соотношения компонентов порообразующей смеси для синтеза пеностекла

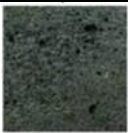
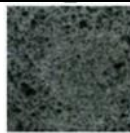
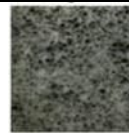
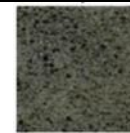


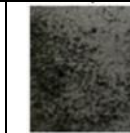
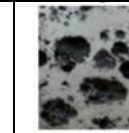
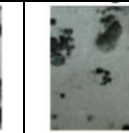

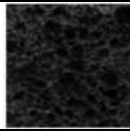




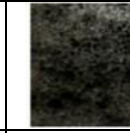

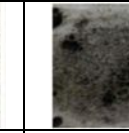
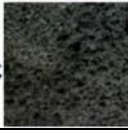







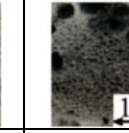
Для выбора оптимального соотношения порообразующих добавок в смеси «жидкое стекло – глицерин» (в дальнейшем – «порообразующая смесь») за основу был взят состав, мас. %: стеклобой БТ-1 – 90; порообразующая смесь – 10. Были разработаны составы масс, в которых варьировалось количество порообразующих компонентов (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Шихтовые составы пеностекла с различным соотношением компонентов порообразующей смеси

	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

Отформованные образцы каждого состава обжигали согласно рисунку 2.2 при температурах вспенивания 800, 825, 850 °С и времени вспенивания 10 минут. Далее были определены плотность и пористость, а также исследована структура синтезированных образцов. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Плотность исследуемых составов пеностекла в зависимости от температуры вспенивания

Параметр	Соотношение «жидкое стекло : глицерин», мас. % (№ состава)								
	9:1 (1.1)	8:2 (1.2)	7:3 (1.3)	6:4 (1.4)	5:5 (1.5)	4:6 (1.6)	3:7 (1.7)	2:8 (1.8)	1:9 (1.9)
Температура вспенивания 800 °С									
Внутренняя структура									
Плотность, кг/м ³	198,92	251,49	245,85	227,19	261,14	326,64	335,98	393,94	526,4
Пористость, %	91,88	89,74	89,97	90,73	89,34	86,67	86,29	83,92	78,51
Температура вспенивания 825 °С									
Внутренняя структура									
Плотность, кг/м ³	195,59	233,94	206,28	196,54	204,75	231,13	222,56	286,71	338,73
Пористость, %	92,02	90,45	91,58	91,98	91,64	90,57	90,92	88,30	86,17
Температура вспенивания 850 °С									
Внутренняя структура									
Плотность, кг/м ³	208,33	180,84	174,8	146,71	149,21	185,39	188,2	196,57	280,13
Пористость, %	91,50	92,62	92,87	94,01	93,91	92,43	92,32	91,98	88,57

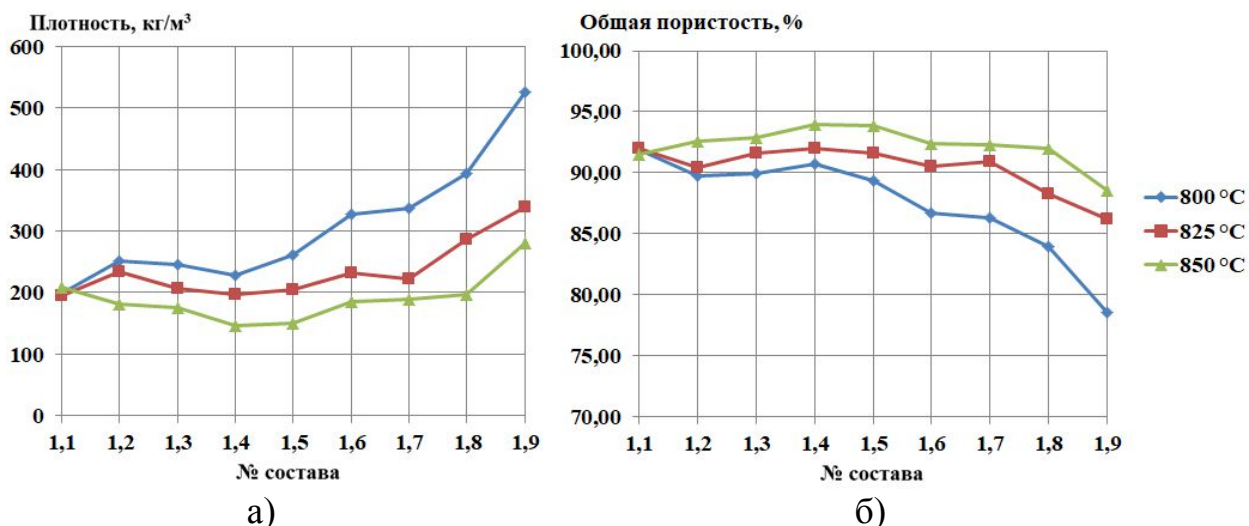


Рисунок 3.1 – Графики зависимости свойств пеностекла от состава порообразующей смеси: а) плотность, кг/м³, б) пористость, %

Следует отметить, что параметр общей пористости напрямую связан с величиной плотности, что видно из таблицы 3.2 и рисунка 3.1. Однако, как видно из таблицы 3.2, размер и распределение пор при близких показателях плотности и пористости может существенно отличаться. Вследствие этого, а также учитывая, что все служебные свойства пеностекла (пористость, прочность, теплопроводность, водопоглощение) определяются его внутренней структурой, толщиной перемычек и размером пор, далее для описания образцов применялись две характеристики: плотность и характер пористой структуры [91-93].

При этом очевидна следующая закономерность: со смещением соотношения «жидкое стекло : глицерин» в сторону глицерина наблюдается, во-первых, уменьшение равномерности пористой структуры за счет образования крупных дефектных пор, и, во-вторых, изменение цвета материала с равномерно темного на светлый с темными порами. Для объяснения этих эффектов необходимо рассмотреть роль каждого компонента шихты в процессе вспенивания. Так, стеклопорошок является основой будущего материала. При температуре вспенивания стекло находится в высоковязком состоянии, и процесс взаимодействия между отдельными частицами стеклопорошка протекает с образованием силикатного каркаса, отвечающего за прочностные характеристики материала. Глицерин выступает в роли собственно порообразователя, при разложении которого в окислительной атмосфере электрической печи образуется спектр соединений от углекис-

лого газа до чистого углерода, что создает избыточное давление и дает возможность вспенивания по трем направлениям, а также обуславливает черную окраску пеностекла частицами углерода.

Во избежание преждевременного выгорания углерода в состав шихты необходимо вводить обволакивающий материал – натриевое жидкое стекло. Роль этого компонента – обеспечить сохранность углеродсодержащего вещества вокруг каждой частицы стекла до определенного температурного интервала. Этим объясняется изменение цвета образцов, т.к. при малом количестве жидкого стекла повышается интенсивность разложения глицерина, а продукты разложения остаются в материале лишь в небольших областях, где и формируются поры. Кроме того, за счет близости химического состава жидкое стекло способствует более полному контакту между частицами стеклопорошка и ускоряет образование силикатного каркаса.

Исходя из полученных данных, можно сделать выводы о влиянии компонентов порообразующей смеси на вспенивание образцов. Оптимальным составом порообразующей смеси был выбран 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 (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Шихтовые составы пеностекла с различным соотношением порообразующей смеси и воды

	Содержание компонентов пеностекла, мас. %, в составе, №				
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Стеклобой БТ-1	90				
Порообразующая смесь состав 1.4	9	7	5	3	1
Вода	1	3	5	7	9

Отформованные образцы обжигали согласно рисунку 2.2 при температурах стадии 2 (вспенивание) 800, 825, 850 °С и времени вспенивания 10 минут. Внутренняя структура и плотность полученных образцов представлена в таблицах 3.4-3.5 и на рисунке 3.2.

Таблица 3.4 – Плотность исследуемых составов пеностекла в зависимости от температуры вспенивания

Параметр	Соотношение «порообразующая смесь : вода», мас. % (№ состава)				
	9:1 (2.1)	7:3 (2.2)	5:5 (2.3)	3:7 (2.4)	1:9 (2.5)
Температура вспенивания 800 °С					
Внутренняя структура					
Плотность, кг/м ³	217,91	230,72	316,77	321,76	634,43
Температура вспенивания 825 °С					
Внутренняя структура					
Плотность, кг/м ³	181,27	175,81	213,86	229,15	371,59
Температура вспенивания 850 °С					
Внутренняя структура					
Плотность, кг/м ³	149,60	149,89	185,81	187,58	330,34

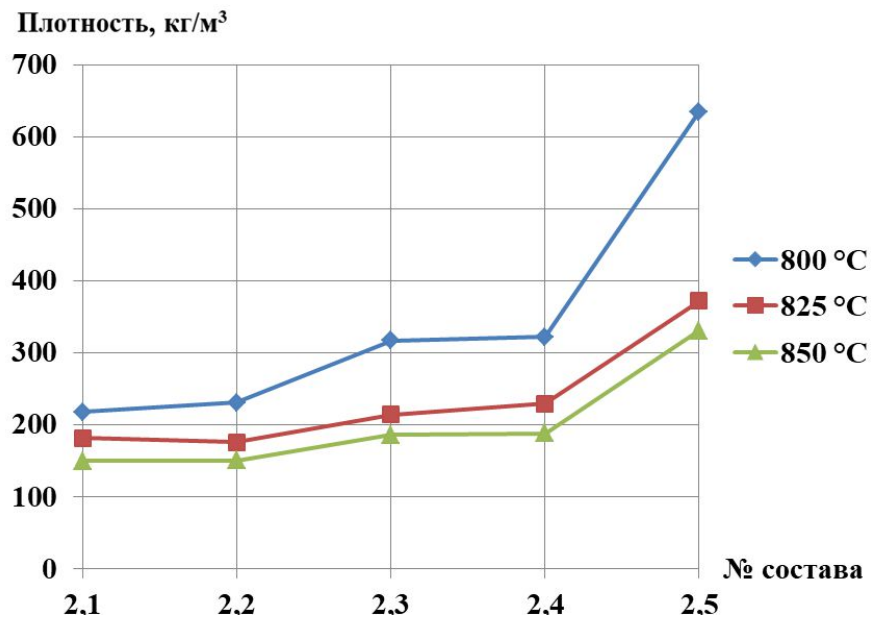


Рисунок 3.2 – Зависимость плотности пеностекла от содержания воды в порообразующей смеси

Таблица 3.5 – Зависимость структуры пеностекла от наличия воды в порообразующей смеси

	800 °C	825 °C	850 °C
Состав 1.4			
Состав 2.2			

Из таблицы 3.4 и рисунка 3.2 видно, что введение даже небольшого количества воды в порообразующую смесь приводит к значительному увеличению однородности пористой структуры (таблица 3.5). Это связано с двумя факторами. Во-

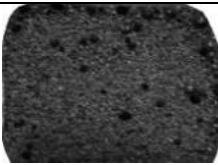


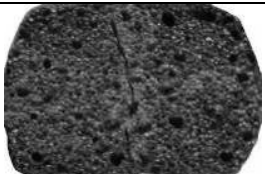
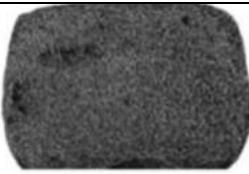

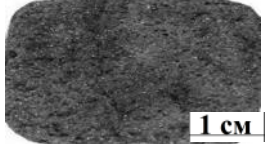
первых, введение воды приводит к уменьшению вязкости смеси и ее лучшему распределению в шихте [94]. Во-вторых, при температуре около 800 °С избыток воды в присутствии углерода приводит к образованию так называемого водяного газа ($H_2 + CO$), который создает дополнительный объем газов, вспенивающих стекло. Побочным продуктом этой реакции является сероводород, который не только отчетливо ощущается по запаху при нарушении целостности пор, но также может быть обнаружен химически. Изменение цвета образцов в серии составов 2.1–2.5 объясняется уменьшением количества глицерина и соответствующим уменьшением остаточного углерода на поверхности пор. На основе данных, приведенных в таблице 3.4, в качестве оптимального выбран состав 2.2, соответствующий соотношению «порообразующая смесь : вода» = 7 : 3.

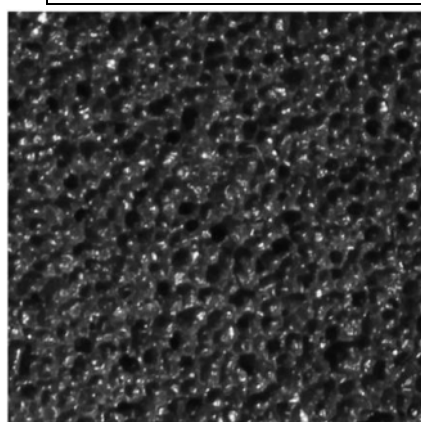
Таким образом, был установлен оптимальный состав пеностеклянной шихты, мас. %: стеклобой БТ-1 – 90; жидкое стекло – 4; глицерин – 3; вода – 3. Температурно-временной режим синтеза: время вспенивания – 10 минут, температура вспенивания – 825 °С. Используя данные технологические параметры, можно получить однородную пористую структуру с регулируемым размером пор в диапазоне 50–150 мкм.

3.2 Влияние температуры и времени вспенивания на структуру и плотность пеностекла

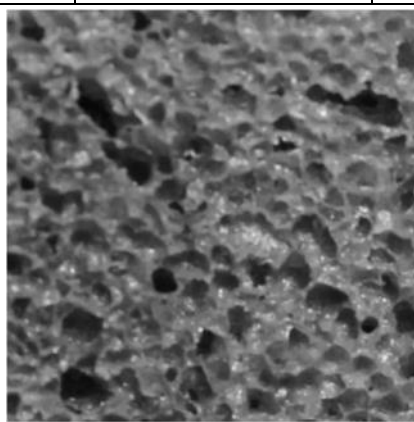
Для выбора оптимального времени вспенивания отформованные образцы состава 2.2 обжигали согласно рисунку 2.2 при температуре вспенивания 825 °С и времени вспенивания 5, 10, 15, 20, 30 и 60 минут. Далее была определена плотность, а также исследована пористая структура синтезированных образцов. Результаты представлены в таблице 3.6 и на рисунке 3.3.

Таблица 3.6 – Зависимость плотности пеностекла от времени вспенивания

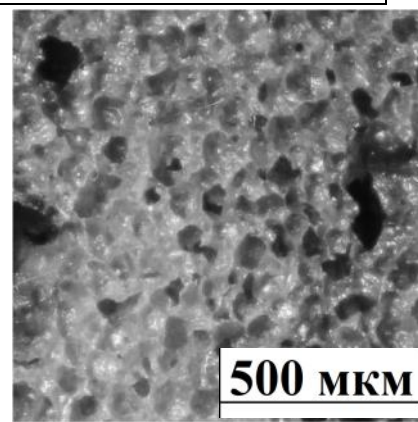
Время вспенивания, мин	Плотность, кг/м ³	Внутренняя структура
5	187,87	
10	175,81	
15	161,82	
20	166,39	
30	170,65	
40	177,27	
60	181,94	



10 минут



30 минут



60 минут

Рисунок 3.3 – Микроструктура образцов при различном времени выдержки

Из таблицы и рисунка видно, что при времени выдержки 5 минут наряду с крупными порами наблюдается мелкопористая структура, которая не обеспечивает оптимальных технических параметров разрабатываемого пеностекла. Однако структура образцов, время вспенивания которых превышает 10 минут, также не является равномерной, поры приобретают неправильную форму, появляются дефекты в виде единичных пор, превышающих размеры стандартных в десятки раз, чем и объясняется снижение плотности [95]. 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 выбора оптимального температурного интервала вспенивания исследуемого пеностекла образцы состава 2.2 обжигали согласно рисунку 2.2 при температурах 655; 670; 700; 715; 730; 745; 760; 775; 790; 805; 820; 835; 850; 865; 880 °C без выдержки. Далее была определена плотность при каждой температуре, а также исследована пористая структура синтезированных образцов. Результаты представлены на рисунке 3.4 и в таблице 3.7.

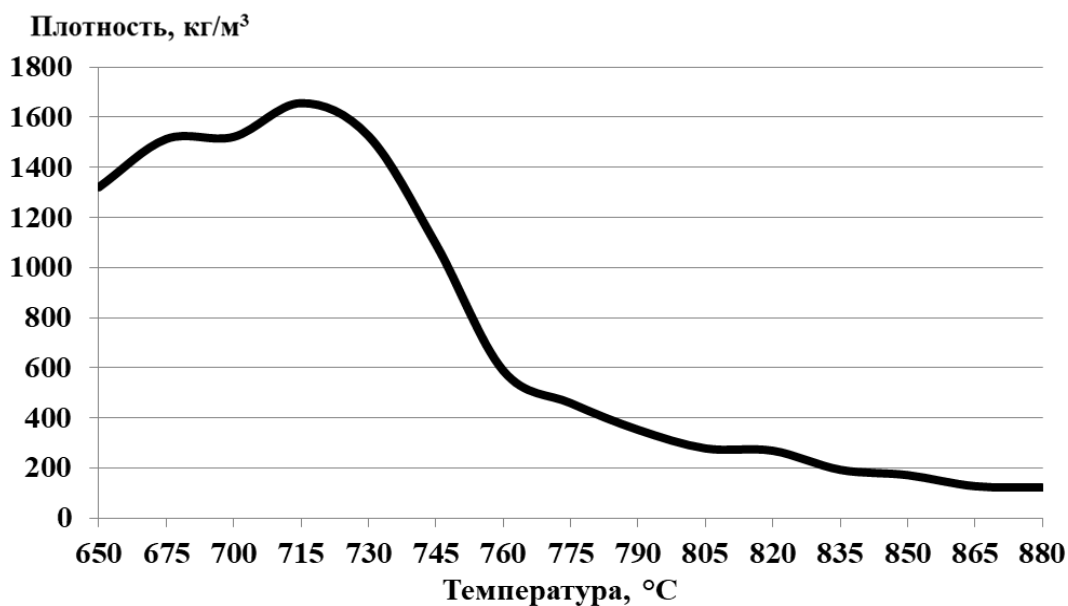









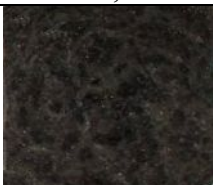




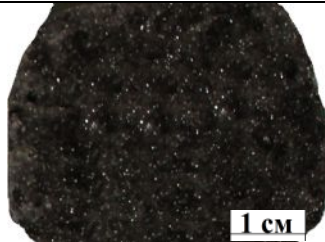


Рисунок 3.4 – Зависимость плотности пеностекла от температуры вспенивания

Таблица 3.7 – Плотность и структура исследуемых составов пеностекла в зависимости от температуры вспенивания

Температура вспенивания, °С	650	675	700	715	730
Плотность; кг/м ³	1320,99	1513,29	1521,72	1656,51	1525,402
Внутренняя структура					
Температура вспенивания, °С	745	760	775	790	805
Плотность; кг/м ³	1093,38	588,10	458,72	352,28	277,89
Внутренняя структура					
Температура вспенивания, °С	820	835	850	865	880
Плотность; кг/м ³	268,91	192,76	171,52	127,15	121,91
Внутренняя структура					

Согласно рисунку 2.2, загрузка образцов в печь происходит при температуре 600 °С. Следовательно, низкотемпературные процессы, такие как выгорание глицерина (≈ 260 °С) и испарение воды (100 °С) начинают происходить одновременно, кроме этого начинается спекание шихты. Поэтому при температуре выдержки 650 °С образец представляет собой не полностью спекшуюся шихту. В температурном промежутке 675-715 °С у образцов наблюдается постепенное увеличение плотности, что свидетельствует о сближении частиц при спекании. При температуре 730 °С наблюдается небольшое уменьшение плотности, что объясняется появлением первых газовых пор в структуре материала. Эту температуру можно считать температурой начала вспенивания.







