

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии  
и биотехнологии

(Код и наименование направления подготовки/специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация технологического процесса производства пеностекла из  
отходов стеклобоя

Обучающийся

Т.С. Нестерова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М.В. Кравцова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023



**Росдистант**

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННО

## **Аннотация**

Объектом исследования в представленной работе является применение отходов стеклобоя в производстве пеностекла.

В работе представлен патентный обзор наилучших доступных технологий производства пеностекла из отходов стеклобоя. Проведенное исследование подчеркивает, что создание пеностекла из стеклобоя - процесс, доступный и без необходимости в дорогом оборудовании или больших финансовых вложениях.

В первой части исследования рассматриваются объемы стекла, образующегося в виде отходов, и его воздействие на окружающую среду. Также изучаются проблемы, возникающие при переработке стекла. Во второй части рассматривается выбор конкретной технологии для создания стеклобоя с последующим расчетом материального баланса. Третья часть посвящена выбору необходимого оборудования для процесса и расчету возможного экологического вреда, который может быть предотвращен. В завершении подводятся основные выводы и результаты исследования, отражающие влияние выбранной технологии на процесс создания пеностекла и её экологические аспекты.

Выпускная квалификационная работа состоит из 72 страниц, содержит 22 рисунка и 9 таблиц, а так же содержит 42 литературных источника.

## Содержание

Введение.....	5
1 Общая характеристика стеклянных отходов и их влияние на окружающую среду .....	8
1.1 Влияние стеклобоя как компонента твердых отходов на окружающую среду .....	8
1.2 Анализ состояния технологии производства пеностекла .....	11
1.3 Номенклатура продукции, состав сырья и свойства .....	12
1.4 Особенности производства пеностекла .....	15
1.5 Анализ технологий получения пеностекла .....	17
1.5.1 Использование отходов стекла для изготовления пеностекла.....	17
1.5.2 Технология производства гранулированного пеностекла .....	19
1.5.3 Одностадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм .....	21
1.5.4 Способ непрерывного вспенивания ленты пеностекла .....	22
1.5.5 Двухстадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм .....	25
1.6 Патентный поиск.....	29
1.6.1 RU 2 745 544 C1 Способ получения пеностекла .....	29
1.6.2 RU 124 905 U1 Пеностекло .....	30
1.6.3 RU 2 291 125 C2 Шихта для получения пеностекла .....	31
1.6.4 RU 2 526 452 C1 Способ производства гранулированного пеностекла из стеклобоя.....	33
1.6.5 RU 2 758 829 C1 Способ получения пеностекла .....	34
2 Расчётно-технологическая часть .....	37
2.1 Описание подготовки сырьевых материалов .....	37
2.2 Технологическая схема оптимизации процесса производства пеностекла из отходов стеклобоя и подбор оборудования.....	47
2.3 Материальный баланс.....	53

3 Оценка экологической техногенной нагрузки, формируемой отходами стекла.....	59
3.1 Ущерб от складирования отходов стекла в окружающей среде.....	63
3.2 Экономический эффект, достигаемый за счет устранения захоронения стекла.....	64
Заключение .....	66
Список используемой литературы и используемых источников.....	68

## Введение

Стекло является одним из материалов, которые представляют определенную проблему при утилизации и попадают на свалку. Оно не подвержено разложению и может загрязнять почву, если не перерабатывать или не захоронять должным образом. Некоторые типы стекла, такие как электронные или фторосодержащие стекла, требуют особого внимания при обращении с ними.

Однако применение отходов стекла для производства строительных материалов имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет сократить потребление природных ресурсов, так как использование стеклобоя позволяет заменить традиционные строительные материалы. Во-вторых, это помогает минимизировать выбросы парниковых газов, так как процесс производства стеклобоя для строительных материалов требует меньшего количества энергии по сравнению с производством традиционных строительных материалов.

Кроме того, использование стеклобоя в строительных материалах способствует устранению загрязнения окружающей среды отходами. Так как стеклобой не подвержен воздействию воды, атмосферных явлений и органических или минеральных организмов, его присутствие в строительных материалах не вызывает негативного влияния на окружающую среду.

Стеклобой составляет значительный процент твердых бытовых отходов в крупных городах России, оценивается в диапазоне от 8 до 18 процентов. Это общий объем отходов стекла, который генерируется каждый год и может составлять от 2,4 до 2,9 миллиона тонн. Если учесть, что количество твердых бытовых отходов в год на одного человека в России составляет от 400 до 700 кг, то для миллиона человек формируется от 60 до 100 тысяч тонн стеклобоя ежегодно [13].

Использование стеклобоя в производстве строительных материалов является наиболее рациональным решением с учетом соотношения объемов

производства и объемов образования отходов стекла. Особенно перспективным направлением является его применение в производстве пеностекла, что решает проблему утилизации стеклобоя.

Рынок использования пеностекла ожидает среднегодовой темп роста в размере 15 % к 2025 году. Это свидетельствует о высокой востребованности данного строительного материала и его значительном влиянии на отрасль.

Прогнозируется также значительный рост использования пеностекла в строительстве объектов инфраструктуры. Этот тренд подчеркивает расширение применения стеклобоя в различных сферах строительной деятельности [27].