При дальнейшем нагревании образца от 730 до 790 °С происходит резкое уменьшение плотности за счет увеличения количества газовых пор, однако активное порообразование начинается при температурах выше 800 °С. Это объясняется тем, что при температуре 800 °С стекломасса достигает вязкости, достаточной для того, чтобы давление газа и пара, образовавшихся при выгорании глицерина и испарении воды образовало пору. При температурах выше 850 °С структура образца становится менее упорядоченной. Поры деформируются, появляются укрупненные поры, образец становится хрупким. Все это негативно сказывается на эксплуатационно-технических свойствах разрабатываемого пеностекла. Поэтому, оптимальным температурным интервалом для образования пористой структуры разрабатываемого материала был выбран интервал 800-850 °С.

3.3 Влияние фракционного состава на структуру пеностекла

Для изучения влияния фракционного состава шихты на структуру и плотность разрабатываемого пеностекла состава 2.2 стекlobой был размолот и с помощью сит разделен по дисперсности от более крупной фракции к более мелкой при помощи сит согласно ГОСТ Р 51568-99. Отформованные образцы каждого состава обжигали согласно рисунку 2.2 при температуре вспенивания 825 °С и

времени вспенивания 10 минут. Далее были исследованы плотность и пористая структура синтезированных образцов. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Зависимость структуры и свойств пеностекла от фракционного состава

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

Из таблицы 3.8 видно, что с уменьшением фракционного состава шихты значительно уменьшается плотность и увеличивается объем пеностекла. На это влияет несколько факторов:

- тонкодисперсную шихту легче гомогенизировать, а, следовательно, увеличить количество точек зарождения газовых пор;

- чем меньше частица, тем легче она нагревается, поэтому тогда, как грубодисперсный образец только нагревается, тонкодисперсный уже переходит на стадию вспенивания и, следовательно, при одинаковом времени выдержки достигает больших объемов и меньшей плотности.

На основе данных, приведенных в таблице 3.8, в качестве оптимального выбран фракционный состав 3.5. Используя этот фракционный состав, можно сни-

зить температуру вспенивая пеностекла и получить равномерно распределенные поры.

3.4 Влияние вида стеклобоя на структуру и свойства пеностекла


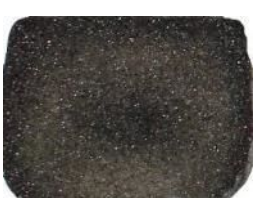

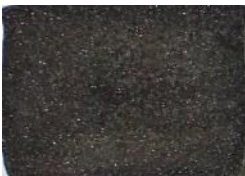

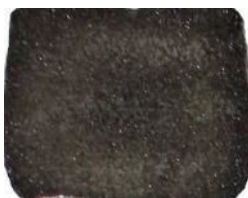

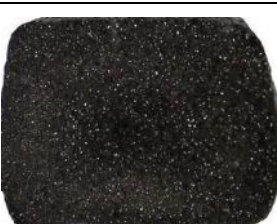
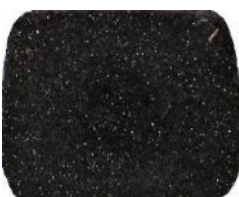




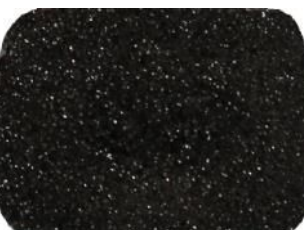




Для расширения сырьевой базы для производства пеностекла, а также с целью утилизации несортных стеклоотходов была исследована возможность применения различных видов стеклобоя. Для исследования были выбраны самые распространенные виды боя: бой зеленого тарного стекла марки ЗТ-1, бой листового стекла М4, бой бесцветного тарного стекла марки БТ-1. С использованием этих видов стеклобоя были разработаны составы шихт, представленные в таблице 3.9. В качестве поробразующей смеси был использован оптимальный состав из п. 3.2.

Таблица 3.9 – Составы шихт на основе различных видов стекла

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 обжигали согласно рисунку 2.2 при температурах вспенивания 800, 825, 850 °С и времени вспенивания 10 минут. Затем была определена плотность, а также исследована пористая структура синтезированных образцов. Результаты представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Внутренняя структура и плотность пеностекол, полученных на основе различных видов стекла

Параметр	№ состава					
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Температура вспенивания 800 °С						
Внутренняя структура						
Плотность; кг/м ³	230,72	283,04	410,79	299,88	328,36	243,34
Температура вспенивания 825 °С						
Внутренняя структура						
Плотность; кг/м ³	175,81	208,08	302,69	264,59	252,10	202,37
Температура вспенивания 850 °С						
Внутренняя структура						
Плотность; кг/м ³	149,89	150,80	284,89	182,86	203,02	155,69

Из таблицы видно, что наименьшими показателями плотности обладает состав 4.1 на основе стеклобоя БТ-1 ($230-150 \text{ кг/м}^3$), а наибольшими – состав 4.3 на основе стеклобоя ЗТ-1 ($410-300 \text{ кг/м}^3$). Состав 4.2 на основе стеклобоя М4 приближен по показателям к составу 4.1 на основе стеклобоя БТ-1 ($280-150 \text{ кг/м}^3$). При введении в составы на основе стекол БТ-1 и М4 стеклобоя ЗТ-1 наблюдается значительное увеличение плотности. Для состава 4.4 увеличение составляет $70-30 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от температуры вспенивания; для состава 4.5: $\approx 50 \text{ кг/м}^3$. Состав 4.6 на основе смеси стекол БТ-1 и М4 обладает средней плотностью между показателями составов 4.1 и 4.2.



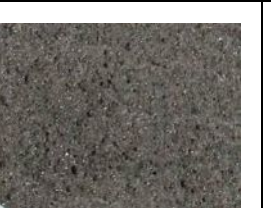


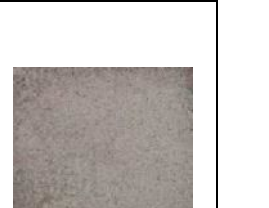

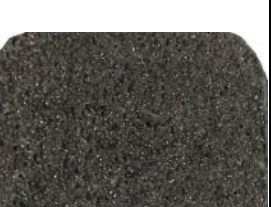










Оптимальным для использования в качестве теплоизоляционного материала является пеностекло с высокопористой структурой и небольшой плотностью. Под эти параметры подходят составы 4.1, 4.2 и 4.6. Составы 4.3, 4.4, 4.5 могут использоваться в случаях, когда необходима повышенная плотность и прочность пеностекла. Учитывая незначительные различия в свойствах составов 4.1, 4.2 и 4.6, в дальнейшем использовался состав 4.6 на основе смеси стекол БТ-1 и М4.

Следует также отметить, что на практике возможно применение и смеси несортового стеклобоя, однако вспенивание при этом нужно будет производить при температурах, на $25-30^\circ\text{C}$ выше, чем для установленного оптимального состава. Данное повышение позволит гарантировать вязкость стекломассы, необходимую для получения качественной структуры.

3.5 Влияние шлаковых отходов ТЭС на структуру и свойства пеностекла

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 до 30 мас.%. Спекание осуществлялось порошковым способом при температурах вспенивания $800, 825, 850^\circ\text{C}$ с выдержкой 10 минут согласно рисунку 2.2 [96-102]. Результаты представлены в таблицах 3.11-3.12 и на рисунке 3.5.

Таблица 3.11 – Структура и плотность пеностекла в зависимости от количества вводимого шлакового отхода ТЭС

Параметр	№ состава					
	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
Количество шлакового отхода ТЭС, мас. %	5	10	15	20	25	30
Температура вспенивания 800 °С						
Внутренняя структура						
Плотность, кг/м ³	273,19	293,63	317,45	312,55	311,89	507,75
Температура вспенивания 825 °С						
Внутренняя структура						
Плотность, кг/м ³	246,97	261,65	271,33	272,25	285,65	463,89
Температура вспенивания 850 °С						
Внутренняя структура						
Плотность, кг/м ³	200,67	204,74	209,49	229,12	225,04	439,76

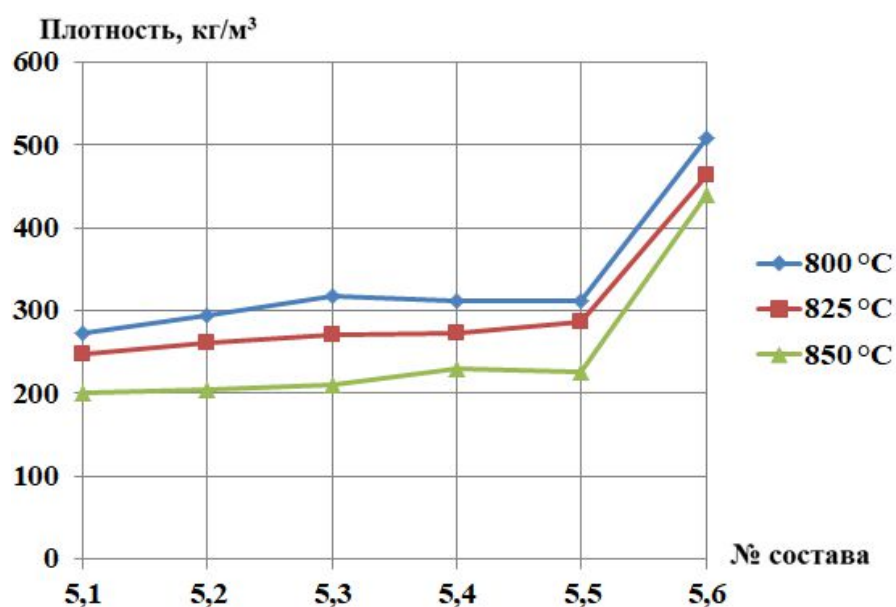


Рисунок 3.5 – Зависимость плотности пеностекла от содержания шлакового отхода ТЭС

Таблица 3.12 – Внутренняя структура пеностекла со шлаковым отходом ТЭС

	800 °C	825 °C	850 °C
Состав 5.1			
Состав 5.3			
Состав 5.5			

500 мкм

Исследование полученных образцов показало следующее:

- с введением до 20 мас. % шлакового отхода наблюдается закономерное увеличение плотности испытуемых образцов ($200\text{--}300\text{ кг/м}^3$). Однако изменений структуры и свойств материала практически не наблюдается. Равномерная пористая структура образуется даже при минимальной температуре синтеза ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Повышение температуры синтеза ведет к дальнейшему снижению плотности;

- с повышением в составе шихты содержания шлака до 25 мас.% наблюдается небольшое снижение равномерности пористой структуры за счет увеличения тугоплавкости смеси, однако также отмечается уменьшение плотности получаемого материала ($230\text{--}310\text{ кг/м}^3$), что делает состав с содержанием шлака 25 мас. % наиболее перспективным;

- у составов с содержанием шлакового отхода 30 мас. % наблюдается резкое увеличение плотности и снижение равномерности пористой структуры. Плотность полученных образцов превышает 400 кг/м^3 , поэтому данный состав не может быть использован для получения теплоизоляционного пеностекла;

Таким образом, учитывая необходимость привлечения в производство наибольшего количества шлакового отхода, среди всех составов оптимальным был выбран состав 5.5, содержащий 25 мас. % шлакового отхода ТЭС, образующий при температуре $825\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно равномерную пористую структуру с плотностью 285 кг/м^3 .

3.6 Оптимизация составов и режимов синтеза пеностекла с применением метода планирования эксперимента

Учитывая существенные энерго- и трудозатраты, а также сложность состава разрабатываемых материалов, необходимо применение методов оптимизации и планирования эксперимента, позволяющих значительно сократить затраты материальных средств и времени на выполнение исследований. Главной целью при этом является получение математической модели, адекватно описывающей процесс и позволяющей осуществлять его управление [103].

Оптимальным для этих целей является применение статистических методов планирования эксперимента, где математическое описание представляется в виде полинома, где Y — функция отклика, а $X1, X2, X3, \dots$ — факторы (аргументы) исследуемого процесса. План эксперимента в этом случае определяет расположение экспериментальных точек в k -мерном факторном пространстве. Обычно план задается в виде матрицы планирования, каждая строка которой определяет условия опыта, а каждый столбец — значения контролируемых и управляемых параметров в исследуемом процессе, т.е. значения факторов, соответствующих условию опыта.

Для построения и анализа многофакторных регрессионных моделей линейной структуры использовался модуль «Множественная регрессия» (Multiple Regression) интегрированной системы STATISTICA. Основное назначение данного модуля – построение зависимостей между многомерными переменными, подбор простой линейной модели и оценка ее адекватности.

Линейная многофакторная модель (3.1) представляет собой уравнение прямой в многомерном пространстве и имеет вид

$$Y = B0 + B1X1 + B2X2 + \dots + BnXn, \quad (3.1)$$

где $X1, \dots, Xn$ – независимые переменные (факторы); Y – зависимая переменная; $B0, \dots, Bn$ – коэффициенты уравнения регрессии; n — количество независимых переменных.

В соответствии с поставленной задачей, исходя из априорных данных, для состава 5.5 были выбраны факторы варьирования (независимые переменные), значения которых приведены в таблице 3.13: $X1$ – время вспенивания; $X2$ – количество шлаковых отходов; $X3$ – температура вспенивания;.

Таблица 3.13 – Факторы варьирования в условных и физических обозначениях

Условные обозначения независимой переменной	Наименование переменной	Размерность переменной	Пределы варьирования	Интервал варьирования
$X1$	Время вспенивания	минуты	10-30	10
$X2$	Количество шлаковых отходов	мас. %	15-35	10
$X3$	Температура вспенивания	°C	800-850	25

Интервалы и шаг варьирования для независимых переменных были выбраны так, чтобы максимально учесть все варианты. В качестве зависимой переменной (функции отклика) была выбрана плотность (кг/м^3). Матрица планирования, совмещенная с результатами эксперимента, представлена в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Матрица планирования и функция отклика физических переменных

Фактор варьирования		Функция отклика Y - плотность, кг/м^3 , при $X3$ – температуре вспенивания, $^{\circ}\text{C}$		
$X1$	$X2$	800	825	850
10	15	317	271	209
	25	312	285	225
	35	557	513	489
20	15	305	254	194
	25	291	253	192
	35	543	496	474
30	15	309	261	199
	25	293	257	198
	35	547	500	475

В результате обработки результатов эксперимента получена линейная математическая модель (3.2), а также рассчитаны основные характеристики полученной модели.

$$Y = 1542,417 - 0,772 \cdot X1 + 12,639 \cdot X2 - 1,82 \cdot X3 \quad (3.2)$$

Критерии Стьюдента ($t = 2,976$) и Фишера ($F = 24,7$) показывают, что построенная регрессия значима. Коэффициент детерминации R^2 (индикатор степени подгонки модели к данным) составляет 0,7632, т.е. построенная регрессия объясняет более 76,32 % разброса значений переменной Y относительно среднего. Значимыми переменными выбраны температура вспенивания и количество шлакового отхода.

Далее с целью оптимизации пеностекла состава 5.5 было выполнено моделирование поверхностей (графики получены квадратичным сглаживанием), а также построены карты линий уровня, которые представляют собой проекции трехмерных поверхностей на двумерную плоскость. Графики поверхностей и их проекции представлены на рисунках 3.6-3.8. Также получены уравнения, описывающие эти поверхности:

$$Y_{10} = -2290,611 - 79,633 \cdot X2 + 10,007 \cdot X3 + 0,04 \cdot X2 \cdot X3 + 1,187 \cdot X2^2 - 0,008 \cdot X3^2;$$

$$Y_{20} = 1886,778 - 88,150 \cdot X_2 + 0,170 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,323 \cdot X_2^2 - 0,002 \cdot X_3^2;$$

$$Y_{30} = 350,125 - 85,050 \cdot X_2 + 3,803 \cdot X_3 + 0,038 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,325 \cdot X_2^2 - 0,004 \cdot X_3^2.$$

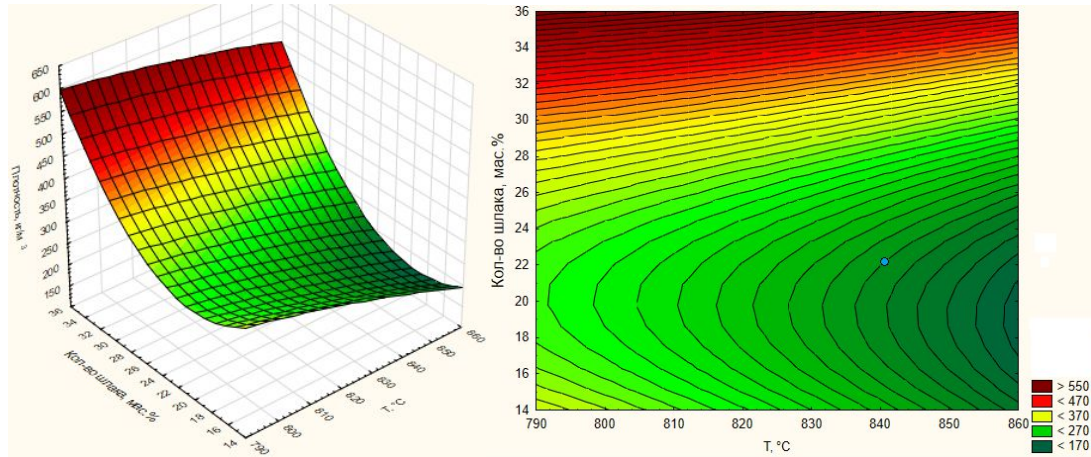


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения плотности от содержания шлакового отхода и температуры вспенивания при времени вспенивания 10 минут

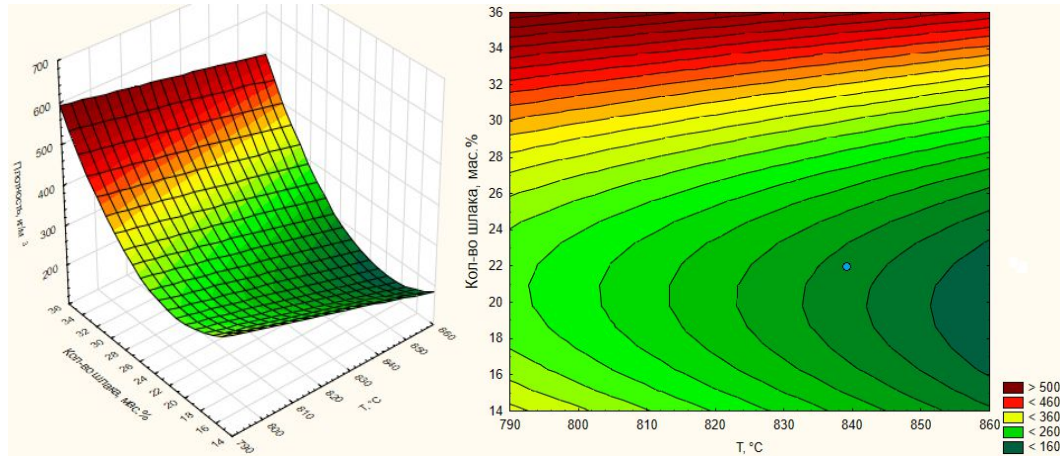


Рисунок 3.7 – Зависимость изменения плотности от содержания шлакового отхода и температуры вспенивания при времени вспенивания 20 минут

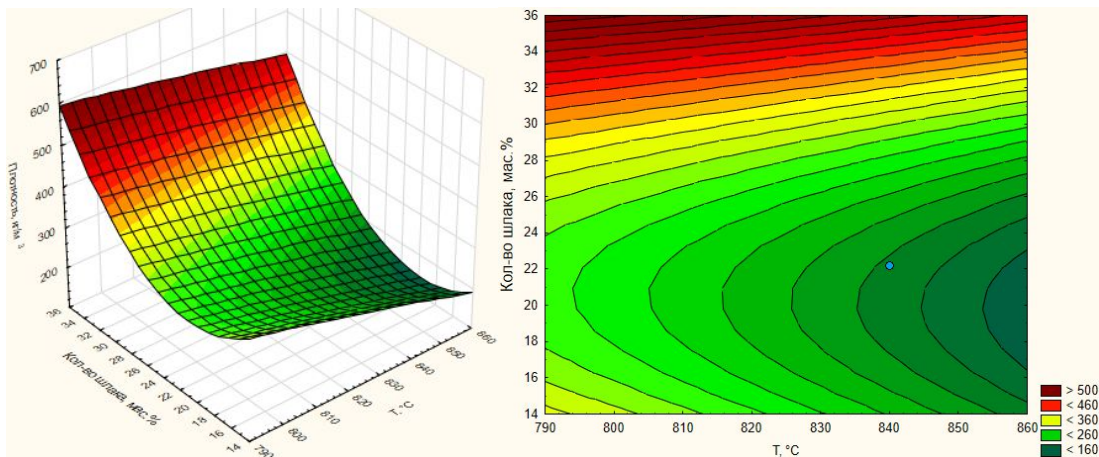


Рисунок 3.8 – Зависимость изменения плотности от содержания шлакового отхода и температуры вспенивания при времени вспенивания 30 минут

Исходя из рисунков 3.6-3.8, было установлено, что возможна следующая модернизация состава 5.5, мас. %: шлаковый отход ТЭС – 22; стеклобой БТ-1 – 34; стеклобой М4 – 34; порообразующая смесь – 10. Полученный состав выделен на рисунках точкой и обладает в температурном интервале 800-850 °С плотностью 195-220 кг/м³. Оптимальный режим синтеза: температура вспенивания 840 °С, время вспенивания 10 минут. Результаты сканирующей электронной микроскопии образца оптимального состава представлены на рисунке 3.9. По фазовому составу полученный материал представляет собой рентгеноаморфную стеклофазу (рисунок 3.10).