Важным строительным продуктом из стеклобоя в строительстве является стеклотеплоизоляция, разработанная как эффективная замена обычной изоляции. Стоимость теплоизоляции ниже пенополиэтиленовой изоляции примерно на 30 %, при сохранении равных характеристик. Кроме того, её легкий вес снижает затраты на транспортировку материала, что делает её конкурентоспособной на рынке строительных решений [28].

В целом, использование стеклобоя в производстве строительных материалов не только решает проблему утилизации отходов стекла, но также предоставляет экономически выгодные и инновационные решения для строительной отрасли.

Таким образом, использование стеклобоя в строительных материалах представляет значимую задачу с точки зрения науки и техники. Решение этой проблемы способствует достижению существенного экономического и экологического воздействия. Взяв во внимание угрозу для окружающей среды, которую представляют неутраченные стеклянные отходы, их вторичное использование для производства строительных материалов, при этом используя технологию с минимальным образованием отходов, является актуальным и важным направлением.

ООО «ЭкоРесурсПоволжье» представляет собой экотехнопарк, специализирующийся на приеме коммунальных отходов для их последующей сортировки [29].

Целью работы является снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения количества отходов стекла, размещаемых на полигонах, и предложение эффективных способов их использования.

Задачи работы:

- провести литературный анализ в области переработки отходов стекла и способов эффективного использования вторичных продуктов из них;
- предложить оптимальную технологию переработки отходов стекла для производства пеностекла;
- выбрать оборудование и провести его расчет.

Все эти задачи в совокупности позволят достичь цели работы - снижения негативного воздействия на окружающую среду и разработке технических решений для использования стеклобоя в производстве пеностекла.

## **1 Общая характеристика стеклянных отходов и их влияние на окружающую среду**

### **1.1 Влияние стеклобоя как компонента твердых отходов на окружающую среду**

Количество отходов стекла оценивается в миллионы тонн ежегодно.

«В России доля стекла составляет для различных регионов от 3 до 8 % от массы всех твердых коммунальных отходов. В России отходы стекла преимущественно даже не сортируются, а поступают на полигоны твердых коммунальных отходов. Только в Московской области ежегодное поступление ТКО на полигоны составляет 13 млн. тонн. Доля стеклобоя в этом потоке составляет примерно 8 %, что соответствует 1,04 млн. тонн. В среднем по России ежегодное количество образующихся отходов составляет на человека примерно 400-700 кг, тогда суммарно для населения в 140 млн человек, количество образующегося стеклобоя в год составляет 8,4-14 миллиона тонн. Помимо выведения из оборота земель под полигоны ТКО, поверхность стекла выщелачивается водой и при этом в водные объекты попадают химические соединения» [32].

«Известно, что стеклобой, поступающий на полигоны, имеет различный дисперсный состав, а стекло в дисперсном состоянии подвергается активации с образованием на поверхности химически активной фазы (гидратированного оксида кремния)» [33].

«Допустимая величина выщелачивания стекла водой в пересчете на мг  $\text{Na}_2\text{O}$  с  $1\text{дм}^2$  находится в пределах 0,71–0,76» [34].

«Если принять среднюю толщину стекла 2,7- 3,3 мм, то среднюю величину выщелачивания следует взять на уровне 0,74 мг. Тогда тонна стеклобоя при средней плотности  $1300\text{ кг/м}^3$  будет при выщелачивании водой выделять 10,7 г  $\text{Na}_2\text{O}$  или 13,8 г чистой щелочи  $\text{NaOH}$ » [16].



«Так, утилизация 1 миллиона бутылок сохраняет 300 т кварцевого песка и 100 т кальцинированной соды, а использование стеклобоя в качестве вторичного сырья позволяет экономить на каждые 100 кг вводимого стеклобоя 126 кг первичного сырья» [15].

«Увеличение стеклобоя в шихте на каждые 10 % приводит к экономии топлива на 4,4 %, а электроэнергии на 1,1%» [1].

«Прежде всего, отходы стекла, попадая в окружающую среду способны оказывать травматологическое воздействие на любые живые организмы, включая человека. Однако специфический и неконтролируемый характер этой опасности в настоящий момент не может быть оценен даже приблизительно. Кроме того, попадая в окружающую среду отходы стекла подвергаются выщелачиванию водой атмосферных осадков. Вымываемые ионы могут попадать в грунтовые воды и негативно воздействовать на окружающую среду. Так из натрий-кальциевого стекла возможно вымывание ионов натрия и кальция, а из свинецсодержащего стекла – соединений свинца (Pb). В последнем случае проблема осложняется тем, что не существует надежной технологии вторичного использования свинецсодержащего стекла, а попадая на полигоны отходов соединений свинца (Pb) вымываются из стекла электроннолучевых трубок, где свинец (Pb) содержится в значительных количествах, и попадают в грунтовые воды. Наконец, вторичное использование отходов стекла позволяет снижать эмиссию оксида углерода (CO<sub>2</sub>), вследствие замены специально сваренного стекла или снижения температуры обработки материалов при использовании отходов стекла, как плавня» [2].

«При изготовлении новой тары из стекла с использованием стеклобоя, имеются строгие требования к качеству будущей тары, таких как банки и бутылки. Однако, процесс очистки «вторичного стекла» может быть сложным и дорогостоящим, иногда даже невозможным» [6]. Вывоз стеклобоя на свалки и полигоны является неэффективным способом утилизации стеклобоя, учитывая его долгий период разложения и необходимость

большой площади для захоронения стеклянных отходов. Выбирая способ утилизации и переработки стекольных отходов, необходимо учитывать, что предлагаемое технологическое решение будет затрагивать экологические, экономические и социальные аспекты. Одним из потенциальных решений может быть использование стеклобоя в процессе производства асфальта. Такая технология позволяет включить стеклобой в состав дорожного покрытия, что не только уменьшает его использование, но и придает дорогам дополнительную прочность и долговечность. Это экологически выгодное решение, поскольку снижает потребность в добыче новых материалов и уменьшает объем отходов, отправляемых на свалку. Кроме того, исследования показывают, что стеклобой может быть использован в производстве изоляционных материалов. Он может быть добавлен в состав стекловолокна, пенопласта и других материалов, что повышает их теплоизоляционные свойства и снижает потребление энергии для отопления и охлаждения зданий. Такое использование стеклобоя не только сокращает количество отходов, но и способствует энергосбережению и снижению выбросов парниковых газов. Кроме того, существуют и другие инновационные методы переработки стеклобоя, такие как его использование в производстве стеклофибровых материалов для укрепления бетона или создания новых строительных материалов. Эти подходы позволяют максимально использовать потенциал стеклобоя и снизить его негативное воздействие на окружающую среду. В целом, поиск наиболее эффективных технологических решений для вторичного использования стеклобоя является важной задачей с точки зрения экологии, экономики и социальной ответственности. Применение инновационных методов и технологий может помочь сократить количество отходов, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду и создать устойчивые и экологически чистые решения для использования стеклобоя. На рисунке 1 представлен жизненный цикл стекла.

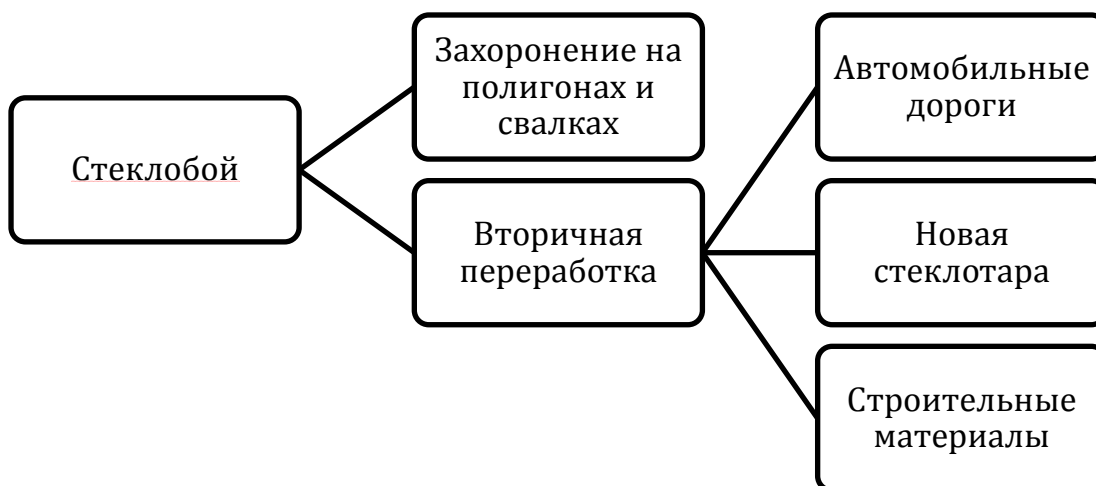


Рисунок 1 – Жизненный цикл стеклянной тары

## 1.2 Анализ состояния технологии производства пеностекла

Впервые понятие «пеностекло» было озвучено на конференции по стандартизации и материалам в 1932 году в Москве. Основателем данной технологии был академик И.И. Китайгородский. В докладе ученый представил инновационную технологию по получению пеностекла в теоретическом формате.

В промышленном масштабе пеностекло стали выпускать в Украине на заводе «Автостекло» в 1939 году. С 1930 года многие страны пытались запатентовать данную технологию, но в связи с тем, что шла Вторая мировая война, никому не удалось внедрить свои технологии в производство.

Во время Великой отечественной войны все наработки были заброшены, несмотря на то, что пеностекло имело хорошие и уникальные свойства. На сегодняшний день пеностекло производят в Пермской и Красноярской областях [35].

В советское время существовала нехватка стекольного сырья для получения пеностекла, главным образом из-за использования специально сваренного стекла. В настоящее время производство пеностекла осуществляется из смеси, включающей стекло, причем использование боя стекла становится распространенным. Однако, для обеспечения качества

продукции, требуется специализированное оборудование и высокая удельная поверхность помола стекла.