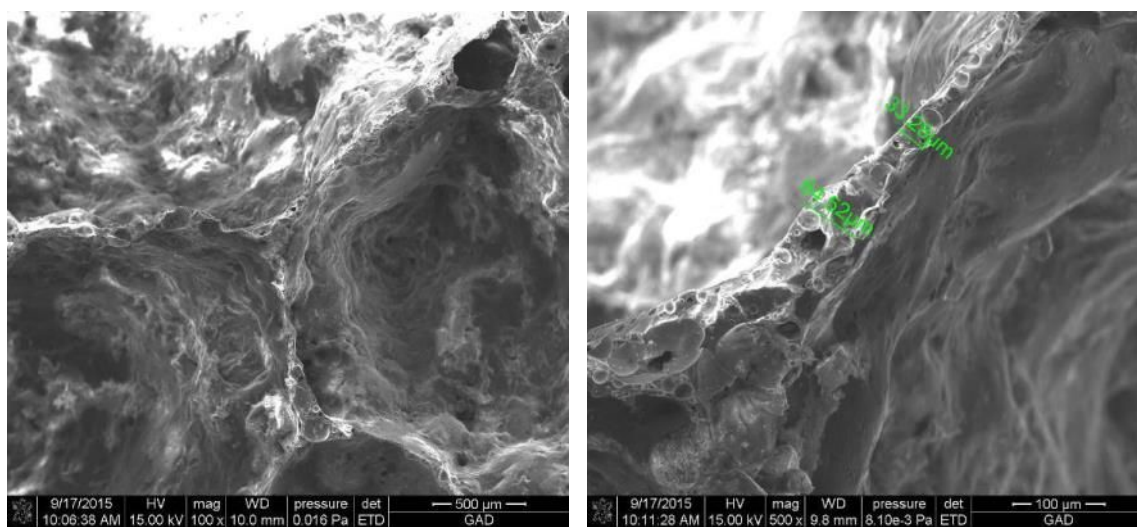


Рисунок 3.9 – Микроструктура образцов пеностекла оптимального состава

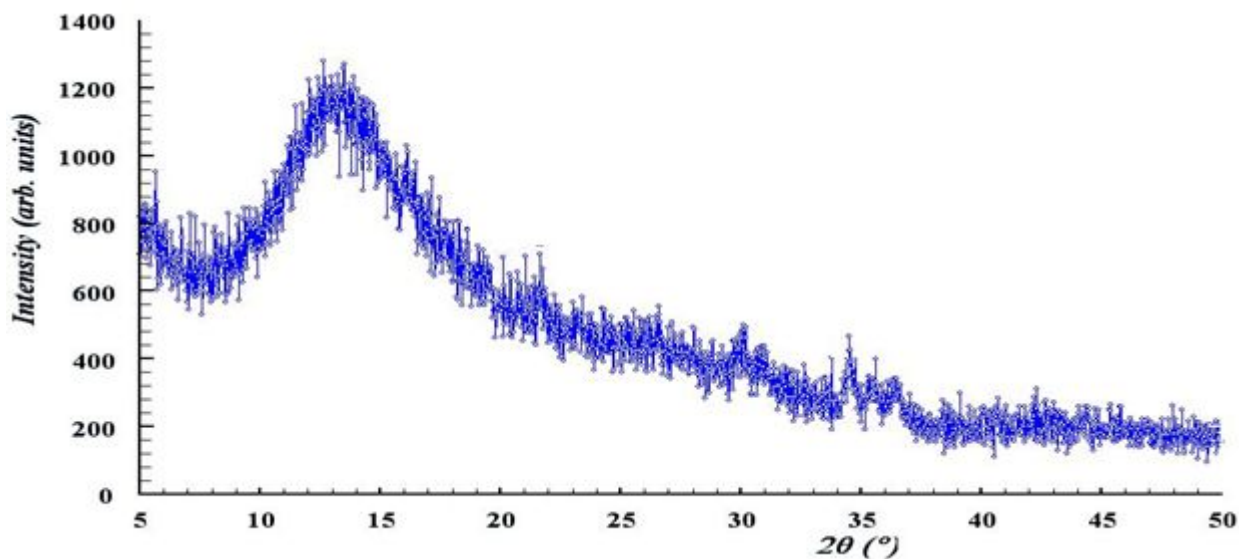


Рисунок 3.10 – Рентгенограмма образцов пеностекла оптимального состава

Используя данные технологические параметры, можно получить однородную пористую структуру с регулируемым размером пор в диапазоне 300–700 мкм.

3.7 Выводы

1. Установлен оптимальный состав порообразующей смеси для вспенивания пеностекла, мас. %: жидкое стекло – 4; глицерин – 3; вода – 3. Используя данные технологические параметры, можно получить однородную пористую структуру с регулируемым размером пор в диапазоне 50–150 мкм. Установлено, что в порообразующей смеси со смещением соотношения «жидкое стекло : глицерин» в сторону глицерина наблюдается уменьшение равномерности пористой структуры за счет образования крупных дефектных пор и изменение цвета материала с равномерно темного на светлый с темными порами. Это объясняется тем, что при малом количестве жидкого стекла повышается интенсивность разложения глицерина, а продукты разложения остаются в материале лишь в небольших областях, где и формируются поры. Установлено, что введение воды в порообразующую смесь приводит к значительному увеличению однородности пористой структуры, что связано со снижением вязкости смеси и ее лучшему распределению в шихте, а также к образованию при температуре около 800 °С водяного газа ($H_2 + CO$), создающего дополнительный объем газов, вспенивающих стекло.

2. Рассмотрено влияние температурно-временного режима синтеза на структуру и свойства пеностекла. Установлено, что при времени выдержки 5 минут структура не обеспечивает оптимальных технических параметров разрабатываемого пеностекла. Структура образцов, время вспенивания которых превышает 10 минут, также не является равномерной, поры приобретают неправильную форму, появляются дефекты. Длительность вспенивания 10 минут позволяет усреднить и стабилизировать средний размер пор, вследствие чего является оптимальной. Установлено, что после загрузки в печь при температуре 600 °С низкотемпературные процессы, (выгорание глицерина (≈ 260 °С), испарение воды (100 °С)) начинают происходить одновременно со спеканием шихты. В температурном промежутке 675–715 °С происходит сближение частиц при спекании, а при температуре 730 °С наблюдается появление первых газовых пор в структуре материала. При дальнейшем нагревании образца до 790 °С происходит резкое уменьшение

плотности за счет увеличения количества газовых пор, однако активное порообразование начинается при температурах выше 800 °С, при которой стекломасса достигает требуемой вязкости. При температурах выше 850 °С структура образца становится менее упорядоченной, поры деформируются, что негативно сказывается на свойствах материала. Оптимальным температурным интервалом для образования пористой структуры был выбран интервал 800-850 °С.

3. Установлено, что с уменьшением фракционного состава шихты значительно уменьшается плотность и увеличивается объем пеностекла. Это объясняется лучшей гомогенизацией тонкодисперсной шихты, что увеличивает количество точек зарождения газовых пор, и большей интенсивностью нагрева тонкодисперсных частиц, что интенсифицирует процессы плавления и вспенивания образцов. В качестве оптимальной выбрана фракция менее 0,16 мм.

4. С целью расширения сырьевой базы для производства пеностекла, а также с целью утилизации несортных стеклоотходов рассмотрена возможность применения различных видов стекlobоя: бой зеленого тарного стекла марки ЗТ-1, бой листового стекла М4, бой бесцветного тарного стекла марки БТ-1. Установлено, что наименьшими показателями плотности обладает состав 4.1 на основе стекlobоя БТ-1 (230-150 кг/м³), а наибольшими – состав 4.3 на основе стекlobоя ЗТ-1 (410-300 кг/м³). Состав на основе стекlobоя М4 4.2 приближен по показателям к составу на основе стекlobоя БТ-1 (280-150 кг/м³). Составы на основе смеси различных видов стекlobоя демонстрируют прямую зависимость увеличения плотности при добавлении стекlobоя, при применении которого были получены более плотные образцы. Оптимальной для использования в качестве теплоизоляционного материала была выбрана смесь стекол БТ-1 и М4. Было выявлено, что на практике возможно применение и несортного стекlobоя. Однако вспенивание при этом нужно будет производить при температурах, на 25-30 °С выше, чем для оптимального состава, что позволит гарантировать вязкость стекломассы, необходимую для получения равномерной структуры.

5. С целью замены стекlobоя на менее дефицитное сырье исследована возможность применения шлаковых отходов ТЭС. Установлено, что с введением до

20 мас. % шлакового отхода наблюдается закономерное увеличение плотности испытуемых образцов ($200\text{--}300\text{ кг/м}^3$), однако, изменений структуры и свойств материала практически не наблюдается. Повышение температуры синтеза ведет к дальнейшему снижению плотности. С повышением содержания шлака до 25 мас.% наблюдается небольшое снижение равномерности пористой структуры за счет увеличения тугоплавкости смеси, однако также отмечается уменьшение плотности получаемого материала ($230\text{--}310\text{ кг/м}^3$). У составов с содержанием шлакового отхода 30 мас. % наблюдается резкое увеличение плотности и снижение равномерности пористой структуры, плотность полученных образцов превышает 400 кг/м^3 ; Оптимальным был выбран состав, содержащий 25 мас. % шлакового отхода ТЭС, образующий при температуре $825\text{ }^{\circ}\text{C}$ равномерную пористую структуру с плотностью 285 кг/м^3 .

6. При помощи методов планирования эксперимента произведена оптимизация состава и режима синтеза пеностекла состава 5.5, мас. %: шлаковый отход ТЭС – 22; стеклобой БТ-1 – 34; стеклобой М4 – 34; порообразующая смесь – 10. Оптимальный режим синтеза: температура вспенивания $840\text{ }^{\circ}\text{C}$, время вспенивания 10 минут. Полученный состав обладает в температурном интервале $800\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ плотностью $195\text{--}220\text{ кг/м}^3$.

7. Для создания многослойных строительных панелей необходимо установить особенности получения компонентов панелей (плит, гранул, легкого бетона), а также исследовать их эксплуатационные свойства и выявить оптимальный элементный состав панелей.

4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЕНОСТЕКЛА И АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

4.1 Разработка режимов синтеза изделий из пеностекла

На основе разработанного пеностекла можно получать различные виды строительных материалов, такие как гранулы, щебень, блоки, плиты, легкие бетоны и др.

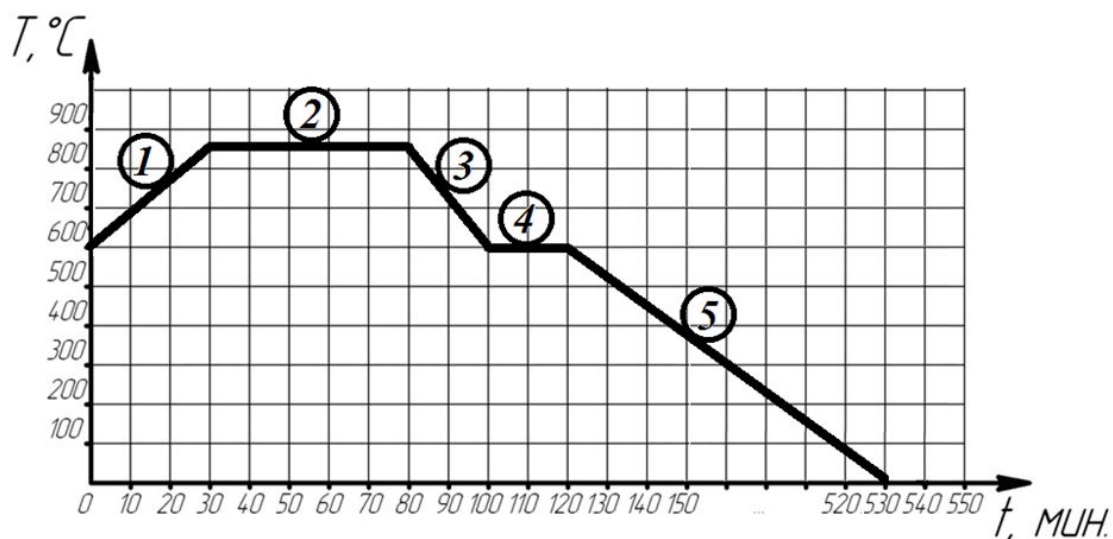
4.1.1 Разработка режим синтеза плит из пеностекла

В процессе синтеза плит согласно рисунку 2.2 были установлены следующие требования к их термической обработке, связанные с существенно большим размером плит в сравнении с лабораторными образцами:

1) Необходимость равномерного доступа горячего воздуха ко всем граням образца. Это обеспечивает, во-первых, равномерный нагрев плиты со всех сторон и, во-вторых, стабильный доступ кислорода, являющегося окислителем в реакции вспенивания пеностекла. Вследствие этого, обжиг плит производился в сетчатой модифицированной форме для вспенивания.

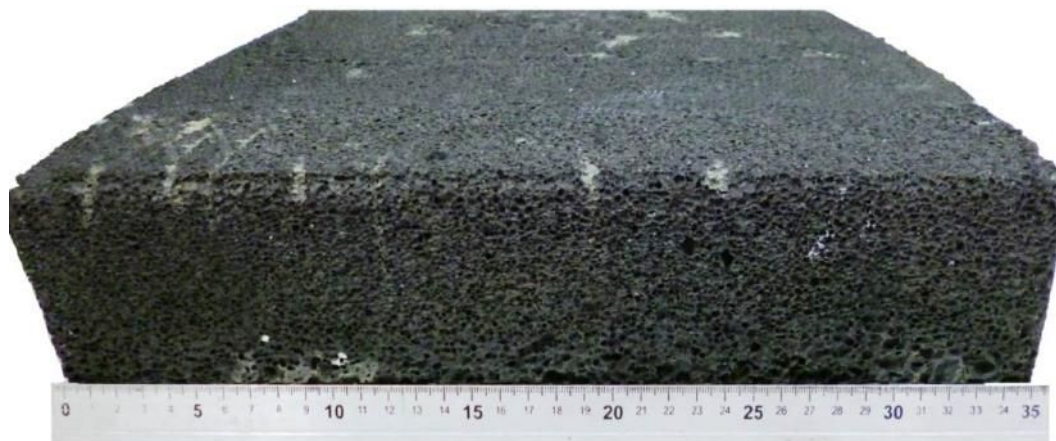
2) Необходимость удлинения всех стадий термообработки. Отличия от режима синтеза лабораторных образцов [104] и гранул [105] обусловлены, в первую очередь, большей толщиной изделия. Следовательно, для завершения процесса структурообразования его необходимо выдерживать при температуре вспенивания длительное время. Этим же обусловлено и появление стадии 4, способствующей равномерному снятию термических напряжений по всему объему образца. При этом, чем больше толщина изделия, тем длиннее должны быть стадии выдержки, охлаждения и отжига.

С учетом установленных особенностей синтез плит проводили согласно рисунку 4.1, а. Внешний вид плиты из пеностекла представлен на рисунке 4.1, б.



а) Режим синтеза плит:

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



б) Лабораторный образец плиты из пеностекла

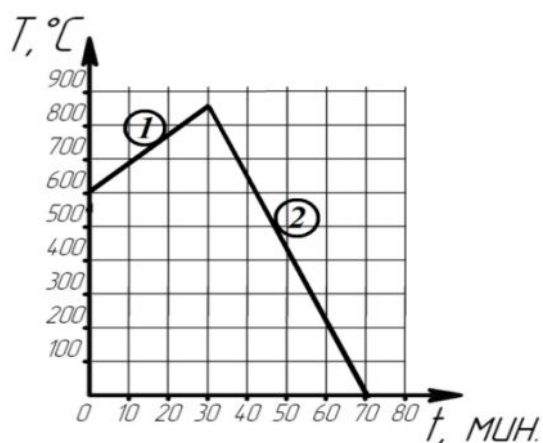
Рисунок 4.1 – Режим синтеза и внешний вид плит из пеностекла

По завершении обжига синтезированная плита подвергалась опиловке, т.е. приданию ей правильной геометрической формы и требуемых размеров. Этот процесс также способствует удалению верхнего оплавленного слоя и обнажению пористой структуры материала.

Следует отметить, что по данной технологии возможно получение другого типа изделий – пеностекляного щебня. Его получение основано на разрушении плиты из пеностекла при резком охлаждении за счет градиента температур внешних и внутренних слоев материала. Для получения щебня необходимо исключить стадии 4 и 5 (рисунок 4.1, а).

4.1.2 Разработка режимов синтеза пеностекольных гранул

Формование гранул производилось при помощи матрицы-гранулятора с заданным диаметром отверстий 5 мм. Далее сформованные образцы были подвергнуты обжигу при температуре 850 °С по графику, представленному на рисунке 4.2, а. Отличия от графика синтеза лабораторных образцов (рисунок 2.2) обусловлены малыми размерами гранул и, следовательно, отсутствием необходимости выдержки с целью выравнивания температуры в объеме материала. Затем был произведен гранулометрический анализ полученного пористого материала, показавший, что размер гранул колеблется от 5 до 10 мм (рисунок 4.2, б).



а) Режим синтеза гранул:

1 — нагрев; 2 — охлаждение



б) Лабораторный образец

пеностекольных гранул

Рисунок 4.2 – Режим синтеза и внешний вид пеностекольных гранул

Таким образом, чтобы оптимизировать режим синтеза для производства гранул из пеностекла стадией выдержки можно пренебречь из-за малых размеров получаемого материала. Напротив, для производства плит из пеностекла необходимо добавить дополнительную стадию отжига образцов для снятия термических напряжений по всему объему получаемого материала, а также удлинить стадию выдержки.

Для определения возможных способов применения разработанных изделий были проведены исследовательские испытания основных нормируемых физико-механических свойств согласно действующим государственным стандартам [76-90].