Проблемы с использованием боя стекла включают неоднородность химического состава и высокие затраты энергии при варке стекла. В связи с этим, исследователи искали альтернативные природные сырьевые источники, такие как нефелиновые сиениты. Множество разработок по оптимизации составов сырьевой смеси остались на уровне лабораторных и полупромышленных исследований.

### 1.3 Номенклатура продукции, состав сырья и свойства

В качестве сырья для получения пеностекла служит стеклобой листового и бутылочного стекла. Химический состав применяемых материалов указан в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав боя стекла, мас. %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
71,7-72,4	1,75-2,05	0,06-0,12	6,7-7,1	3,9-4,3	13,4-15	0,58-1,5	0,4-0,5

В федеральном классификационном каталоге отходов боя стекла имеет код 3 41 901 01 20 5. Относится к 5 классу опасности [3].

Каждый год в Самарской области образуется около 1600 тонн стекольного сырья, которое можно использовать при вторичном производстве. В зависимости от состава стекла различаются цвета стеклотары. Наибольший процент приходится на прозрачное и коричневое стекло. При поступлении стеклобоя от потребителя, стекло загрязнено в среднем на 20 %. К загрязнениям относят цветной и черный металл, пластик, полиэтилен и органические остатки. Количество и процентное содержание исходного сырья представлено в таблице 2. Состав стеклобоя представлен как смешанный и несортированный, с неопределенным размером, присутствуют различные загрязнения разного характера [8].

Если в известково-натриевое стекло добавить  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , то стекло окрасится в изумрудно-зеленый цвет, а при введении сероуглерода или  $\text{MnO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  стекло приобретает коричневый оттенок.

Таблица 2 – Количество и процентное содержание исходного сырья

Год	Стекло						
	Прозрачное		Зеленое		Коричневое		Всего
	т/год	%	т/год	%	т/год	%	
2020	668	45	221	15	587	40	1476
2021	686	38	265	15	876	47	1827
2022	570	35	258	16	822	49	1650
Среднее значение	641	39	248	15	762	46	1651

«Пеностекло выпускают в форме блоков, плит и гранул.

Характеристики пеностекла:

- длина - от 200 до 475 мм (с интервалом 25 мм);
- ширина - от 125 до 400 мм (с интервалом 25 мм);
- толщина - 60,80,100,120 мм;
- объемный вес - 150-250 кг/м<sup>3</sup>;
- плотность пеностекла - 110-200 кг/м. куб.;
- пористость - 80-95 %;
- размеры пор - от 0.1 до 2-3 мм;
- сорбционная влажность пеностекла - 0,2-0,5 %, при  $\phi=97$  %;
- теплопроводность пеностекла - 0,04-0,08 Вт/(м·К) (при +10 °С);
- паропроницаемость пеностекла - 0-0,005 мг/(м.ч.Па)» [4];
- «предел прочности на сжатие - 0,7-4 МПа;
- предел прочности на изгиб - 0,4-0,6 МПа;
- температура начала деформации пеностекла – 450 °С;
- водопоглощение пеностекла 0-5 % от объёма;
- шумопоглощение: до 56 Дб;
- воздухопроницаемость – 0;

- кислотнoупорнoсть – устойчив к воздействию кислот и их паров;
- горючeсть – абсолютно негорючий материал, не выделяет токсических веществ;
- срок службы – неограниченно;
- эффективный диапазон температур: от  $-260^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$  [30]».

Основная идея заключается в том, что пеностекло обладает уникальными эксплуатационными характеристиками. Оно обеспечивает высокую тепло- и звукоизоляцию, а также обладает прочностью, долговечностью и морозостойкостью. Этот материал безопасен с экологической и гигиенической точек зрения, не горит, не выделяет токсичных газов, не привлекает грызунов, устойчив к кислотам и плесени. Основное преимущество пеностекла заключается в сохранении своих свойств на протяжении десятков лет, что является уникальной характеристикой среди других теплоизоляционных материалов.

В строительстве пеностекло используется для утепления стен, перекрытий, холодильных установок, производственного оборудования и трубопроводов. Оно допускается к применению на атомных станциях. Гранулированное пеностекло применяется для утепления кровли, чердачных перекрытий и в качестве засыпного материала для стен. Благодаря своей структуре пеностекло хорошо соединяется с другими строительными материалами при помощи обычных вяжущих веществ, таких как цемент.

Эффективность применения пеностекла в строительстве проявляется в сравнении с красным кирпичом. Для достижения аналогичного уровня теплоизоляции требуется значительно меньше пеностекла по весу - всего лишь 1 тонна пеностекла может заменить около 80 тонн или более 25 000 кирпичей. Это свидетельствует о значительной экономии материала при использовании пеностекла в качестве утеплителя. В таблице 3 представлены характеристики пеностекла.

Таблица 3 – Характеристики пеностекла

Марка по плотности	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа (кг/см <sup>2</sup> ), не менее		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), не более	Водопоглощение по объему, %	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Морозостойкость, циклов, не менее
		при сжатии	при изгибе				
100	100-120	0,5 (5)	0,1 (1)	0,043	2-20	0-0,2	50
150	121-170	0,7 (7)	0,2 (2)	0,053			
200	171-220	1,2 (12)	0,3 (3)	0,063			
250	221-270	1,7 (17)	0,4 (4)	0,073			

#### 1.4 Особенности производства пеностекла

Технология производства пеностекла зависит от свойств стекла, его аморфной структуры, которая определяет физико-технические характеристики готового материала и параметры производственного процесса. Стекло, как аморфное твердое тело, формируется при охлаждении расплава, и его аморфность сказывается на изотропности, статистическом характере структуры и постепенности изменений свойств в процессе перехода от жидкого состояния к твердому и обратно [4].

Стекло, как аморфное твердое тело, формируется при переохлаждении расплава, и его аморфность связана с тем, что в стекле отсутствует дальний порядок в распределении атомов, но при этом ближний порядок может быть установлен. Существует три важные характеристики аморфного стекла:

- «изотропность: свойства вещества не зависят от направлений изменения этих свойств в ненапряженном состоянии» [4];
- «статистический характер структурных параметров: даже в пределах одной координационной сферы расположение частиц в стекле не так упорядочено, как в кристалле. Искажения в каждой координационной сфере различны, что приводит к изменчивости расстояний и углов между атомами» [17];
- постепенность и непрерывность перехода состояний: Процесс перехода из жидкого в твердое состояние и обратно происходит

постепенно, без резких скачков свойств, характерных для кристаллических процессов.

«В настоящее время сложные температурно-временные изменения свойств стекол во время термообработки наилучшим образом описываются при помощи кинетической теории стеклования» [34]. Теория основана на двух ключевых положениях:

- равновесная структура жидкости изменяется при изменении температуры;
- новая структура устанавливается не сразу после изменения температуры, зависит от степени неравновесности и вязкости жидкости.

Свойства стекла сильно меняются при изменении его структуры, что создает сложности в процессе производства пеностекла. Основная задача при изготовлении пеностекла - получить материал с равномерно распределенными порами.

Использование кинетической теории стеклования: Основана на изменении равновесной структуры жидкости при изменении температуры.

Порошковый способ производства пеностекла: Молотое стекло и газообразователь вводят в формы, нагревают, вспенивают и охлаждают. Этот способ обеспечивает равномерную структуру пеностекла.

Кинетика процесса: Вязкость и поверхностное натяжение стекла влияют на процесс вспенивания. Газы, образующиеся при термическом разложении газообразователя, формируют поры в стекле [5].

Влияние параметров: Вязкость, поверхностное натяжение, и давление газовой фазы играют важную роль в процессе порообразования.

К преимуществам порошкового способа относятся контроль параметров (температурно-временной режим можно корректировать в зависимости от геометрии форм для вспенивания сырьевой смеси) и математическое моделирование (необходимость в разработке математических методов для моделирования процессов тепломассопереноса



в камере печи, чтобы предсказать динамику профиля температуры на различных этапах обработки).

## **1.5 Анализ технологий получения пеностекла**

### **1.5.1 Использование отходов стекла для изготовления пеностекла**

Использование пеностекла дает множество преимуществ по сравнению с другими строительными материалами. Пеностекло выделяется среди изоляционных материалов своими уникальными свойствами, которые пользуются широким признанием в технике и строительстве. Важнейшие характеристики этого материала включают:

- малый вес: пеностекло имеет низкую плотность, что делает его легким и удобным для использования;
- низкое водопоглощение: материал обладает низкой способностью впитывать воду, что делает его устойчивым к влажным условиям;
- низкая теплопроводность: пеностекло обладает хорошей теплоизоляцией, что позволяет снижать потери тепла и снижать энергозатраты;
- устойчивость к агрессивным средам: материал сохраняет свои свойства даже при воздействии агрессивных химических веществ;
- огнестойкость: пеностекло обладает высокой устойчивостью к огню, что делает его безопасным в случае возгорания.

Все эти качества делают пеностекло прекрасным выбором для различных приложений.

Изготовление пеностекла прошло через ряд изменений и улучшений, особенно в России. Сегодня в большинстве стран, включая Россию, применяется порошковый метод производства пеностекла. Этот метод включает в себя следующие этапы:

- раздельное вспенивание блоков: сырьевая смесь, содержащая молотое стекло и газообразователь, подвергается вспениванию в

жаростойких формах;

- отжиг в конвейерных печах: вспененные блоки подвергаются термической обработке в специальных печах.

Новые подходы к производству пеностекла осуществляются в разных странах мира с целью повышения его качества и равномерной структуры. Однако, наряду с этим, основное внимание уделяется также снижению себестоимости его производства. Ведутся исследования по разработке новых вспенивателей и возможности использования стеклобоя для этой цели.

«В России уже разработана и опробована технология производства пеностекла на основе стеклобоя и известкового молока, а в США был предложен метод, использующий различные вещества в качестве вспенивателей, включая карбонаты лития, бария, калия, стронция, доломит, а также отходы от очистки сточных вод и экскременты домашнего скота и птицы. Эти исследования возможно помогут улучшить технологию производства пеностекла, делая его более доступным и экономически выгодным материалом» [44].