4.2 Определение физико-механических свойств пеностекольных изделий

4.2.1 Определение свойств пеностекольных гранул

Определение коэффициента теплопроводности. Метод основан на определении теплопроводности экспериментального образца гранул расчетным путем по теплопроводности парафина и композиционного материала на его основе в соответствии с пунктом 13 ГОСТ 9758-2012. Теплопроводность гранул вычисляли как среднее арифметическое значение результатов трех испытаний. Результаты вычислений представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты определения коэффициента теплопроводности

№ образца	P_M , г	P_K , г	V_{M_2} , см ³	ρ_n , г/см ³	Φ	λ_{II} , Вт/(м·К)	λ_M , Вт/(м·К)	Теплопроводность гранул, Вт/(м·К)	
								отдельного образца	средняя
1	1086	450	3125	0,9	0,77	0,260	0,096	0,06	0,06
2	1093	451	3125	0,9	0,77	0,260	0,096	0,06	
3	1074	451	3125	0,9	0,78	0,260	0,095	0,06	

Определение зернового состава. Зерновой состав (фракцию) экспериментальных образцов гранул пеностекла определяли в соответствии с пунктом 17 ГОСТ 9758-2012. Метод основан на рассеве предварительно высушенной пробы гранул на контрольных ситах с диаметром отверстий, соответствующим удвоенному наибольшему 2D (20 мм), наибольшему D (10 мм) и наименьшему d (5 мм) номинальным размерам зерен. Результаты исследовательских испытаний по определению фракционного состава гранул представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты определения фракционного состава гранул

№ пробы	Масса пробы, г	Частные остатки на ситах m_i , г			Частные остатки на поддоне $m_{плд}$, г	Сумма частных остатков Σm_i , г	Частные остатки на ситах a_i , %			Полные остатки на каждом сите A_i , %		
		d	D	2D			d	D	2D	d	D	2D
1	1986	1903	56	0	19	1978	95,8	2,8	0	98,6	2,8	0
2	1984	1887	46	0	34	1967	95,1	2,3	0	97,4	2,3	0
3	1989	1891	45	0	38	1974	95,1	2,3	0	97,4	2,3	0
4	1989	1890	49	0	24	1963	95,0	2,5	0	97,5	2,5	0
5	1987	1887	60	0	21	1968	95,0	3,0	0	98,0	3,0	0
среднее	—	—	—	—	—	—	—	—	—	97,8	2,6	0

Определение насыпной плотности. Насыпную плотность определяли взвешиванием массы высушенной пробы гранул в мерном сосуде в соответствии с пунктом 6 ГОСТ 9758-2012. Насыпную плотность гранул рассчитывали как среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний, при проведении которых каждый раз использовали новую пробу гранул. Результаты определения приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты определения насыпной плотности гранул

№ пробы	Масса мерного сосуда с гранулами, кг	Масса мерного сосуда, кг	Насыпная плотность, кг/м ³	
			отдельной пробы	средняя
1	1,090	0,704	197	199
2	1,107	0,704	201	

Определение влажности. Влажность определяли по разности масс навески гранул до и после высушивания в соответствии с пунктом 15 ГОСТ 9758-2012. Влажность гранул вычисляли с точностью до 0,1 % как среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты вычислений представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты определения влажности гранул

№ пробы	Масса сосуда с навеской до сушки, г	Масса сосуда с навеской после сушки, г	Масса сосуда, г	Влажность, %	
				отдельной пробы	средняя
1.1	961,45	959,66	364,20	0,3	0,3
1.2	970,00	967,58	364,20	0,4	
1.3	972,91	971,08	364,20	0,3	
2.1	969,54	967,12	364,20	0,4	0,4
2.2	963,55	961,15	364,20	0,4	
2.3	973,53	971,70	364,20	0,3	
					0,4

Определение водопоглощения. Водопоглощение экспериментального образца гранул определяли по разности масс навески до и после насыщения ее водой в соответствии с пунктом 16 ГОСТ 9758-2012. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты определения представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты определения водопоглощения гранул

№ навески	Масса навески, насыщенной водой, г	Масса сухой навески, г	Водопоглощение, %	
			отдельной навески	среднее
1.1	462,38	442,96	4,2	3,7
1.2	454,33	439,34	3,3	
2.1	458,66	446,28	2,7	3,7
2.2	462,50	440,76	4,7	
				3,7

Определение содержания расколотых зерен. Содержание расколотых зерен в экспериментальном образце гранул определяли как отношение массы расколотых зерен к массе испытуемой навески гравия в соответствии с пунктом 20 ГОСТ 9758-2012. Содержание расколотых зерен вычисляли как среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты вычислений представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты определения содержания расколотых зёрен

№ навески	Масса расколотых зёрен, г	Масса навески, г	Содержание расколотых зёрен, %	
			в отдельной навеске	среднее
1.1	17,48	197,53	8,9	8,8
1.2	17,33	196,88	8,8	
2.1	17,33	197,59	8,8	8,8
2.2	17,31	195,83	8,8	
				8,8

Определение прочности при сдавливании в цилиндре. Прочность экспериментального образца гранул при сдавливании в цилиндре определяли по нагрузке, соответствующей погружению пуансона на 20 мм в слой испытуемой пробы гранул в соответствии с пунктом 25 ГОСТ 9758-2012. Прочность гранул при сдавливании в цилиндре вычисляли как среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты определения приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты определения прочности при сдавливании в цилиндре

№ пробы	Масса пробы, г	Насыпная плотность, кг/м ³	Нагрузка при сдавливании Р, кгс	Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа	
				отдельной пробы	средняя
1	1198	199	1239	0,69	0,71
2	1212	200	1280	0,72	

Определение морозостойкости при потере массы после 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Морозостойкость гранул определяли по потерям массы его навески до и после проведения ряда циклов попеременного замораживания и оттаивания в соответствии с пунктом 29 ГОСТ 9758-2012. За окончательный результат испытания принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты определения представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты определения морозостойкости при потере массы после 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания гранул

№ навески	Масса навески до испытания, г	Масса остатка на сите после испытания, г	Потеря массы, %	
			отдельной навески	средняя
1.1	395,77	373,61	5,6	5,60
1.2	396,60	374,39	5,6	
2.1	395,78	373,22	5,7	5,65
2.2	396,34	374,14	5,6	
				5,63

Определение потери массы при определении стойкости против силикатного распада. Стойкость гранул против силикатного распада определяли по потере массы навески до и после проведения циклов попеременного пропаривания и охлаждения в соответствии с пунктом 31 ГОСТ 9758-2012. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты определения представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Потеря массы при определении стойкости против силикатного распада гранул

№ навески	Масса навески до испытания, г	Масса остатка на сите после испытания, г	Потеря массы, %	
			отдельной навески	средняя
1.1	396,74	396,07	0,17	0,175
1.2	396,22	395,51	0,18	
2.1	396,45	395,78	0,17	0,175
2.2	396,58	395,87	0,18	
				0,175

Определение потери массы при кипячении. Потерю массы экспериментального образца гранул при кипячении определяли по разности масс навески до и после испытания в соответствии с пунктом 33 ГОСТ 9758-2012. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты определения представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты определения потери массы при кипячении гранул

№ навески	Масса навески до испытания, г	Масса остатка на сите после испытания, г	Потеря массы, %	
			отдельной навески	средняя
1.1	397,01	396,30	0,18	0,180
1.2	396,65	395,94	0,18	
2.1	396,56	395,81	0,19	0,190
2.2	396,81	396,06	0,19	
				0,185

Определение содержания водорастворимых сернистых и сернокислых соединений. Определение содержания водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в экспериментальном образце гранул осуществляли в соответствии с методом, указанным в пункте 35 ГОСТ 9758-2012. Метод основан на переводе водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в нерастворимый осадок сульфата бария. Содержание указанных соединений в осадке в пересчете на SO_3 определяли гравиметрическим методом. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Предельное допустимое расхождение между результатами двух испытаний не превышает 0,15 %. Результаты определения представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Результаты определения содержания водорастворимых сернистых и сернокислых соединений

№ навески	Масса осадка сульфата бария, г	Масса навески в аликвотной части вытяжки, г	Содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений, %	
			отдельной навески	среднее
1	0,40	21,11	0,6499	0,6496
2	0,34	17,96	0,6493	

Определение потери массы при прокаливании. Потерю массы экспериментального образца гранул при прокаливании определяли гравиметрическим методом по разности массы тигля с навеской до и после прокаливании в соответствии с пунктом 36 ГОСТ 9758-2012. Потерю массы при прокаливании вычисляли как среднее арифметическое значение результатов двух параллельных испытаний. Результаты вычислений представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты определения потери массы при прокаливании

№ навески	Масса тигля, г	Масса тигля с навеской в сухом состоянии, г	Масса тигля с навеской после прокаливании, г	Потеря массы при прокаливании, %	
				отдельной навески	средняя
1.1	169,05	566,06	562,44	0,64	0,625
1.2	169,10	565,75	562,30	0,61	
2.1	168,25	564,81	561,31	0,62	0,610
2.2	172,30	569,11	565,70	0,60	
					0,617

Определение значения суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов. Измерялась удельная эффективная активность $A_{эфф}$, Бк/кг, природных радионуклидов $Ra-226$, $Th-232$, $K-40$ в гранулах в соответ-

ствии с требованиями ГОСТ 30108-94 и методикой измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения ПРОГРЕСС от 22.12.2003 г. МИ ЦМИИ НПО «ВНИИФТРИ» с помощью спектрометрической установки МКС-01А «МУЛЬТИРАД», зав. № 0904-Ар-Б-Г, аттестат аккредитации РОСС.RU.0001.510114 от 01.10.2015 г. По результатам спектрометрических исследований эффективная удельная активность $A_{эфф}$ природных радионуклидов $Ra-226$, $Th-232$, $K-40$ в гранулах составляет 70 ± 14 Бк/кг. Акт от 09 июня 2016 г. и протокол № 1 от 26 мая 2016 г. исследовательских испытаний гранул представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А.

4.2.2 Определение свойств плит из пеностекла

Определение группы горючести. Испытания на горючесть экспериментальных образцов плит проводили согласно методу I ГОСТ 30244-94. Рассчитывали среднюю арифметическую величину (по пяти образцам) прироста температуры в печи, в центре и на поверхности образца плиты. Рассчитывали потерю массы для каждого образца плиты (в процентах от начальной массы образца) и определяли среднюю арифметическую величину для пяти образцов. Результаты определений представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты определения группы горючести плит

Показатели	№ образца					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
Масса образца до испытания, г	35,7	36,1	35,9	35,8	35,9	—
Масса образца после испытания, г	34,8	34,9	34,8	35,1	35,0	—
Начальная температура печи, °С	835,0	836,0	835,0	835,0	836,0	—
Максимальная температура печи, °С	837,0	838,0	838,0	837,0	839,0	—
Конечная температура печи, м	835,0	836,0	836,0	836,0	837,0	—
Максимальная температура в центре образца, °С	842,0	843,0	843,0	841,0	842,0	—
Конечная температура в центре образца, °С	836,0	835,0	836,0	836,0	835,0	—
Максимальная температура поверхности образца, °С	839,0	838,0	839,0	838,0	838,0	—
Конечная температура поверхности образца, °С	836,0	835,0	836,0	836,0	835,0	—
Прирост температуры в печи, °С	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,8
Прирост температуры в центре образца, °С	6,0	8,0	7,0	5,0	7,0	6,6
Прирост температуры на поверхности образца, °С	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0	2,8
Потеря массы образца, %	2,5	3,3	3,1	2,0	2,5	2,7

Согласно данным таблицы, образцы, вырезанные из плит, относятся к негорючим материалам так как:

- прирост температуры в печи не более 50 °С;
- потеря массы образца не более 50 %.

Определение размера плит. Измерения длины, ширины и толщины экспериментальных образцов плит выполняли согласно методикам, указанным в ГОСТ EN 822-2011 и ГОСТ EN 823-2011. На плитах не наблюдалось отколов общей площадью более 5,0 см². Размеры и число дефектов не превышали значений, указанных в таблице 4.14. Результаты определения представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.14 – Допустимые дефекты внешнего вида плит

Вид дефекта	Значение
Отбитости углов глубиной более 15 мм, шт.	2
Отбитости углов глубиной от 3 до 15 мм, шт.	4
Отбитости ребер глубиной более 3 мм и длиной более 15 мм, шт.	2
Отбитости ребер глубиной не более 3 мм и длиной от 3 до 15 мм, шт.	4
Трещины, шт.	2

Таблица 4.15 – Результаты определения дефектов внешнего вида плит

Вид дефекта	Значение				
	Образцы №				
	1	2	3	4	5
Отбитости углов глубиной более 15 мм, шт.	0	0	0	0	0
Отбитости углов глубиной от 3 до 15 мм, шт.	2	2	2	1	2
Отбитости ребер глубиной более 3 мм и длиной более 15 мм, шт.	1	0	0	1	0
Отбитости ребер глубиной не более 3 мм и длиной от 3 до 15 мм, шт.	2	1	1	1	2
Трещины, шт.	1	1	0	0	1

Так как плиты соответствуют требованиям, указанным в таблице 4.14, проводили измерения длины, ширины и толщины (высоты). Проводили измерение длины и ширины плит в соответствии с пунктом 7 ГОСТ EN 822-2011 с помощью рулетки измерительной с ценой деления 1 мм. Длину и ширину плит в миллиметрах вычисляли как среднее арифметическое значение результатов измерений, округленное до 1 мм. Проводили измерение толщины плит в соответствии с пунктом 7 ГОСТ EN 823-2011. Результаты измерений длины, ширины и толщины плит представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Результаты измерений длины ширины и толщины плит

№ образца	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	
			в отдельной точке	средняя
1	350	350	100,5	101
			101,0	
2	351	350	100,0	100
			99,5	
3	351	352	100,0	101
			101,0	
4	350	350	99,0	99
			98,5	
5	350	350	99,5	100
			100,0	
Среднее	350	350	100	

Отклонение от прямоугольности плит измеряли в соответствии с пунктом 7 ГОСТ EN 824-2011 с помощью рулетки измерительной и металлического поворотного угольника. Измерения проводили при температуре $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Результаты измерений представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Результаты определения отклонений от прямоугольности граней плит

№ образца	Отклонения от прямоугольности по длине, мм/м	Отклонения от прямоугольности по ширине, мм/м	Отклонения от прямоугольности по толщине, мм
1	3	2	2
2	2	3	1
3	4	2	1
4	3	3	0
5	2	3	2

Определение плотности плит. Среднюю плотность экспериментального образца плиты определяли в соответствии с ГОСТ EN 1602-2011. Вычисляли среднее арифметическое значение плотности по результатам испытаний всех образцов плиты, которое округляли до третьей значащей цифры. Результаты определений представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Результаты определения плотности плит

№ образца	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Объём, м ³	Масса, кг	Плотность, кг/м ³	
						отдельного образца	средняя
1	0,350	0,350	0,101	0,012	2,431	202,59	205,24
2	0,351	0,350	0,100	0,012	2,486	207,15	
3	0,351	0,352	0,101	0,012	2,465	205,42	
4	0,350	0,350	0,099	0,012	2,471	205,93	
5	0,350	0,350	0,100	0,012	2,461	205,10	

Определение предела прочности при сжатии. Испытания по определению предела прочности при сжатии экспериментальных образцов плит проводили согласно ГОСТ 826-2011 на пяти образцах, вырезанных из плит: длина – 100 мм, ширина – 100 мм, толщина – 100 мм. Результаты определения представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Результаты определения предела прочности плит при сжатии

№ образца	Длина, мм	Ширина, мм	Площадь, мм ²	Максимальная сила, Н	Предел прочности при сжатии, кПа	
					отдельного образца	среднее значение
1	100	100	10000	9500	950	993
2	100	101	10100	10474	1037	
3	98	100	9800	9565	976	
4	99	100	9900	9831	993	
5	100	101	10100	10171	1007	

Определение предела прочности при изгибе. Испытания по определению предела прочности при изгибе экспериментальных образцов плит проводили согласно ГОСТ EN 12089-2011 на пяти плитах: длина – 350 мм, ширина – 350 мм, толщина – 100 мм. Результаты определения представлены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Результаты определения предела прочности плит на изгиб

№ образца	Ширина, мм	Толщина, мм	Максимальная сила, Н	Предел прочности при изгибе, кПа	
				отдельного образца	среднее значение
1	350	100	3900	420	398
2	351	101	3700	390	
3	351	100	3600	380	
4	349	100	3700	400	
5	350	101	3800	400	

Определение коэффициента теплопроводности. Сущность метода определения теплопроводности заключалась в создании стационарного теплового потока ГОСТ 25380-2014, проходящего через экспериментальный образец плиты толщиной 100 ± 5 мм и направленного перпендикулярно к лицевым граням плиты, измерении плотности этого теплового потока с помощью измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03 «ПОТОК», температуры противоположных лицевых граней и толщины плиты. За результат испытания принимали среднее арифметические значения термического сопротивления и эффективной теплопровод-

ности всех испытанных плит. Результаты испытаний представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Результаты определения коэффициента теплопроводности плит

№ образца	T_1 , °C	T_2 , °C	Плотность теплового потока, Вт/м ²	Термическое сопротивление, м ² ·К/Вт	Толщина, м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	
						отдельного образца	среднее значение
1	23,7	22,8	0,56	1,60	0,101	0,063	0,063
2	23,3	22,3	0,65	1,54	0,100	0,065	
3	23,9	23,0	0,55	1,63	0,101	0,062	
4	23,6	22,6	0,61	1,65	0,099	0,060	
5	23,8	22,8	0,65	1,54	0,100	0,065	

Определение водопоглощения по объему. Определяли водопоглощение по изменению массы экспериментальных образцов плит, полностью погруженных в воду на 28 сут., в соответствии с ГОСТ EN 12087-2011. Значение водопоглощения W_{Ip} округляли с точностью до 0,1 % по объему. Результаты определения представлены в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Результаты определения водопоглощения по объёму плит

№ образца	Первоначальная масса, г	Масса после погружения на 28 суток, г	Объём, м ³	Водопоглощение по объёму, %	
				отдельного образца	среднее
1	1589,25	1623,96	0,008	2,2	2,3
2	1588,76	1622,94	0,008	2,2	
3	1602,47	1640,45	0,008	2,4	
4	1591,48	1627,59	0,008	2,3	

Определение паропроницаемости. Определение характеристик паропроницаемости экспериментальных образцов плит проводили в соответствии с требованиями ГОСТ EN 12086-2011. Результаты определений представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Результаты определения паропроницаемости плит

№ образца	Изменение массы чашки с образцом за 24 часа, мг/ч	Плотность потока водяного пара, мг/(м ² ·ч)	Относительная паропроницаемость, мг/(м ² ·ч·Па)	Среднеарифметическое площадей верхнего и нижнего участков, м ²	Сопротивление паропроницанию, м ² ·ч·Па/мг	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	
						отдельного образца	средняя
1	67,5	2177,4	0,911	0,031	1,098	0,09	0,09
2	61,3	1915,6	0,802	0,032	1,247	0,08	
3	67,5	2177,4	0,911	0,031	1,098	0,09	
4	84,2	2631,3	1,101	0,032	0,908	0,11	
5	73,6	2374,32	0,993	0,031	1,007	0,10	

Определение морозостойкости. Определение морозостойкости проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ EN 12091-2011. Результаты испытания по определению изменения характеристик сжатия образцов плит после проведения 50 циклов замораживания и оттаивания представлены в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Результаты определения морозостойкости плит

№ образца	W_{vs} %		σ_m , МПа	σ_{m_wat} , МПа	σ_{m_dry} , МПа	$\Delta\sigma_{wat}$ %		$\Delta\sigma_{dry}$ %	
	отдельного образца	среднее значение				отдельного образца	среднее значение	отдельного образца	среднее значение
1	2,1	2,2	1,277	1,160	–	91	91	–	–
2	2,3		1,285	1,171	–	91		–	–
3	2,0		1,301	–	1,172	–	–	90	91
4	2,4		1,294	–	1,178	–	–	91	

Определение значения суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов. Измерялась удельная эффективная активность $A_{эфф}$, Бк/кг, природных радионуклидов $Ra-226$, $Th-232$, $K-40$ в экспериментальных образцах плит в соответствии с требованиями ГОСТ 30108-94 и методикой измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения ПРОГРЕСС от 22.12.2003 г. МИ ЦМИИ НПО «ВНИИФТРИ» с помощью спектрометрической установки МКС-01А «МУЛЬТИРАД», зав. № 0904-Ар-Б-Г, аттестат аккредитации РОСС.RU.0001.510114 от 01.10.2015 г. По результатам спектрометрических исследований эффективная удельная активность $A_{эфф}$ природных радионуклидов $Ra-226$, $Th-232$, $K-40$ в экспериментальных образцах плит составляет 142 ± 18 Бк/кг. Акт от 09 июня 2016 г. и протокол № 2 от 01 июня 2016 г. исследовательских испытаний экспериментальных образцов плит представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А.

4.2.3 Результаты исследований

Проведены исследовательские испытания экспериментальных образцов: пеностеклянных гранул, плит из пеностекла. В таблице 4.25 представлены обобщенные результаты исследовательских испытаний. Выбранные способы и методики исследований разработанных материалов соответствуют требованиям действующей на территории РФ нормативной документации, а используемые средства (ос-

новное и вспомогательное оборудование) испытаний соответствуют современному уровню науки.

Таблица 4.25 – Результаты исследовательских испытаний

Наименование параметра	Единицы измерения	Требования к параметру	Среднее измеренное значение
а) пеностекольные гранулы			
Фракция	%	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	не более 400	199
Влажность	% по массе	не более 20	0,4
Водопоглощение	% по массе	не более 20	3,7
Содержание расколотых зёрен	%	не более 30	8,8
Прочность при сдавливании в цилиндре	МПа	не менее 0,5	0,71
Морозостойкость при потере массы после 15 циклов замораживания и оттаивания	%	не более 8	5,6
Потеря массы при определении стойкости против силикатного распада	%	не более 5	0,175
Потеря массы при кипячении	%	не более 5	0,185
Содержание водорастворимых сернистых и серноокислых соединений	%	не более 1	0,65
Потеря массы при прокаливании	%	не более 3	0,62
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	не более 0,16	0,06
Значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов	Бк/кг	не более 1500	70±14
б) плиты из пеностекла			
Размер плит	мм	длина – 350±5; ширина – 350±5; толщина – 100±5	350x350x101, 351x350x100, 351x352x101, 350x350x99, 350x350x100
Плотность	кг/м ³	не более 500	225
Предел прочности:			
- при сжатии	МПа	не менее 0,7	0,99
- при изгибе	МПа	не менее 0,35	0,40
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	не более 0,1	0,063
Водопоглощение по объему	%	не более 20	2,3
Паропроницаемость	мг/(м·ч·Па)	не более 0,2	0,09
Морозостойкость	циклов	не менее 50	50
Группа горючести	-	НГ	НГ
Значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов	Бк/кг	не более 1500	142±18

Проведенные испытания позволили установить, что разработанные материалы выдержали испытания и соответствуют требованиям государственных стан-

дартов, что подтверждает правильность разработанных технологических решений и отсутствие необходимости их доработки.

Далее, основываясь на данных о составе, режиме синтеза и свойствах пено-стекла, а также гранул и плит на его основе, были рассмотрены способы применения разработанных материалов в качестве основного материала в многослойных строительных панелях.

4.3 Разработка предложений по применению пеностекольных изделий в многослойных строительных панелях

Как указывалось выше, получение многослойных строительных панелей производилось по технологии ЗАО «ККПД» (Ростов-на-Дону). Панели ЗАО «ККПД» представлены трехслойными стеновыми панелями, где в качестве внешних слоев применяется керамзитобетон (1800 кг/м^3), 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 пено-стекольных гранул, а плиты из пенополистирола – на плиту из пеностекла [106-110].

4.3.1 Легкий бетон на основе пеностекольных гранул

В качестве основных сырьевых компонентов для получения легкого бетона были выбраны: пеностекольные гранулы, портландцемент марки М500, кварцевый песок, вода. Гранулы производились согласно методике, описанной в п. 4.1.2. Далее был проведен расчет состава легкого бетона плотностью 600 кг/м^3 , соответствующий требованиям ГОСТ 25820-2014 для конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона, согласно методике [111], кг: цемент – 250; вода – 140; гранулы – 70; песок – 150. Порядок загрузки компонентов бетонной

смеси: сначала подают 15-20% воды, требуемой на замес, затем загружают одновременно цемент и заполнители, продолжая заливать воду до требуемого количества. После смешения смесь загружалась в подготовленную форму, уплотнялась на виброплощадке, проходила тепловлажностную обработку, после чего извлекалась из формы. Внешний вид плиты из легкого бетона представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Лабораторный образец плиты из легкого бетона

Были исследованы основные физико-механические свойства лабораторных образцов легкого бетона.

Определение средней плотности. Плотность образца легкого бетона определяли испытанием образцов в воздушно-сухом состоянии в соответствии с ГОСТ 12730.1-78. Результаты определения представлены в таблице 4.26.

Таблица 4.26 – Результаты определения средней плотности лёгкого бетона

№ образца	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Объём, м ³	Масса, кг	Средняя плотность, кг/м ³	
						отдельного образца	средняя
1	100	100	101	0,00101	0,553	597	595
2	101	100	99	0,00099	0,544	594	
3	100	101	100	0,00101	0,552	596	
4	101	99	100	0,00099	0,549	599	
5	100	100	101	0,00101	0,544	589	

Определение прочности на сжатие. Определение прочности на сжатие образца легкого бетона состояло в измерении минимальных усилий, разрушающих специально изготовленные контрольные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной скоростью роста нагрузки и последующем вычислении напряжений при этих усилиях в предположении упругой работы материала в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Результаты определения представлены в таблице 4.27.

Таблица 4.27 – Результаты определения прочности на сжатие лёгкого бетона

№ образца	Площадь рабочего сечения образца, мм ²	Разрушающая нагрузка, Н	Прочность на сжатие, МПа	
			отдельного образца	средняя
1	22650	31000	1,37	1,35
2	22500	30100	1,34	
3	22801	30500	1,34	
4	22499	30600	1,36	
5	22500	30400	1,35	

Определение коэффициента теплопроводности. Сущность метода определения теплопроводности заключалась в создании стационарного теплового потока, проходящего через экспериментальный образец легкого бетона в форме куба с гранью (100±5) мм, измерении плотности этого теплового потока по ГОСТ 25380-2014 и температуры противоположных лицевых граней с помощью измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03 «ПОТОК». Результаты испытаний представлены в таблице 4.28.

Таблица 4.28 – Результаты определения коэффициента теплопроводности лёгкого бетона

№ образца	T1, °C	T2, °C	Плотность теплового потока, Вт/м ²	Термическое сопротивление, м ² ·К/Вт	Толщина, м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	
						отдельного образца	среднее значение
1	23,5	22,7	1,4	0,57	0,1	0,175	0,166
2	22,9	22,1	1,3	0,62	0,1	0,161	
3	23,5	22,7	1,4	0,57	0,1	0,175	
4	23,4	22,5	1,4	0,64	0,1	0,156	
5	23,5	22,7	1,3	0,62	0,1	0,161	

Таким образом, были определены основные свойства предлагаемого состава легкого бетона, представленные в таблице 4.29.

Таблица 4.29 – Результаты определения свойств лёгкого бетона

Прочность на сжатие, МПа	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
1,35	595	0,166

4.3.2 Сравнительный теплотехнический анализ многослойных строительных панелей

Был проведен расчет тепловых потерь разработанных многослойных строительных панелей по сравнению с типовой трехслойной стеновой панелью

(85x80x85) мм на основе керамзитобетона плотностью 1800 кг/м^3 (наружные слои) и плиты из пенополистирола ПСБ-25 плотностью 20 кг/м^3 (внутренний теплоизоляционный слой) производства ЗАО «ККПД».

Расчет эффективности теплоизоляции ограждающей конструкции необходимо вести в соответствии с существующими принципами строительной теплофизики и по проверенным теплотехническим формулам. Теплотехнические расчеты выполнены с использованием сайта «Теплотехнический калькулятор» [112-113] на основании российской нормативной базы:

- СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»;
- СНиП 23-01-99 «Строительная климатология»;
- ТСН 23-339-2002 «Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий. Нормативы по энергопотреблению и теплозащите. Ростовская область»;
- СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»;
- СТО 00044807-001-2006 «Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий».

Расчет производился для наружной стены жилого помещения в г. Ростове-на-Дону (таблица 4.30). Параметры тепловой защиты для выбранной климатической зоны представлены в таблице 4.31.

Таблица 4.30 – Исходные данные для теплотехнического расчета

Параметр	Значение
Регион	Ростовская область
Населенный пункт	Ростов-на-Дону
Помещение	Жилое помещение
Вид конструкции	Стена

Таблица 4.31 – Параметры тепловой защиты

Параметр	Значение
Температура холодной пятидневки с обеспеченностью 0.92, °C	-19
Продолжительность отопительного периода, сут.	166
Средняя температура воздуха отопительного периода, °C	-0,1
Условия эксплуатации помещения	A
Количество градусо-суток отопительного периода (ГСОП), °C·сут	3337
Требуемое сопротивление теплопередаче	
Санитарно-гигиенические требования $[R_c]$, $(\text{м}^2 \cdot \text{K})/\text{Вт}$	1.12
Нормируемое значение поэлементных требований $[R_{\Sigma}]$, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$	1.62
Базовое значение поэлементных требований $[R_t]$, $(\text{м}^2 \cdot \text{K})/\text{Вт}$	2.57

При составлении расчета теплопотерь ограждающей конструкции использовалось справочное пособие «Теплопотери здания» [114]. Основной характеристикой эффективности теплоизоляции ограждающей стеновой конструкции является коэффициент сопротивления теплопередаче. Коэффициент сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции R_i , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$, рассчитывается по формуле (4.1):

$$R_i = R_{si} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \dots \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{se}, \quad (4.1)$$

где R_{se} – коэффициент сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции внешней поверхности, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; R_{si} – коэффициент сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции внутренней поверхности, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; δ_i – толщина i -го слоя материала, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Значения коэффициентов R_{si} и R_{se} (в соответствии с таблицами 13 и 14 [114]) для стены, пола и кровли составляют: $R_{si} = 1/8,7$ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; $R_{se} = 1/23$ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$. Значение теплопотерь здания складывается из трансмиссионных потерь тепла ограждающих конструкций и потерь тепла с инфильтрацией. Потери тепла с инфильтрацией составляют, как правило, менее 2 % от общего значения суммарных теплопотерь здания. Ввиду незначительного вклада в общее значение теплопотерь ограждающих конструкций, а также ввиду одинакового влияния инфильтрации на сравниваемые конструктивы, расчетом потерь тепла через инфильтрацию можно пренебречь.

4.3.2.1 Типовая трехслойная стеновая панель

В качестве исходной панели была выбрана стандартная трехслойная панель ЗАО «Комбинат крупнопанельного домостроения» (г. Ростов-на-Дону), состоящая из следующих материалов: внешние слои – керамзитобетон плотностью $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$, внутренний слой – пенополистирол марки ПСБ-25 (таблица 4.32). Ре-

зультаты теплотехнического расчета представлены на рисунке 4.4 и в таблице 4.33.

Таблица 4.32 – Свойства материалов трехслойной панели

Материал	Толщина, мм	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Керамзитобетон 1800 кг/м ³	85	1800	0,80
Пенополистирол ПСБ-25	80	25	0,041

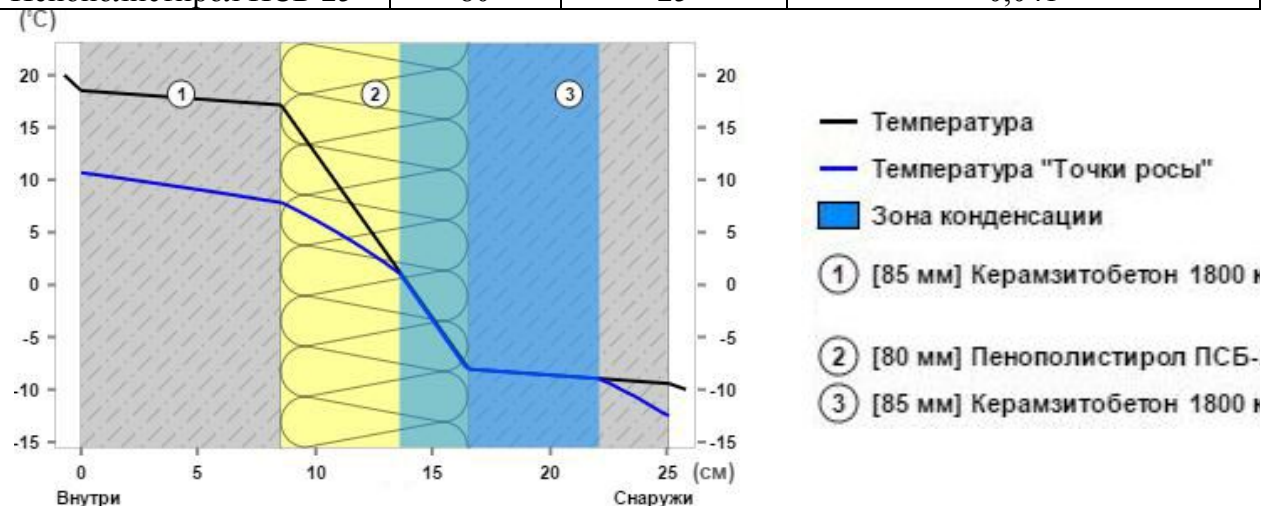


Рисунок 4.4 – Сопротивление теплопередаче

Таблица 4.33 – Слои конструкции (изнутри наружу)

№	d, мм	Материал	λ , Вт/(м·К)	T_{\max} , °C	T_{\min} , °C	R , (м ² ·К)/Вт
Сопротивление тепловосприятию				20,0	18,5	0,11
1	85	Керамзитобетон	0,8	18,5	17,1	0,11
2	80	Пенополистирол	0,041	17,1	-8,1	1,95
3	85	Керамзитобетон	0,8	-8,1	-9,4	0,11
Сопротивление теплоотдаче				-9,4	-10,0	0,04
Термическое сопротивление ограждающей конструкции						2,16
Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции [R]						2,32

Из расчета видно, что данная конструкция не удовлетворяет нормам поэлементных требований к тепловой защите ($R < R_T$; $2,32 < 2,57$).

4.3.2.2 Многослойная строительная панель

Был произведен расчет предполагаемой трехслойной панели (85x80x85) мм, состоящей из следующих материалов: внешние слои – легкий бетон на основе разработанных пеностекольных гранул плотностью 600 кг/м³, внутренний слой –

плита из пеностекла плотностью 200 кг/м^3 (таблица 4.34). Результаты теплотехнического расчета представлены на рисунке 4.5 и в таблице 4.35.

Таблица 4.34 – Свойства материалов трехслойной панели.

Материал	Плотность, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
Легкий бетон на основе пеностеклянных гранул	600	0,17
Плита из пеностекла	200	0,06

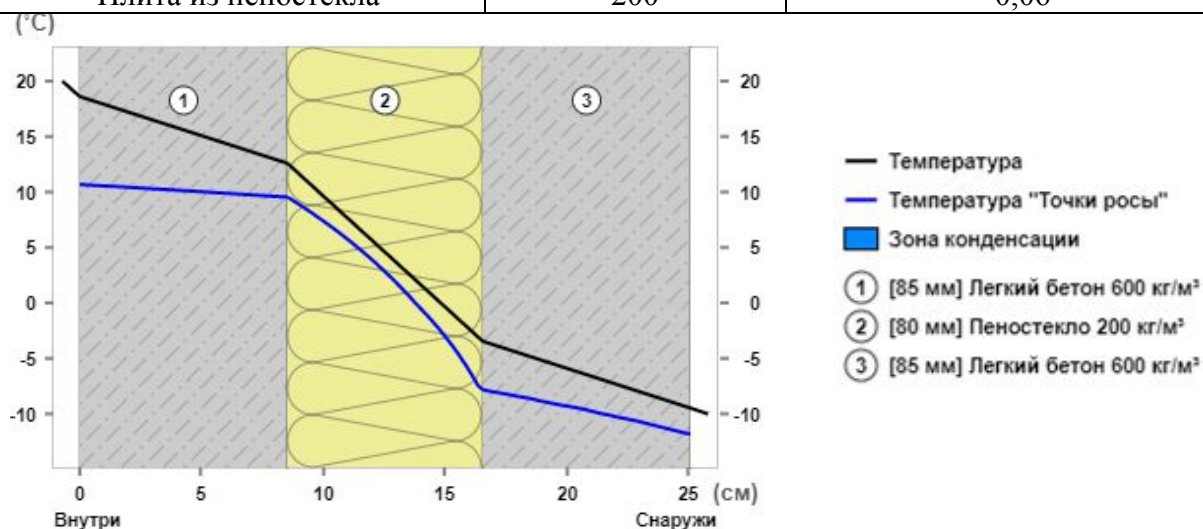


Рисунок 4.5 – Сопротивление теплопередаче

Таблица 4.35 – Слои конструкции (изнутри наружу)

№	d, мм	Материал	λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	T_{max} , °C	T_{min} , °C	R , $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$
Сопротивление тепловосприятию				20,0	18,6	0,11
1	85	Легкий бетон	0,17	18,6	12,6	0,50
2	80	Пеностекло	0,06	12,6	-3,5	1,33
3	85	Легкий бетон	0,17	-3,5	-9,5	0,50
Сопротивление теплоотдаче				-9,5	-10,0	0,04
Термическое сопротивление ограждающей конструкции						2,33
Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции [R]						2,49

Из расчета видно, что данная конструкция не полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите ($R < R_T$; $2,49 < 2,57$). Кроме того, в сравнении со стандартной панелью, имеется ряд преимуществ:

- отсутствует конденсация влаги внутри панели, что ведет к значительному улучшению теплоизоляционных свойств и повышению сроков службы панели;
- меньший вес панели при более высоких показателях теплоизоляционных свойств ведет к снижению нагрузки на основание здания и снижению материалоемкости конструкции;

- применение неорганических материалов ведет к повышению огнестойкости и пожаробезопасности здания, а также к повышению сроков эксплуатации здания.

Исходя из этого, был произведен расчет предполагаемой трехслойной панели, состоящей из следующих материалов: внешние слои – легкий бетон на основе разработанных пеностекольных гранул плотностью 600 кг/м^3 , внутренний слой – плита из пеностекла плотностью 200 кг/м^3 (таблица 4.34). Результаты теплотехнического расчета представлены на рисунке 4.6 и в таблице 4.36.

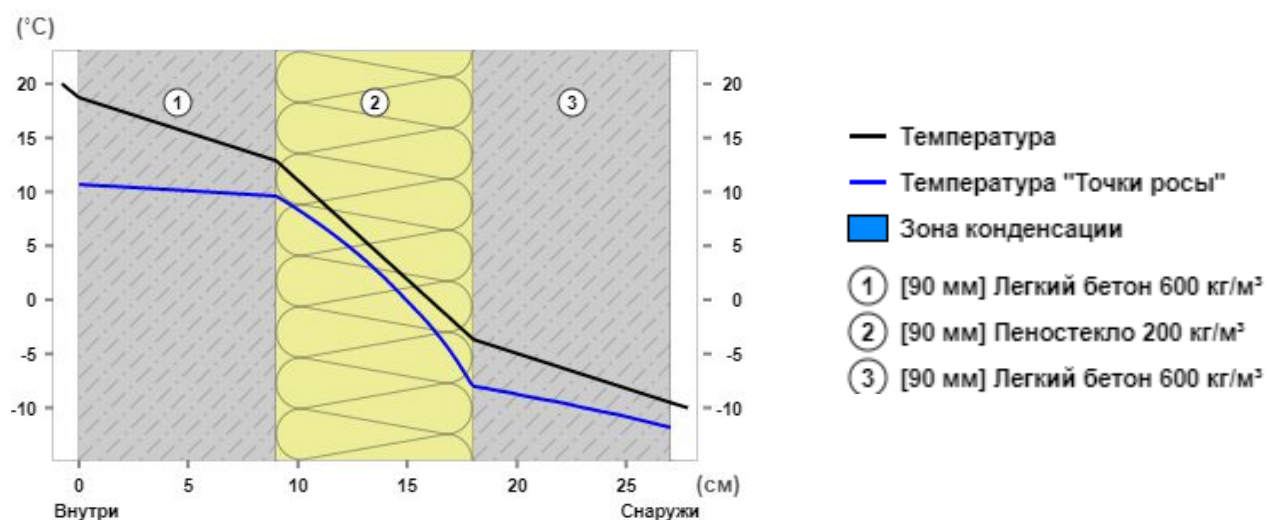


Рисунок 4.6 – Сопротивление теплопередаче

Таблица 4.36 – Слои конструкции (изнутри наружу)

№	d, мм	Материал	λ , Вт/(м·К)	T_{\max} , °C	T_{\min} , °C	R , (м ² ·К)/Вт
Сопротивление тепловосприятию				0,11	20,0	18,7
1	90	Легкий бетон	0,17	0,53	18,7	12,9
2	90	Пеностекло	0,06	1,50	12,9	-3,7
3	90	Легкий бетон	0,17	0,53	-3,7	-9,5
Сопротивление теплоотдаче				0,04	-9,5	-10,0
Термическое сопротивление ограждающей конструкции						2,56
Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции [R]						2,72

Из расчета видно, что данная конструкция полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите ($R > R_T$; $2,72 > 2,57$). Таким образом, учитывая перечисленные выше преимущества, применение разработанных многослойных панелей является эффективной заменой существующим традиционным панелям.