Используемые материалы для получения пеностекла:

- стеклобой тарного стекла различных цветов;
- примеси: Fe – 0,1–3 %, Сн – 0,1–2 %;
- другие металлы – 0,1–1 %;
- целлюлоза — 0,1–1 %;
- другие органические вещества — 0,1–1 %;
- вспенивающий агент (5–10 вес.%);
- наполнители, не препятствующие вспениванию;
- пигменты.

Технология производства заключается в следующих этапах:

- подготовка смеси: измельченный стеклобой тарного стекла смешивается с указанными примесями. К полученной смеси добавляется вспенивающий агент в диапазоне 5–10 вес.%;
- нагрев и спекание: смесь подвергается нагреву при температуре 500–

1000° С до размягчения и спекания стекла. В процессе нагрева действует пенообразователь;

- регулирование степени вспенивания: для получения материала с плотностью 0,1–2,0 г/см<sup>3</sup> степень вспенивания регулируется;
- введение наполнителей и пигментов: в смесь могут быть введены наполнители, не препятствующие вспениванию, и пигменты для окрашивания;
- характеристики полученного материала: непроницаемость для воды и газа; негорючесть; отсутствие запаха; легкость окрашивания и податливость механической обработке; хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства.

Применение полученного материала:

- плиты размерами 300х300х25 мм;
- по сравнению с обычным кирпичом почти в 6 раз дешевле, в 5 раз легче, подходит для замены кирпича, шлаковых блоков, кровельных работ, изоляции стен, потолков и других элементов зданий.

«При дополнительной разработке в университете штата Юта (США) были предложено использование стеклобоя, обработанного реагентами. Обработка проходила в автоклаве при температуре 390 °С и давлении 76 кгс/см<sup>2</sup>. Далее охлаждение до комнатной температуры и последующий нагрев в печи до температуры 1100 °С. При этом взаимодействие гидроксильных групп с образованием водяного пара вызывало вспенивание стекла» [38]-[42].

### **1.5.2 Технология производства гранулированного пеностекла**

Технология производства гранулированного пеностекла – это процесс создания мелких гранул или шариков из пеновидного стекла. Ниже описан общий обзор этой технологии:

- подготовка сырья;
- смешивание и формование;
- вспенивание и обработка;
- охлаждение и закрепление;

– гранулирование.

Таким образом, предложенный новый технологический процесс обеспечивает получение гранулированного теплоизоляционного материала по одностадийной схеме, исключая этап предварительной варки стекла или использование стеклобоя. Это позволяет использовать аморфное кремнеземистое сырье, такое как диатомиты, трепелы, техногенный кремнезем и другие, в качестве основного компонента.

Технологический процесс:

- а) подготовка исходного сырья: сушка и механоактивация сырья;
- б) формирование компонентов: дозирование, смешение и увлажнение компонентов;
- в) образование материала: получение гидратированных полисиликатов;
- г) гранулирование: процесс формирования гранул;
- д) вспенивание: проведение при температуре 350–450 °С с выделением парами воды;
- е) классификация: сортировка гранул по размеру;
- ж) характеристики полученного материала:
  - 1) насыпная плотность: 80–180 кг/м<sup>3</sup>;
  - 2) водостойкость: 0,9–1,2 мг/см<sup>3</sup>;
  - 3) прочность на раздавливание: 0,4–1,5 МПа;
  - 4) отсутствие запаха и эмиссии вредных веществ;
  - 5) негорючесть (класс НГ);
  - 6) биологическая устойчивость.

Особенности технологии:

- преодоление недостатка пеноматериалов в низкой химической стойкости к воде;
- возможность изменения размеров гранул в широких пределах (от 0,5 до 30 мм);
- существенно меньшая температура вспенивания по сравнению с пеностеклом;

– отсутствие стадии отжига.

Применение материала:

– утепление и звукоизоляция;

– заполнители для легких бетонов;

– теплые и saniрующие штукатурные смеси, и кладочные растворы;

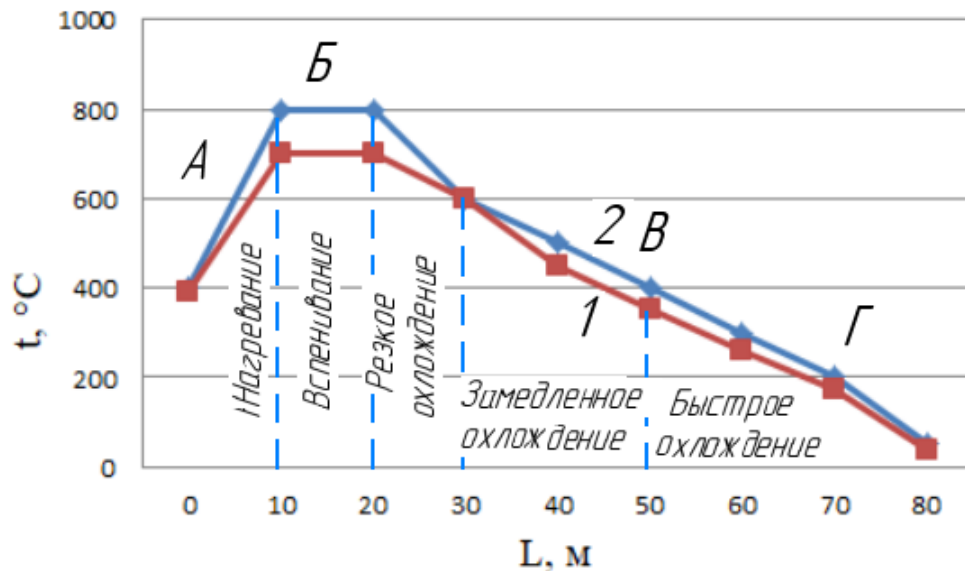
– основа для легковесных плит и скорлуп для термоизоляции оборудования;

– перспективное использование в качестве сорбента и фильтрующей среды.