4.3.3 Определение теплопроводности лабораторного образца многослойной строительной панели

На основании теплотехнического расчета был получен лабораторный образец многослойной строительной панели, произведенный по технологии ЗАО «ККПД». Смешение и укладка бетона производится по описанной выше методике. Далее по уложенному бетону укладывается утеплитель (пеностекло). При необходимости производится дополнительная прирезка утеплителя для пропуска гибких связей. Затем происходит укладка и разравнивание внутреннего растворного слоя. Затем излишки бетонной смеси сдвигаются и поверхность панели заглаживается. Далее панель подвергается тепловлажностной обработке, извлекается из формы и направляется на склад готовой продукции. Внешний вид лабораторного образца многослойной строительной панели представлен на рисунке 4.7.

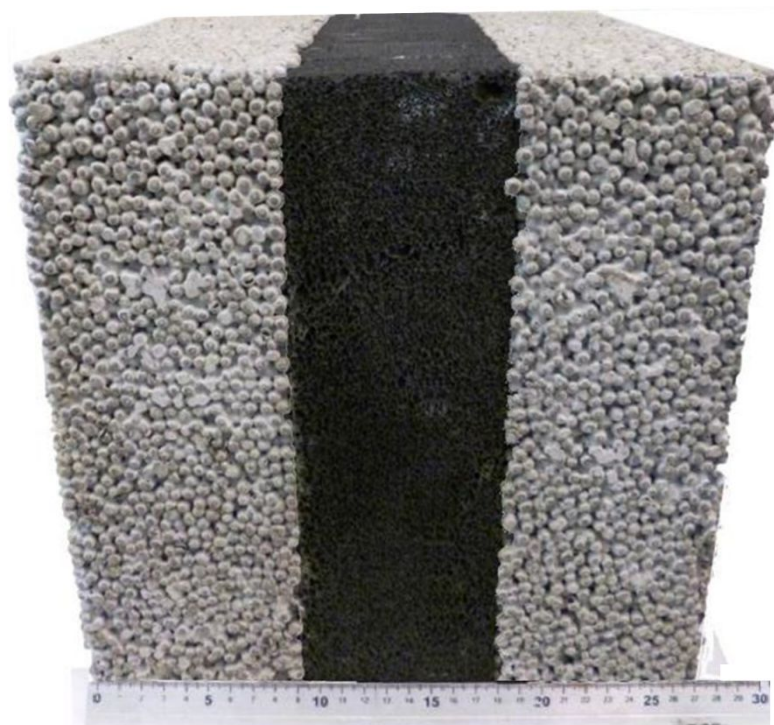


Рисунок 4.7 – Лабораторный образец многослойной строительной панели

Для подтверждения расчетных данных было проведено экспериментальное определение теплопроводности, заключающееся в создании стационарного теплового потока, проходящего через панель и направленного перпендикулярно к ее лицевым граням, измерении плотности этого теплового потока по ГОСТ 25380-

2014 с помощью измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03 «ПОТОК», температуры противоположных лицевых граней и толщины материала. Эффективную теплопроводность λ_{eff_z} (коэффициент теплопроводности), Вт/(м·К), определяли в соответствии с ГОСТ 7076-99 (рисунок 4.8). За результат испытания принимали среднеарифметические значения термического сопротивления и эффективной теплопроводности трех образцов многослойной строительной панели (таблица 4.37).

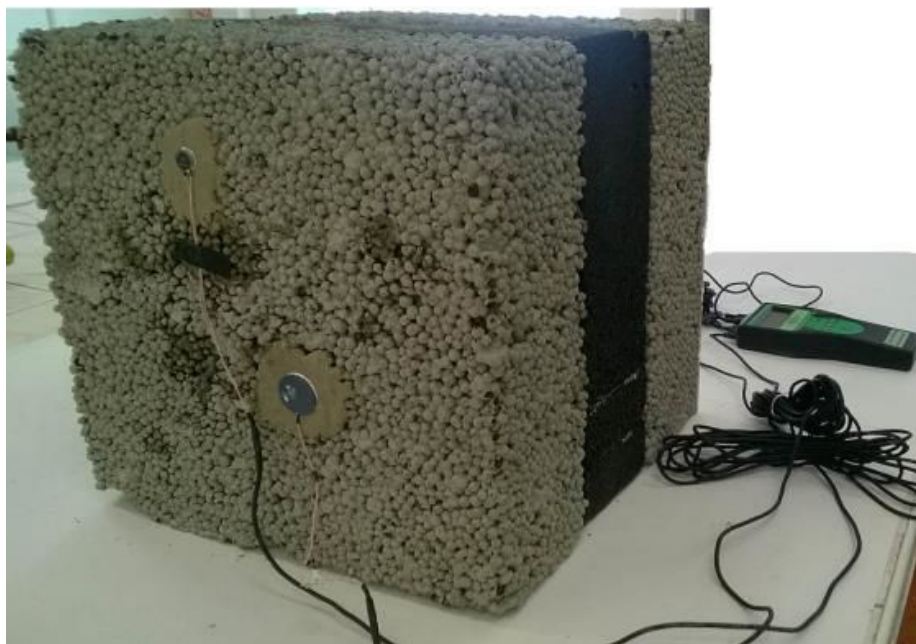


Рисунок 4.8 – Измерение плотности теплового потока, проходящего через многослойную строительную панель

Таблица 4.37 – Результаты определения коэффициента теплопроводности многослойной строительной панели

№ образца	$T1$, °C	$T2$, °C	Плотность теплового потока, Вт/м ²	Термическое сопротивление, м ² ·К/Вт	Толщина, м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
1	23,5	19,7	1,7	1,70	0,269	0,168
2	23,7	19,8	1,7	1,69	0,273	0,166
3	23,7	19,6	1,7	1,71	0,276	0,169
						0,167

Как видно из таблицы, экспериментально определенный коэффициент теплопроводности соответствует расчетному, что подтверждает верность рассчитанных теплотехнических параметров и эффективность предлагаемой панели.

4.4 Выводы

1. Разработаны режимы синтеза строительных материалов на основе пено-стекла. Синтез плит из пеностекла включал 5 стадий: 1 – нагрев; 2 – вспенивание; 3 – резкое охлаждение (фиксация структуры); 4 – выдержка (стабилизация температуры); 5 – охлаждение (отжиг). Отличия от режима синтеза лабораторных образцов связаны со следующими факторами: необходимость равномерного доступа горячего воздуха ко всем граням образца; необходимость удлинения всех стадий термообработки из-за большей толщины изделия. Синтез пеностекольных гранул включал 2 стадии: 1 – нагрев; 2 – охлаждение. Отличия от режима синтеза лабораторных образцов связаны с малыми размерами гранул и отсутствием необходимости стадий выдержки с целью выравнивания температуры в объеме материала.

2. Определены физико-механические свойства пеностекольных изделий:

а) пеностекольные гранулы: фракция (5-10) мм 97,8 %; (10-20) мм 2,6 %; насыпная плотность 199 кг/м^3 ; влажность 0,4 % по массе; водопоглощение 3,7 % по массе; содержание расколотых зёрен 8,8 %; прочность при сдавливании в цилиндре 0,71 МПа; потеря 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 $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов $70 \pm 14 \text{ Бк/кг}$;

б) плиты из пеностекла: плотность 225 кг/м^3 ; предел прочности при сжатии 0,99 МПа; предел прочности при изгибе 0,40 МПа; коэффициент теплопроводности $0,063 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; водопоглощение по объему 2,3 %; паропроницаемость $0,09 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$; морозостойкость 50 циклов; группа горючести НГ; значение суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов $142 \pm 18 \text{ Бк/кг}$.

3. Рассчитан состав легкого бетона на основе пеностекольных гранул. Выбрано соотношение, кг: цемент – 250; вода – 140; гранулы – 70; песок – 150., соот-

ветствующий требованиям ГОСТ 25820-2014 для конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона. Определены его основные физико-механические свойства: средняя плотность 595 кг/м^3 ; прочность на сжатие $1,35 \text{ МПа}$; коэффициент теплопроводности $0,166 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

4. Проведен теплотехнический расчет и сравнительный анализ стандартной трехслойной стеновой панели ЗАО «ККПД» (внешние слои – керамзитобетон плотностью 1800 кг/м^3 , внутренний слой – пенополистирол марки ПСБ-25) и трехслойной стеновой панели на основе разработанных материалов (внешние слои – легкий бетон на основе пеностекольных гранул плотностью 600 кг/м^3 , внутренний слой – плита из пеностекла плотностью 200 кг/м^3). Расчет показал, что стандартная панель не удовлетворяет нормам поэлементных требований к тепловой защите. Панель на основе разработанных материалов (внешние слои (легкий бетон) – 90 мм ; внутренний слой (плита из пеностекла) – 90 мм) полностью удовлетворяет нормам требований к тепловой защите и защите от переувлажнения и может использоваться при возведении зданий и сооружений. Кроме того, в сравнении со стандартной панелью, имеется ряд преимуществ: отсутствие конденсации влаги внутри панели; меньший вес при более высоких показателях теплоизоляционных свойств; повышенная огнестойкость, пожаробезопасность и сроки эксплуатации здания.

5. Получены лабораторные образцы многослойной строительной панели (внешние слои (легкий бетон) – 90 мм ; внутренний слой (плита из пеностекла) – 90 мм), произведенные по технологии ЗАО «ККПД». Экспериментально определен коэффициент теплопроводности панели, составивший $0,167 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что соответствует данным рассчитанным теплотехническим параметрам и подтверждает эффективность предлагаемой панели.

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЕНОСТЕКЛА И ОЦЕНКА ЕЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

5.1 Разработка технологической схемы производства изделий из пеностекла и подбор технологического оборудования для ее производства

Технологическая схема производства изделий из пеностекла (пеностекольных гранул и плит из пеностекла) включает следующие стадии:

- подготовка сырьевых материалов;
- смешение сырьевых материалов;
- формование изделий заданной формы и размеров (гранулы, плиты);
- термическая обработка;
- механическая обработка.

График термической обработки плит из пеностекла представлен на рисунке 4.1, пеностекольных гранул – на рисунке 4.2. Технологическая схема производства изделий из пеностекла представлена на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства изделий из пеностекла

Для реализации разработанной технологии производства изделий из пеностекла и внедрения ее в промышленное производство был произведен подбор

оборудования для цеха по производству изделий из пеностекла (плит и гранул) с годовой мощностью 50 тыс. м³/год.

5.2 Подбор оборудования для производства изделий из пеностекла

Для производства *пеностекольных гранул* исходные сырьевые материалы поступают на склад сырья, откуда транспортируются в молотковые дробилки СМД-112А, где подвергаются предварительному дроблению до размера кусков не более 10 мм. После дробления сырьевые материалы поступают в накопительные бункеры, а оттуда в шаровые мельницы непрерывного действия МШН-2, где измельчаются до фракции 100-150 мкм. Полученные порошки транспортируются с помощью шнековых питателей ОПР453.01.000 в вибрационные грохоты легкого типа ГВЛ-720, где происходит просеивание и отбор сырьевых материалов заданной фракции. После просеивания недоизмельченные материалы возвращаются в накопительные бункеры и снова измельчаются в шаровых мельницах.

Измельченные сырьевые материалы транспортируются шнековыми питателями ОПР453.01.000 в пневмовинтовые насосы-дозаторы ТФ-1, дозирующие сырьевые материалы в заданном соотношении. Компоненты порообразующей смеси (жидкое стекло, глицерин, вода) смешиваются в смесителе СВГ-3М. После этого все отвешенные сырьевые материалы транспортируются в смеситель СБ-138Б, где тщательно перемешиваются.

Далее полученная шихта с помощью шнекового питателя ОПР-453.01.000 порциями подается в тарельчатый гранулятор ОТ-200, где гранулируется вместе с каолиновой пудрой, а затем на ленточном транспортере направляется в барабанную печь вспенивания.

В печи гранулы проходят стадию термообработки при температуре 820 °С. Обожженные гранулы охлаждаются в барабанном холодильнике 2,5-10 и шнековыми питателями ОПР453.01.000 перемещаются к вибрационному грохоту легкого типа ГВЛ-500, где происходит отсев некондиционных гранул.

Полученные гранулы с помощью шнековых питателей ОПР453.01.000 отправляются в бункер, откуда подается на дальнейшие операции.

Для производства *плит из пеностекла* исходные сырьевые материалы поступают на склад сырья, откуда транспортируются в молотковые дробилки СМД-112А, где подвергаются предварительному дроблению до размера кусков не более 10 мм. После дробления сырьевые материалы поступают в накопительные бункеры, а оттуда в шаровые мельницы непрерывного действия МШН-2, где измельчаются до фракции 100-150 мкм. Полученные порошки транспортируются с помощью шнековых питателей ОПР453.01.000 в вибрационные грохоты легкого типа ГВЛ-720, где происходит просеивание и отбор сырьевых материалов заданной фракции. После просеивания недоизмельченные материалы возвращаются в накопительные бункеры и снова измельчаются в шаровых мельницах.

Измельченные сырьевые материалы транспортируются шнековыми питателями ОПР453.01.000 в пневмовинтовые насосы-дозаторы ТФ-1, дозирующие сырьевые материалы в заданном соотношении. Компоненты порообразующей смеси (жидкое стекло, глицерин, вода) смешиваются в смесителе СВГ-3М. После этого все отвешенные сырьевые материалы транспортируются в смеситель СБ-138Б, где тщательно перемешиваются.

Далее полученная шихта с помощью шнекового питателя ОПР-453.01.000 порциями подается в формы для прессования, которые транспортируются к гидравлическому прессу PRD20NF. Спрессованные блоки шихты укладываются на загрузочные стеллажи, которые перемещаются на тележки. Тележки с блоками шихты транспортируются в туннельную печь обжига Kemei для вспенивания и отжига согласно заданному температурно-временному режиму. Охлажденные блоки перемещаются на автоматическую линию резки New Line 350, где им придаются заданные размеры, и далее на участок скрепления.

Аппаратурно-технологическая схема производства изделий из пеностекла представлена на рисунке 5.2.

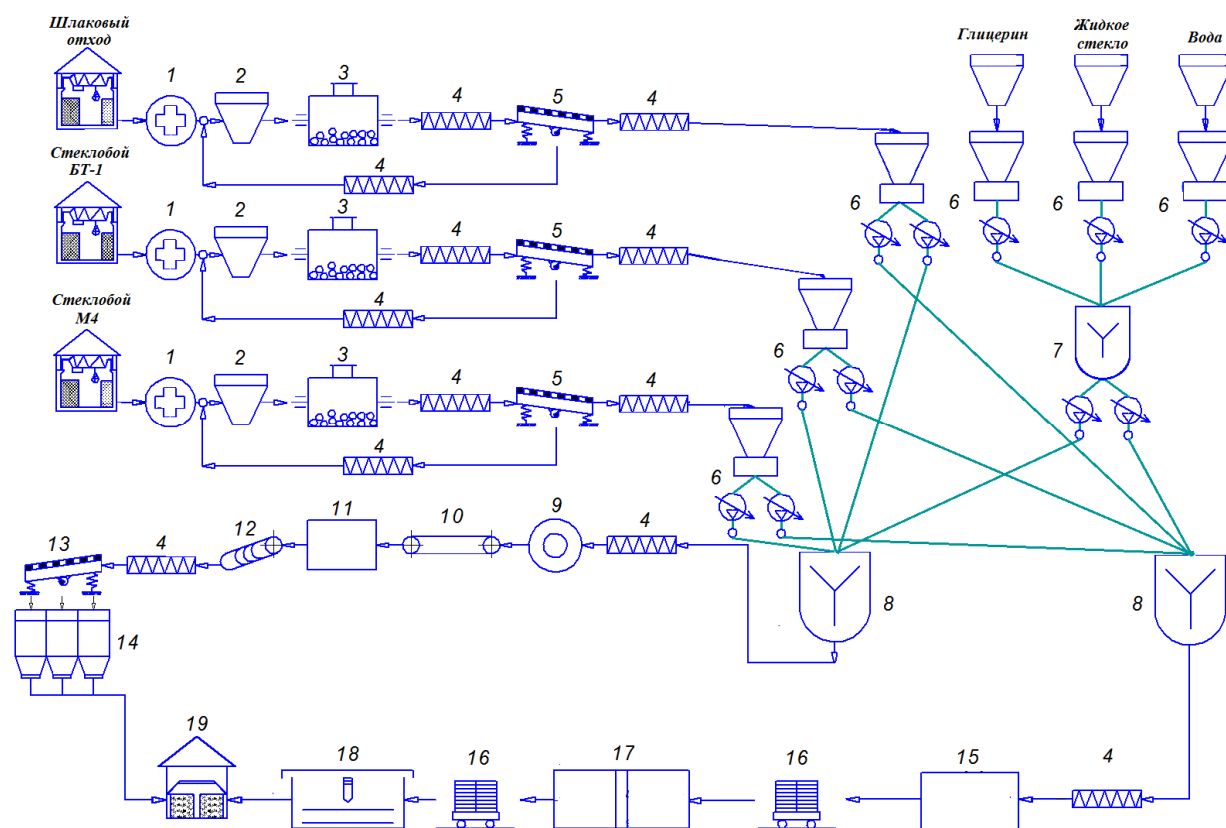


Рисунок 5.2 – Аппаратурно-технологическая схема производства изделий из пено-стекла:

1 – молотковая дробилка СМД-112А; 2 – накопительный бункер; 3 – шаровая мельница непрерывного действия МШН-2; 4 – шнековый питатель ОПР453.01.000; 5 – вибрационный грохот легкого типа ГВЛ-720; 6 – пневмовинтовой насос-дозатор ТФ-1; 7 – смеситель СВГ-3М; 8 – смеситель СБ-138Б; 9 – тарельчатый гранулятор ОТ-200; 10 – ленточный транспортер; 11 – барабанная печь вспенивания; 12 – барабанный холодильник 2,5-10; 13 – вибрационный грохот легкого типа ГВЛ-500; 14 – бункер для стеклоgravия искусственного пористого; 15 – гидравлический пресс PRD20NF; 16 – загрузочные стеллажи; 17 – туннельная печь обжига Kemei; 18 – автоматическая линия резки New Line 350; 19 – склад готовой продукции.

5.3 Экономические показатели производства изделий из пеностекла и оценка их конкурентоспособности

Целевыми сегментами рынка для изделий из пеностекла являются: крупнопанельное, монолитное и малоэтажное домостроение; теплоизоляция трубопроводов; дорожное строительство. Совокупный предполагаемый уровень спроса на продукцию должен составить более 800 тыс. м³, предполагаемый уровень продаж

для серийного производства определен в 130 тыс. м³. Объем реализации экспериментального производства составляет 50 тыс. м³. Себестоимость 1 тонны плит из пеностекла на основании проведенных расчетов калькуляции [115-118] представлена в таблице 5.1. Себестоимость 1 тонны пеностекольных гранул рассчитана аналогично таковой для плит и представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Калькуляция себестоимости плит из пеностекла

Статьи расходов	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Расход на ед., т	Затраты	
				на еди- ницу	на годовую программу
1 Сырьё и основные материалы:					
Шлаковый отход	т	30	0,34	10,2	472490,8
Стеклобой БТ-1	т	2100	0,34	714,0	33074357,8
Стеклобой М4	т	2000	0,22	440,0	20381957,2
Глицерин	т	45000	0,03	1350,0	62535550,5
Жидкое стекло	т	16000	0,04	640,0	29646483,2
Вода	т	30	0,03	0,9	41690,4
Итого основных материалов	-	-	-	3155,1	146152529,9
2 Топливо на технологические цели	т	3521,6	1,35	4768,2	220877713,7
3 Электроэнергия на технологические цели	кВт·ч	4,3	83,94	359,3	16642016,3
Итого энергетических расходов	-	-	-	5127,5	237519730,0
4 Основная заработная плата	руб.	-	-	219,7	10179000,0
4 Амортизация ОПФ	руб.	-	-	125,7	5821768,2
Итого производственная с/б	-	-	-	8628,0	399673028,2
5 Внепроизводственные расходы	руб.	-	-	172,6	7993460,6
Итого полная себестоимость	-	-	-	8800,6	407666488,7

Таблица 5.2 – Калькуляция себестоимости пеностекольных гранул

Статьи расходов	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Расход на ед., т	Затраты	
				на еди- ницу	на годовую программу
1 Сырьё и основные материалы:					
Шлаковый отход	т	30	0,34	10,2	472490,8
Стеклобой БТ-1	т	2100	0,34	714,0	33074357,8
Стеклобой М4	т	2000	0,22	440,0	20381957,2
Глицерин	т	45000	0,03	1350,0	62535550,5
Жидкое стекло	т	16000	0,04	640,0	29646483,2
Вода	т	30	0,03	0,9	41690,4
Итого основных материалов	-	-	-	3155,1	146152529,9
2 Топливо на технологические цели	т	3521,6	0,7	2384,1	110438856,9
3 Электроэнергия на технологические цели	кВт·ч	4,3	42,0	179,6	8321008,1
Итого энергетических расходов	-	-	-	2563,8	118759865,0
4 Основная заработная плата	руб.	-	-	219,7	10179000,0
4 Амортизация ОПФ	руб.	-	-	117,9	5461768,2
Итого производственная с/б	-	-	-	6056,5	280553163,1
5 Внепроизводственные расходы	руб.	-	-	121,1	5611063,3
Итого полная себестоимость	-	-	-	6177,6	286164226,4

Рассчитанные технико-экономические показатели комплекса по производству изделий из пеностекла представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Техничко-экономические показатели производства изделий из пено-стекла

Показатели	Пеностекольные гра-нулы	Плиты из пено-стекла
Себестоимость 1 тонны продукции, руб.	6177,6	8800,6
Отпускная цена 1 тонны продукции, руб.	7722,0	11000,7
Себестоимость 1 м ³ продукции, руб.	1235,527	1848,1
Отпускная цена 1 м ³ продукции, руб.	1544,408	2310,2
Индекс доходности, руб./руб.	1,9	1,6
Фондоотдача, руб./руб.	1,7	1,5
Период окупаемости, лет	4,2	4,7

Все показатели экономической эффективности соответствуют значениям, показывающим окупаемость и доходность проекта: период окупаемости менее 6 лет; индекс доходности и фондоотдача более единицы.

Также был проведен сравнительный анализ цен разработанных изделий с аналогами, представленный в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Сравнение цен изделий из пеностекла с аналогами.

Название материала	Средняя стоимость 1 м ³ , тыс. руб.
Гранулированный наполнитель	
Керамзит	1,7–2,2
Вспученный перлит	1,5–2,5
Вспученный вермикулит	4,0–6,0
Пенополистирол гранулированный	1,5–3,5
Пеностекло (гранулы)	3,5–5,0
<i>Пеностекольные гранулы</i>	<i>1,5</i>
Блоки, плиты, маты	
Пенобетон	2,9–4,2
Минеральная вата	1,3–4,5
Экструдированный пенополистирол	1,7–6,4
Пеностекло (плиты)	13,5–20,0
<i>Плиты из пеностекла</i>	<i>2,3</i>

Из таблицы видно, что разработанные изделия не уступают по стоимости рыночным аналогам. Таким образом, разработанные материалы и изделия из пеностекла обладают не только отличными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, а также полной экологической и пожарной безопасностью, но и низкой стоимостью, серьезно повышающей доступность данного материала для конечного потребителя при сохранении рентабельности производства.

5.4 Выводы

1. Учитывая технологические решения, применяемые на современном уровне науки, разработана технологическая схема производства изделий из пеностекла, включающая следующие стадии:

а) производство пеностекольных гранул: измельчение компонентов шихты; просев компонентов шихты; смешение шихты; грануляция шихты; термическая обработка гранул;

б) производство плит из пеностекла: измельчение компонентов шихты; просев компонентов шихты; смешение шихты; формовка шихты в плиту; термическая обработка плиты; механическая обработка плиты;

2. На основании разработанной технологической схемы произведен подбор технологического оборудования для строительства цеха по производству изделий из пеностекла (гранул и плит) производительностью 50 тыс. м³/год. Результаты расчетов показателей цеха по производству изделий из пеностекла свидетельствуют о его высокой экономической эффективности и рентабельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного 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 менее 0,16 мм.

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 70 ± 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. Предложены составы легкого бетона на основе пеностекольных гранул. Выбрано соотношение «цемент : гранулы : песок» = 1,5 : 1 : 1, соответствующий требованиям ГОСТ 25820-2014 для конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона при наименьшей плотности. Определены его основные физико-механические свойства: средняя плотность 595 кг/м³; прочность на сжатие 1,35 МПа; коэффициент теплопроводности 0,166 Вт/(м·К).

6. На основе теплотехнического расчета установлено, что стандартная панель (внешние слои – керамзитобетон плотностью 1800 кг/м³, внутренний слой – пенополистирол марки ПСБ-25) не удовлетворяет нормам поэлементных требова-

ний 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 стеклобоя 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Игнатова, О. А. Технология изоляционных строительных материалов и изделий. В 2 ч. Ч. 2. Тепло- и гидроизоляционные материалы [Текст]: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / О. А. Игнатова. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с.
- 2 Бобров, Ю. Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции [Текст]: Учебник. – 2-е изд., испр. и доп. / Ю. Л. Бобров, Е. Г. Овчаренко, Б. М. Шойхет, Е. Ю. Петухова. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 266 с.
- 3 Козаченко А. М. Общая технология производства древесных плит [Текст]: учебное пособие для ПТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. М. Козаченко, Б. Д. Модлин. – М: Высшая школа, 1990. – 144 с.
- 4 Зубехин, А. П. Основы технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов [Текст]: Учеб. пособие / А. П. Зубехин, С. П. Голованова, Е. А. Яценко [и др.]; под. ред. А. П. Зубехина. – М.: Издательство КАРТЭК, 2010. – 308 с.
- 5 Бубенков, О. А. Синтез мелкогранулированного пеностеклянного материала из природного аморфного оксида кремния с наноразмерной пористостью [Текст] / О. А. Бубенков, А. А. Кетов, П. А. Кетов [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. – 2010. – № 4. – С. 14-21.
- 6 Пучка, О. В. Композиционный теплоизоляционный материал с защитно-декоративным покрытием по лицевой поверхности [Текст] / О. В. Пучка, Н. И. Минько, М. Н. Степанова // Стекло и керамика. – № 2. – 2009. – С. 3–5.
- 7 Шутов, А. И. Пеностекло [Текст]: монография / А. И. Шутов, П. А. Воля, В. И. Мосьпан, С. В. Алексеев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 109 с.
- 8 Яценко, Е. А. Синтез теплоизоляционных материалов на основе шлаковых отходов ТЭС [Текст] / Е. А. Яценко, В. А. Рытченкова, О. С. Красникова [и др.] // Изв. Вузов. Сев.-Кавк. Регион. Техн. науки. – 2010. – № 2. – С. 59-62.
- 9 Демидович, Б. К. Пеностекло [Текст] / Б. К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с.

10 Китайгородский, И. И. Пеностекло, его свойства, производство и применение [Текст] / И. И. Китайгородский, З. А. Михайлова-Богданская. – М.: Промстройиздат, 1956. – 32 с.

11 Китайгородский, И. И. Пеностекло [Текст] / И. И. Китайгородский, Т. Н. Кешишян. – М.: Промстройиздат, 1953. – 132 с.

12. Саркисов, П. Д. Технический анализ и контроль производства стекла и изделий из него [Текст]: учеб. пособ. для техникумов / П. Д. Саркисов, А. С. Агарков. – М.: Стройиздат, 1976. – 22 с.

13. Смирнов, В. Г. Вязкость стекла [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Смирнов, М. А. Семин. – М.: МХТИ, 1987. – 84 с.

14. Мазурин, О. В. Стеклование и стабилизация неорганических стекол [Текст] / О. В. Мазурин. – Л.: Наука, 1978. – 62 с.

15 Семейных, Н. С. Анализ использования различных сырьевых компонентов в производстве гранулированного пеностекла [Текст] / Н. С. Семейных, Г. В. Сопегин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 60–74.

16 Вайсман, Я. И. Научные и технологические аспекты производства пеностекла [Текст] / Я. И. Вайсман, А. А. Кетов, П. А. Кетов // Физика и химия стекла. – 2015. – Т. 41, № 2. – С. 214–221.

17. Meyer, C. Recycled glass – from waste material to valuable resource [Текст] / C. Meyer // Proceedings of the International Symposium Recycling and Reuse of Glass Cullet. – London: Thomas Telford Ltd., 2001. – P. 1–10.

18. Кетов А. А. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя [Текст] / А. А. Кетов, И. С. Пузанов, Д. В. Саулин // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 70–72.

19 Lindgård, J. Alkali aggregate reactions in LWAC – introductory laboratory testing [Текст] / J. Lindgård, H. Justnes, M. Haugen, P. A. Dahl // SINTEF Report SBF52 F06004. – Trondheim, Norway, 2006. – Vol. 189. – P. 16.

20 Corinaldesi, V. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars [Текст] / V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, A. Montenero // Waste Management – 2005. – Vol. 25 (2). – P. 197–201.

21 Rivard, P. Assessing alkali–silica reaction damage with nondestructive methods: from the lab to the field [Текст] / P. Rivard, F. Saint-Pierre // Construction Building Material – 2009. – Vol. 23 (2). – P. 902–909.

22 Попов, М. Ю. Исследования щелочной коррозии в легких бетонах с поризованными заполнителями на основе отходов стекольной промышленности [Текст] / М. Ю. Попов, В. Е. Ваганов, В. В. Решетняк // Стародубовские чтения. – Днепропетровск, 2013. – С. 255–260.

23 Маневич, В. Е. Проблемы взаимодействия силикатных наполнителей с цементом [Текст] / В. Е. Маневич, Р. К. Субботин // Техника и технология силикатов. – 2012. – Т. 20. – № 2. – С. 2–7.

24 Казанцева, Л. К. Устойчивость пеносиликатных заполнителей к щелочам цемента [Текст] / Л. К. Казанцева, Ю. В. Серёткин, И. С. Пузанов // Стекло и керамика. – 2017. – № 10. – С. 36–42.

25 Саулин, Д. В. Исследование щелочесиликатного взаимодействия пеностекольных наполнителей с цементным вяжущим [Текст] / Д. В. Саулин, А. В. Рожкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2017. – № 1. – С. 89–105.

26 Шилл, Ф. Пеностекло [Текст] / Ф. Шилл. – М. : Стройиздат, 1965. – 327 с.

27 Пучка, О. В. Управление процессом структурообразования как фактор формирования стеклокомпозитов функционального назначения [Текст] / О. В. Пучка, С. С. Вайсера, В. С. Лесовик, С. В. Сергеев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 9. – С. 6–14.

28 Вайсман, Я. И. Кинетика расширения ячеистого стекла в термопластичном состоянии при гидратном механизме газообразования [Текст] / Я. И. Вай-

сман, А. А. Кетов, Ю. А. Кетов, М. Ю. Слесарев // Физика и химия стекла. – 2017. – Т. 43. – № 4. – С. 387-394.

29 Байджанов, Д. О. Теплоизоляционный материал на основе местного техногенного сырья [Текст] / Д. О. Байджанов, Ж. С. Нугужинов, В. И. Федорченко [и др.] // Стекло и керамика. – 2016. – № 11. – С. 40-43.

30 Казьмина, О. В. Свойства пеностекляного материала, модифицированного наноразмерным диоксидом циркония [Текст] / О. В. Казьмина, Б. С. Семухин, А. В. Вотинов, В. П. Казьмин // Стекло и керамика. – 2016. – № 11. – С. 3-6.

31 Лотов, В. А. Получение пеностекла на основе природных и техногенных алюмосиликатов [Текст] / В. А. Лотов // Стекло и керамика. – 2011. – № 9. – С. 34-37.

32 Казанцева, Л. К. Пеностекло из механоактивированных бедных цеолит-содержащих пород [Текст] / Л. К. Казанцева, Т. С. Юсупов, Т. З. Лыгина [и др.] // Стекло и керамика. – 2013. – № 10. – С. 18-22.

33 Самойленко, В. В. Влияние дисперсности стекольной шихты на структуру и свойства пеностекла [Текст] / В. В. Самойленко, Т. К. Углова, О. С. Татаринцева // Стекло и керамика. – 2014. – № 6. – С. 3-6.

34 Лотов, В. А. Использование методов фрактального анализа при оценке пористой структуры пеностекла [Текст] / В. А. Лотов, Н. А. Кузнецова, О. В. Казьмина // Стекло и керамика. – 2013. – № 7. – С. 3-6.].

35 Баженов, Ю. М. Технология бетона: Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов [Текст] / Ю. М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с.

36 Бужевич, Г. А. Лёгкие бетоны на пористых заполнителях [Текст] / Г. А. Бужевич. – М.: Стройиздат, 1970. – 202 с.

37 Машкин, Н. А. Строительные материалы. Краткий курс: Учеб. пособие [Текст] / Н. А. Машкин. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2012. – 200 с.

38 Иванов, И. А. Параметры, определяющие повышенную упругость конструкционного керамзитобетона [Текст] / И. А. Иванов, Т. Г. Сильванович // Легкобетонное домостроение. ЦНИИЭП жилища. – 1976. – С. 63–76.

39 Иванов, И. А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях [Текст] / И.А. Иванов. – М.: Стройиздат, 1993. – 182 с.

40 Спивак, Н. Я. Крупнопанельные здания из керамзитобетона [Текст] / Н. Я. Спивак, Д. К. Баулин, Н. С. Стронгин // Жилищное строительство. – 1971. – № 9. – С. 5–9.

41 Зоткин, А. Г. Бетоны и бетонные конструкции [Текст] / А. Г. Зоткин. – Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 335 с.

42 Пат. 2522359 Российская Федерация, МПК E04C2/38, E04B1/02. Элемент многослойной легкой строительной панели и способ его изготовления [Текст] / Дубатовка И. П, Твердохлебов Р. В.; заявители и патенообладатели – Дубатовка И. П, Твердохлебов Р. В., Дубатовка А. И., Доронина Ю. А. – № 2012135323/03; заявл. 17.08.2012; опубл. 27.02.2014.

43 Пат. 2307902 Российская Федерация, МПК E04C1/40, B28B1/00. Способ изготовления многослойной строительной панели [Текст] / Король Е. А., Николаев А. Е.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Московский государственный строительный университет». – № 2005139166/03; заявл. 15.12.2005; опубл. 10.10.2007.

44 Пат. 2515491 Российская Федерация, МПК E04B1/02, E04C1/40. Способ изготовления многослойных панелей, многослойная панель, раскладная опалубка для изготовления многослойных панелей, технологическая линия по изготовлению многослойных панелей, способ возведения монолитно-каркасного здания из многослойных панелей с декоративной наружной отделкой [Текст] / Семенов Д. К.; заявитель и патентообладатель – Семенов Д. К. – № 2012151601/03; заявл. 04.12.2012; опубл. 10.05.2014.

45 Пат. 2534208 Российская Федерация, МПК E04C1/40, B28B3/00. Способ производства встречным вибропрессованием теплоблока для возведения ограждающих конструкций, зданий и сооружений [Текст] / Кливзуник В. А.; заявитель и патентообладатель – Кливзуник В. А. – № 2012153641/03; заявл. 11.12.2012; опубл. 27.11.2014.

46 Пат. 2513945 Российская Федерация, МПК C04C2/00.Трехслойная панель и способ ее изготовления [Текст] /Жуков А. В., Гогин В. Л., Зайцев О.В., Мушенко В. Д.; заявитель и патентообладатель – ЗАО «Комплексный технический сервис». – № 2012138793/03; заявл. 03.08.2012; опубл. 20.04.2014.

47 Tosun, M. Modelling of a thermal insulation system based on the coldest temperature conditions by using artificial neural networks to determine performance of building for wall types in Turkey [Текст] / M. Tosun, K. Dincer // International Journal of Refrigeration. – 2011. –V. 34. – Is. 1. – P. – 362-373

48 Berber, A. Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of heating and cooling performances of counter-flow Ranque–Hilsch vortex tubes with different geometric construction for steel [Текст] / A. Berber, K. Dincer, Y. Yılmaz, D. Nur Ozen // Energy. – 2013. – V. 51. –, P. 297-304.

49 Tosun, M. Rule-based Mamdani-type fuzzy modelling of thermal performance of multi-layer precast concrete panels used in residential buildings in Turkey [Текст] / M. Tosun, K. Dincer, S. Baskaya // Expert Systems with Applications. – 2011. – V. 2. – P. 331-338.

50 Pérez-García, A. Building's eco-efficiency improvements based on reinforced concrete multilayer structural panels [Текст] / A. Pérez-García, A. G. Villora, G. G. Pérez // Energy and Buildings. – 2014. – V. 85. – P. 1-11.

51 Evangelisti, L. Assessment of equivalent thermal properties of multilayer building walls coupling simulations and experimental measurements [Текст] / L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, F. Asdrubali // Building and Environment. – 2018. – V. 127. – P. 77-85.

52 Mainini, A. G. Transparent Multilayer ETFE Panels for Building Envelope: Thermal Transmittance Evaluation and Assessment of Optical and Solar Performance Decay due to Soiling [Текст] / A. G. Mainini, T. Poli, R. Paolini [и др.] // Energy Procedia. – 2014 V. 48. – P. 1302-1310.].

53 Olmedo, F. I. Experimental Study of Multilayer Beams of Lightweight Concrete and Normal Concrete [Текст] / F. I. Olmedo, J. Valivonis, A. Cobo // Procedia Engineering. – 2017. – V. 172. – P. 808-815.

54 Jonaitis, B. Impact of moisture-temperature actions on character of behaviour of external layers of layered walls with flexible ties [Текст] / B. Jonaitis, G. Marciukaitis, J. Valivonis // 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques. – 2010. – P. 651-657.

55 Jokūbaitis, A. Influence of technological and environmental factors on the behaviour of the reinforcement anchorage zone of prestressed concrete sleepers [Текст] / A. Jokūbaitis, G. Marčiukaitis, J. Valivonis // Construction and Building Materials. – 2016. – V. 121. – P. 507-518.

56 Vaganov, V. Effect of CNT on Microstructure and Mineralogical Composition of Lightweight Concrete with Granulated Foam Glass [Текст] / V. Vaganov, M. Popov, A. Korjamins, G. Šahmenko // Procedia Engineering. – 2017. – V. 172. – P. 1204-1211.

57 Limbachiya, M. Performance of granulated foam glass concrete [Текст] / M. Limbachiya, M. Seddik, M. S. Fotiadou // Construction and Building Materials. – 2012. – V. 28. – Is. 1. – Pages 759-768.

58 Bumanis, G. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete [Текст] / G. Bumanis, D. Bajare, J. Locs, A. Korjamins // Construction and Building Materials. – 2013 – V. 47. – P. 274-281.].

59 Польской, П. П. Композитные материалы - как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений [Текст] / П. П. Польской, Д. Р. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 23. – № 4-2 (23). – С. 162.

60 Маилян, Д. Р. Работа керамзитобетонных колонн при повторных нагрузках [Текст] / Д. Р. Маилян, К. В. Кургин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 19. – № 1. – С. 558-561.

61 Давидюк, А. Н. Самоуплотняющиеся высокопрочные и легкие бетоны на пористых заполнителях для эффективных конструкций [Текст] / А. Н. Давидюк, Д. Р. Маилян, Г. В. Несветаев // Технологии бетонов. – 2011. – № 1-2. – С. 57-59.