### **1.5.3 Одностадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм**

«В ряде исследований детально раскрыты особенности технологии производства пеностекла по одностадийному методу. В настоящее время эта технология остается практически неизменной, хотя ее разработка началась в 1953 году на Гомельском стеклозаводе в СССР [14], [32].

Суть технологии заключается в следующем: сырьевая смесь засыпается в металлические формы и подвергается термической обработке в одной туннельной печи. Для повышения производительности увеличивается количество ярусов для размещения форм. Температурный режим печей Гомельского стеклозавода представлен на рисунке 2» [30].



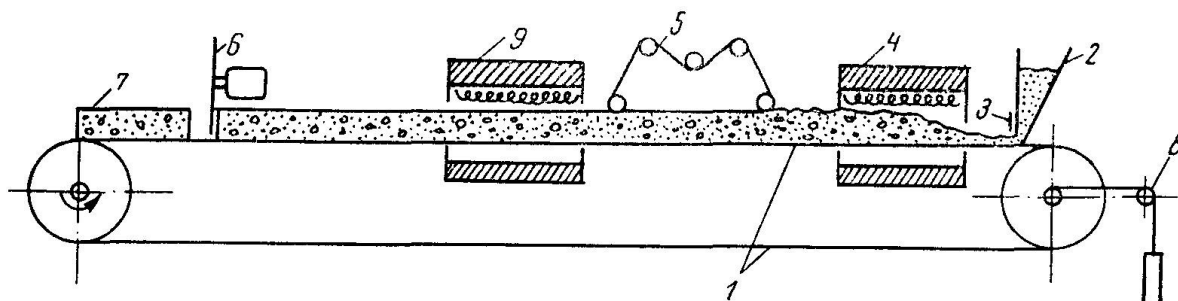
1 – газообразователь – антрацит; 2 – торфяной полукокс

Рисунок 2 – Температурные кривые туннельной печи Гомельского стеклозавода (1957 г.)

Таким образом, одноступенчатая технология может быть использована только при одноярусном размещении форм. Но при этом себестоимость готовой продукции увеличится.

#### 1.5.4 Способ непрерывного вспенивания ленты пеностекла

Ученые И.И. Китайгородской и Б.И. Борисов [41] разработали метод непрерывного вспенивания ленты пеностекла. В данной технологии получалось пеностекло толщиной до 6 см. На рисунке 3 изображена схема конвейерной установки, используемой для этого процесса. Ученые разработали конструкцию конвейера, которая выглядела очень просто, однако технические сложности не позволили применить ее в промышленных масштабах.



1 – стальная лента; 2 – расходный бункер; 3 – питатель; 4 – печь вспенивания электрическая; 5 – устройство для выравнивания наружной поверхности ленты пеностекла; 6 – отрезной механизм; 7 – блок пеностекла; 8 – натяжной механизм; 9 – печь отжига.

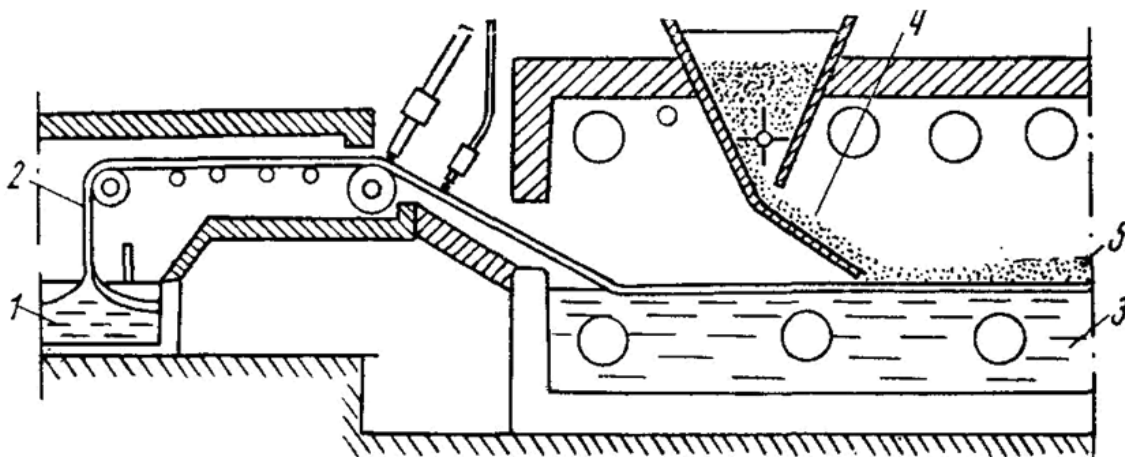
Рисунок 3 – Схема конвейерной установки для непрерывного вспенивания ленты пеностекла