62 Кургин, К. В. Совершенствование расчета прочности керамзитобетонных элементов со смешанным армированием [Текст] / К. В. Кургин, Д. Р. Маилян, А. М. Блягоз // Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2011. – № 4. – С. 18-24.

63 Хунагов, Р. А. Двухслойные железобетонные панели с неравномерно обжатými сечениями [Текст] / Р. А. Хунагов, Д. Р. Маилян, А. М. Блягоз // Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2011. – № 4. – С. 37-41.

64 Козлов, Г. А. Высокоэффективная стеновая керамика на основе пористопустотелого силикатного заполнителя [Текст] / Г. А. Козлов, В. Д. Котляр, А. В. Котляр // Научное обозрение. – 2014. – № 10-2. – С. 392-395.

65 Козлов, Г. А. Особенности получения эффективного пористого заполнителя из кремнистых пород ростовской области [Текст] / Г. А. Козлов, В. Д. Котляр, А. В. Козлов // Строительные материалы. – 2009. – № 6. – С. 88-89.

66 Дамдинова, Д. Р. Деревянно-каркасное домостроение как вариант малоэтажной застройки в республике Бурятия [Текст] / Д. Р. Дамдинова, Н. М. Ломова, К. Б. Лыкшитов, И. Ю. Баторова // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 84-91.

67 Урханова, Л. А. Перспективы развития малоэтажного жилищного строительства в республике Бурятия с использованием инновационных технологий домостроения [Текст] / Л. А. Урханова, Д. Р. Дамдинова, Р. Р. Беппле [и др.] // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 5 (44). – С. 108-112.

68 Дамдинова, Д. Р. Конструкционно-теплоизоляционная стеновая панель с использованием пеностеклового утеплителя [Текст] / Д. Р. Дамдинова, А. Б. Цыренов, Н. Н. Анчилов, В. Е. Павлов // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 2 (41). – С. 39-44.

69 Абрамов, А. К. Аглопорит, полученный из отходов углеобогащения, как заполнитель для легких бетонов [Текст] / А. К. Абрамов, В. И. Ефимов, И. Б. Никулин // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2013. – № 11. – С. 3-11.

70 Абрамов, А. К. Производство заполнителей для легких бетонов из отходов углеобогащения [Текст] / А. К. Абрамов, В. И. Ефимов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2013. – № 2. – С. 95-102.

71 Смолий, В. А. Разработка ячеистых стекломатериалов для синтеза теплоизоляционного и конструкционных слоев силикатного многослойного композиционного теплоизоляционно-декоративного материала [Текст] / В. А. Смолий, Е. А. Яценко, А. С. Косарев, Б. М. Гольцман // Научные технологии и инновации: сборник докладов международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 373-379.

72 Косарев, А. С. Технологические особенности получения ячеистого стекла, применяемого в качестве теплоизоляционного слоя в силикатном многослойном композиционном теплоизоляционно-декоративном материале [Текст] / А. С. Косарев, В. А. Смолий, Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман // Техника и технология силикатов. – 2016. – Т. 23. – № 4. – С. 2-7.

73 Yatsenko, E. A. Technological features of production of foamed glass applied as thermal insulating layer in silicate multilayer composite material for insulation and decoration [Текст] / E. A. Yatsenko, A. S. Kosarev, N. S. Karandashova [и др.] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Т. 11. – № 22. – С. 11076-11080.

74 Яценко, Е. А. Разработка ресурсосберегающей технологии многослойных теплоизоляционно-декоративных стеклокомпозиционных материалов для строительства энергоэффективных зданий [Текст] / Е. А. Яценко, В. А. Смолий, А. С. Косарев, Б. М. Гольцман // Новые материалы и технологии их получения: Материалы IX Международной научно-практической конференции. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – 2015. – С. 4-10.].

75 Яценко, Е. А. Основы технологии новых стекломатериалов и покрытий [Текст] : методические указания к лабораторным работам / Е. А. Яценко, Е. Б. Земляная, В. А. Смолий. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 26 с.

76 ГОСТ 9758-2012. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний [Текст]. – Введ. 2013-11-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 67 с.

77 ГОСТ EN 822-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Методы определения длины и ширины [Текст]. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 8 с.

78 ГОСТ EN 823-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения толщины [Текст]. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 12 с.

79 ГОСТ EN 1602-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности [Текст]. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 8 с.

80 ГОСТ 826-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Методы определения характеристик сжатия [Текст]. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 15 с.

81 ГОСТ EN 12089-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения характеристик изгиба [Текст]. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 12 с.

82 ГОСТ 25380-2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции [Текст]. – Введ. 2015-07-01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 11 с.

83 ГОСТ EN 12087-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Методы определения водопоглощения при длительном погружении [Текст]. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 12 с.

84 ГОСТ EN 12086-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения характеристик паропроницаемости [Текст]. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 19 с.

85 ГОСТ EN 12091-2011. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения морозостойкости [Текст]. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 12 с.

86 ГОСТ 30244-94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть [Текст]. – Введ. 2017-05-01. – М.: Стандартиформ, 2008. – 19 с.

87 ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов [Текст]. – Введ. 1995-01-01. – М.: Стандартинформ, 1995. – 11 с.

88 ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 35 с.

89 ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности [Текст]. – Введ. 1980-01-01. – М.: Стандартинформ, 1980. – 5 с.

90 ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме [Текст]. – Введ. 2000-04-01. – М.: Стандартинформ, 2000. – 27 с.

91 Яценко, Е. А. Изучение особенностей формирования пористой структуры пеношлакостекла при использовании глицериновой порообразующей смеси [Текст] / Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, В. А. Смолий [и др.] // Научные технологии и инновации (XXII научные чтения) : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., г. Белгород, 6-7 окт. 2016 г. / Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова – Белгород, 2016. – С. 478-482.

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

93 Жабрев, В. А. Межфазные реакции силикатной матрицы с фосфатными составляющими при формировании пеностекла [Текст] / В. А. Жабрев, С. В. Чупина, Е. В. Катенев // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2016. – № 33. – С. 8-12.

94 Яценко, Е. А. Влияние воды на вспенивание пеностекла с использованием комплексного порообразователя [Текст] / 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.

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

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

97 Yatsenko, E. A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerin Pore-Forming Mixture [Текст] / E. A. Yatsenko, B. M. Gol'tsman, A. S. Kosarev [и др.] // Glass Physics and Chemistry. – 2018. – Vol. 44. – № 2. – P. 152–155.

98 Яценко, Е. А. Синтез пеношлакостекла на основе глицериновой порообразующей смеси [Текст] / Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, А. С. Косарев [и др.] // Стекло: наука и практика - GlasSP2017 : сб. тез. Между-нар. конф., г. Санкт-Петербург, 6-8 июня 2017 г. / Ин-т химии и силикатов РАН – СПб. : ООО «Издательство «ЛЕМА», 2017. – С. 214-215.

99 Яценко, Е. А. Синтез пеностекол на основе комбинированных отходов промышленности [Текст] / Е. А. Яценко, В. А. Смолий, А. С. Косарев, [и др.] // Научное обозрение. – 2013. – № 8. – С. 65-70.

100 Яценко, Е. А. Investigation of the Factors Influencing the Properties and Structure of Foamed Slag Glass [Текст] / Е. А. Яценко, А. П. Зубехин, Б. М. Гольцман, [и др.] // Glass and Ceramics – 2014. – Т. 71 – № 3-4 – С. 111-114.

101 Гольцман, Б. М. Комбинирование шлаков при производстве теплоизоляционных материалов [Текст] / Б. М. Гольцман // Научное обозрение. – 2014. – № 6. – С. 75-78.

102 Яценко, Е. А. Опыт создания строительных материалов на основе зол и шлаков тепловых электростанций [Текст] / Е. А. Яценко, И. С. Грушко, Б. М. Гольцман // Научное обозрение. – 2014. – № 9. – С. 443-448.

103 Yatsenko, E. A. Application of Computer Technologies for Modeling the Process of Formation of the Porous Structure of Foamed Glass [Текст] /

E. A. Yatsenko, B. M. Gol'tsman, L. A. Yatsenko [и др.] // Glass and Ceramics. – 2017. – Vol. 74. – Is. 7-8. – P. 9-11.

104 Yatsenko, E. A. Investigation of flux influence on structure of foamed slag glass with a high content of slag waste [Текст] / E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, V. A. Smoliy, A. S. Kosarev // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Т. 7. – № 6. – С. 136-146.

105 Яценко, Е. А. Разработка составов и исследование свойств блочного и гранулированного пеностекла, изготовленного с использованием шлаковых отходов ТЭС [Текст] / Е. А. Яценко, В. А. Смолий, Б. М. Гольцман, А. С. Косарев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. – № 5. – С. 115-119.

106 Плотников, В. В. Современные технологии повышения теплозащиты зданий [Текст] / В. В. Плотников, М. В. Ботаговский. – Брянск: Брянская гос. инженерно-технологическая акад., 2010. – 199 с.

107 Гольцман, Н. С. Анализ способов получения многослойных строительных панелей [Текст] / Н. С. Гольцман, Б. М. Гольцман, Е. А. Яценко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2018. – № 1 (197). – С. 127-131.

108 Гольцман, Б. М. Исследование использования многослойных теплоизоляционных панелей в строительстве и анализ их энергоэффективности [Текст] / 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.

109 Теплоизоляция мостиков холода Информация по проектированию и укладке. Правила работы [Электронный ресурс]. URL: <http://tutteplo.ru/documents/STDmostiki.pdf>. Доступ – свободный. – (Дата обращения: 28.11.2017).

110 Сербинович, П. П. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Гражданские здания массового строительства. [Текст]: учебник для строительных вузов / П. П. Сербинович. – М.: Высшая школа, 1975. – 319 с.

111 Баженов, Ю. М. Технология бетона [Текст]: учебное пособие для вузов / Ю. М. Баженов. – М.: Высшая школа, 1987. — 415 с.

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

113 Теплотехнический калькулятор [Электронный ресурс]: URL: <http://www.smartcalc.ru/thermocalc>, доступ – свободный. – (Дата обращения: 28.11.2017).

114 Малявина, Е. Г. Теплотери здания [Текст]: справочное пособие / Е. Г. Малявина. – 2-е изд., испр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2011. - 144 с.

115 Методические указания по выполнению экономической части дипломных научно-исследовательских работ [Текст] / Т. А. Лозовская, Г. И. Сычева – Новочеркасск : НПИ, 1983 – 38 с.

116 Рекитар, Я. А. Экономика производства и применения строительных материалов [Текст] / Я. А. Рекитар. – М. : Высшая школа, 1972. – 302 с.

117 Моторина, А. Н. Методические указания к курсовой работе и экономической части дипломного проекта для студентов специальности «Технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» [Текст] / А. Н. Моторина. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2007. – 40 с.

118 Моторина, А. Н. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Экономика и управление производством» для студентов специальности «Технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» [Текст] / А. Н. Моторина, М. А. Комиссарова. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2007. – 40 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
 Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения
 Центр гигиены и эпидемиологии в Ростовской области
 Аккредитованный испытательный лабораторный центр

Юридический адрес: 344019, г. Ростов-на-Дону, 7-я линия, 67. ИНН/КПП 6167080156/616701001,
 ОКПО 76921470, ОКВЭД 85.14.5, р/с 40503810452001000005 в Юго-Западном банке СБ РФ г. Ростов-на-Дону
 БИК 046015602, корр./с 30101810600000000602. Телефон: (863) 251-04-92, факс: (863) 251-02-06

Аттестат аккредитации
 РОСС.RU.0001.510114
 Дата включения аккредитованного
 лица в реестр 01.10.2015 г.

УТВЕРЖДАЮ
 Главный врач
 ФБУЗ "ЦГиЭ в РО"

Айдинов Г.Т.

21.04.2016

М.П.



**ПРОТОКОЛ
 ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
 № 2407-В от 21.04.2016**

1. Наименование предприятия, организации (заявитель): Яценко Е.А.
2. Юридический адрес:
 Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 184, кв. 52
3. Наименование образца (пробы), дата изготовления:
 экспериментальный образец пеностеклогранул
4. Изготовитель (фирма, предприятие, организация): страна: Россия
5. Акт отбора №
 Ф.И.О., должность: образец отобран и доставлен заявителем
 Условия доставки: автотранспортом
 Доставлен в ИЛЦ: 16 час. 00 мин. 18.04.2016
6. Дополнительные сведения:
 Заявление № 01-13/1145 от 18.04.2016г. Измерения проводились на установке спектрометрической
 МКС-01А "Мультирад" зав. № 0904-Ар-Б-Г, свидетельство о поверке № 03-0269 до 04.06.2016г.
7. НД на метод отбора:
 -
8. НД на продукцию:
 -
9. НД регламентирующие объём лабораторных исследований и их оценку:
 Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим
 санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). Глава II. Раздел 11. Требования к продукции,
 изделиям, являющимся источником ионизирующего излучения, в том числе генерирующего, а
 также изделиям и товарам, содержащим радиоактивные вещества. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы
 радиационной безопасности (НРБ-99/2009)"

Код образца (пробы): 180416Р4921

Общее количество страниц: 2 Страница: 1

Настоящий протокол подлежит частичному или полному воспроизведению только с согласия ИЛЦ

№ п/п	Определяемые показатели	Результаты исследований; единицы измерения	Величина допу- стимого уровня; единицы измере- ния	НД на метод исследо- вания
<p align="center">Радиологические исследования</p> <p align="center">Образец поступил: 16 час. 00 мин. 18.04.2016г. Код: 188416Р4921</p> <p align="center">Регистрационный № в журнале: 38 № протокола испытаний: 2407-В</p>				
1.	Эффективная удельная активность природных радионуклидов Ra-226, Th-232, K-40	70±14 Бк/кг	Не более 370 Бк/кг (1 класс)	МИ ЦМНИ НПО «ВНИИФТРИ» Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения ПРОГРЕСС от 22.12.2003г.
<p>Результаты лабораторных испытаний распространяются на представленный образец.</p> <p>Ответственный за оформление данного протокола: Величко Н. Г., врач-лаборант </p> <p>Заместитель руководителя испытательного лабораторного центра:</p> <p>Руководитель испытательной лаборатории: Кульвеев И.П. </p>				

**Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения
Центр гигиены и эпидемиологии в Ростовской области
Аккредитованный испытательный лабораторный центр**


Юридический адрес: 344019, г. Ростов-на-Дону, 7-я линия, 67. ИНН/КПП 6167080156/616701001,
ОКПО 76921470, ОКВЭД 83.14.5, р/с 40503810452001000005 в Юго-Западном банке СБ РФ г. Ростов-на-Дону
БИК 046015602, корр./с 30101810600000000602. Телефон: (863) 251-04-92, факс: (863) 251-02-06

Аттестат аккредитации
РОСС.RU.0001.510114
Дата включения аккредитованного
лица в реестр 01.10.2015 г.

УТВЕРЖДАЮ
Главный врач
ФБУЗ "ЦГиЭ в РО"
Айдинов Г.Т.
21.04.2016
М.П.

**ПРОТОКОЛ
ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
№ 2408-В от 21.04.2016**

- 1. Наименование предприятия, организации (заявитель):** Яценко Е.А.
- 2. Юридический адрес:**
Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 184, кв. 52
- 3. Наименование образца (пробы), дата изготовления:**
экспериментальный образец теплоизоляционных плит из ячеистого стекла
- 4. Изготовитель (фирма, предприятие, организация):** страна: Россия
- 5. Акт отбора №** **Время и дата отбора:**
Ф.И.О., должность: образец отобран и доставлен заявителем
Условия доставки: автотранспортом
Доставлен в ИЛЦ: 16 час. 00 мин. 18.04.2016
- 6. Дополнительные сведения:**
Заявление № 01-13/1145 от 18.04.2016г. Измерения проводились на установке спектрометрической МКС-01А "Мультирад" зав. № 0904-Ар-Б-Г, свидетельство о поверке № 03-0269 до 04.06.2016г.
- 7. НД на метод отбора:**
-
- 8. НД на продукцию:**
-
- 9. НД регламентирующие объем лабораторных исследований и их оценку:**
Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). Глава II. Раздел 11. Требования к продукции, изделиям, являющимся источником ионизирующего излучения, в том числе генерирующего, а также изделиям и товарам, содержащим радиоактивные вещества. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)"

№ п/п	Определяемые показатели	Результаты исследований; единицы измерения	Величина допу- стимого уровня; единицы измере- ния	НД на метод исследо- вания
<p align="center">Радиологические исследования</p> <p align="center">Образец поступил: 16 час. 00 мин. 18.04.2016г. Код: 180416P4922</p> <p align="center">Регистрационный № в журнале: 39 № протокола испытаний: 2408-B</p>				
1.	Эффективная удельная активность природных радионуклидов Ra-226, Th-232, K-40	142±18 Бк/кг	Не более 370 Бк/кг (I класс)	МИ ЦМИИ НПО «ВНИИФТРИ» Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения ПРОГРЕСС от 22.12.2003г.
<p>Результаты лабораторных испытаний распространяются на представленный образец.</p> <p>Ответственный за оформление данного протокола: Величко Н. Г., врач-лаборант</p> <p>Заместитель руководителя испытательного лабораторного центра:</p> <p>Руководитель испытательной лаборатории: Кульвев И.П. </p>				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по НРiСР
ЮРГПУ (НПИ)
Ю.И. Разоренов
« 8 » февраля 2018 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Гольцман Н.С. «Пеностекольные материалы с применением вторичного сырья
и изделия на их основе»

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе декана ТФ, д.т.н., профессора Балакай В.И. заведующей кафедрой «Общая химия и технология силикатов», д.т.н., профессора Яценко Е.А., профессора кафедры «Общая химия и технология силикатов», к.т.н., профессора Головановой С.П., составила настоящий акт о том, что в проведении исследований диссертационной работы Гольцман Н.С. на соискание ученой степени кандидата технических наук принимали участие магистры кафедры при выполнении магистерских диссертаций Яценко Л.А. «Исследование процессов порообразования при синтезе стеклокомпозиционных пеноматериалов с применением современных компьютерных технологий», 2017 г; Кузьминой Ю.А. «Исследование влияния вида и количества порообразователей на структуру и свойства пеностекольных материалов», 2018 г.

Результаты исследований используются при подготовке студентов специальностей 18.03.01 «Химическая технология», 18.04.01 «Химическая технология» в проведении лекционных, научно-исследовательских, практических и лабораторных работ.

Декан Технологического факультета,
д.т.н., профессор
Зав. кафедрой «Общая химия
и технология силикатов», д.т.н., профессор
Профессор кафедры «Общая химия
и технология силикатов», к.т.н., профессор

 Балакай В.И.

 Яценко Е.А.

 Голованова С.П.

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО ИТЦ «ДонЭнергоМаш»



И.В. Русакевич

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Гольцман Н.С. «Пеностекольные материалы с применением вторичного сырья и изделия на их основе»

г. Ростов-на-Дону

«5» февраля 2018 г.

Комиссия в составе:

председатель	гл.н.с., к.т.н.	В.К. Иконников
и члены комиссии	инженер	А.Н. Лысов
	инженер	В.А. Безуглова


составила настоящий акт о том, что предложенные Гольцман Н.С. в диссертационной работе технологические решения были опробованы в ИТЦ «ДонЭнергоМаш» при получении опытно-промышленной партии пеностекольных гранул объемом 5 м³.

Комиссия установила:

1. Для получения пеностекольных гранул использовались шихтовый состав (шлаковый отход ТЭС – 22 мас.%, стеклобой БТ-1 – 34 мас.%, стеклобой М4 – 34 мас.%, порообразующая смесь – 10 мас.%) и режим обработки (температура вспенивания – 840 °С, время вспенивания – 10 минут), разработанные Гольцман Н.С.

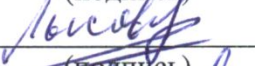
2. Испытания в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний» показали, что полученная продукция по технико-эксплуатационным свойствам соответствует марке М200 по ГОСТ 32497-2013 «Заполнители пористые теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия» и может быть использована в строительстве.

Гл.н.с., к.т.н.


(подпись)

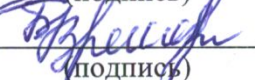
В.К. Иконников

Инженер


(подпись)

А.Н. Лысов

Инженер


(подпись)

В.А. Безуглова