В своем объемном тексте автор рассматривает различные методы уменьшения влияния гидростатического давления столбика расплава стекломассы, которое возникает в результате неравномерного нагрева материала в вертикальной плоскости. Одним из предлагаемых подходов является повышение градиента температуры по вертикали в пределах стекломассы. Этот метод направлен на устранение неравномерности нагрева и уменьшение влияния гидростатического давления на расплав. Повышение градиента температуры позволяет эффективнее контролировать процесс и достичь более равномерного нагрева стекломассы по всей высоте. Такой подход способствует сокращению рисков возникновения неоднородностей в расплаве, повышению качества конечного продукта и оптимизации производственных процессов.

Однако непрерывный способ вспенивания имеет существенный недостаток - сложность регулирования температуры на различных частях процесса. Это приводит к термической деструкции материала и появлению внутренних напряжений в разных участках, что делает материал хрупким и может привести к его разрушению.

Отсутствие стабилизации в зоне обработки создает трудности при последующей обработке материала, такой как распиловка на блоки и их удаление с поддонов. В статье также упоминается другой метод

непрерывного вспенивания, описанный в работе. Этот метод основан на использовании тепла от раскаленного металла для вспенивания сырьевой смеси, как показано на рисунке 4.



1 – емкость для стекломассы; 2 – лента стекла; 3 – расплавленный металл; 4 – пенообразующая смесь; 5 – пеностекло.

Рисунок 4 – Схема получения пеностекла методом плавающей ленты

«На производственной линии происходит передвижение слоя стекломассы, который наносится поверх раскаленного металла с использованием газообразователя. После вспенивания стекломассы температура понижается, что приводит к консолидации структуры материала. В результате получается панель из пеностекла толщиной до 6 см, прочно соединенная с основой из плотного стекла, толщиной менее 1 см» [24]. Однако этот метод имеет один недостаток - поскольку тепло подается снизу, возможна формировка пеностекла небольшой толщины. Прогреть толстый слой стекломассы сложно без воздействия на структуру пеностекла. Однако обработка механически менее трудоемка и экономически более выгодна для пеностекла меньшей толщины.

Для того чтобы улучшить метод непрерывного производства пеностекла, необходимо оптимизировать конструкционные характеристики теплоустановок.



«При этом необходимо учесть возможные изменения реологических свойств пеномасс в зависимости от их структуры, давления газов внутри ячеек, температуры и характеристик температурного процесса вспенивания и формования пеностекла, а также конфигурации ленты и оптимальных размеров в поперечном сечении» [27].

### **1.5.5 Двухстадийный порошковый способ производства пеностекла с применением форм**

«Сущность производства блочного пеностекла порошковым двухстадийным способом заключается в следующем: в туннельную печь по керамическим роликам подается пенообразующая смесь, находящаяся в форме, представленной на рисунке 5» [14].



Рисунок 5 – Загрузка пенообразующей смеси в формы

«В первой печи происходит нагрев, спекание, вспенивание и стабилизация (рисунок 6), затем происходит извлечение из форм блоков из пеностекла (рисунок 7). Пустые формы по конвейерной ленте возвращаются на этап разгрузки пенообразующей смеси (рисунок 8), а извлеченные блоки перемещаются в печь отжига (рисунок 9)» [29].



Рисунок 6 – Элемент печи нагрева, спекания, вспенивания и стабилизации



Рисунок 7 – Этап извлечение блоков пеностекла из форм



Рисунок 8 – Общий вид конвейерной ленты, необходимой для возвращения форм на этап разгрузки пенообразующей смеси



Рисунок 9 – Общий вид печи отжига

В процессе образования пеностекла, продолжающегося всего 80–90 минут, выделяются три ключевые фазы, определяемые распределением температур вдоль печи:

а) подогрев и спекание пенообразующей смеси:

- 1) пенообразующая смесь, обладающая низкой теплопроводностью, подвергается длительному нагреву до температуры спекания (примерно 10 минут для формы площадью  $0,25 \text{ м}^2$ );

2) при достижении температуры около 600 °C начинается спекание смеси с сильным уменьшением объема, сопровождаемым образованием трещин;

б) вспенивание:

3) усадка начинается в областях максимальных температур, например, от стен формы;

4) спекающийся слой стекла растрескивается на куски неправильной формы и величины;

5) после спекания блоки перекладывают в туннельную печь для стабилизации;

в) стабилизация готового пеностекла:

6) целесообразно поддерживать температуру спекания ниже температуры вспенивания до полного спекания массы;

7) повышение температуры вспенивания ведет к увеличению объема кусков и их соединению, формируя более однородное пеностекло;

г) влияние формы и размеров кусков:

8) неравномерные формы и размеры кусков приводят к неравномерному образованию ячеек в пеностекле;

9) трещины и пустоты могут возникнуть в местах больших размеров трещин;

10) близкое расположение кусков может создать более плотное пеностекло в результате перекрытия центра ячеек.

Все эти факторы подчеркивают важность тщательного контроля процесса образования пеностекла для достижения более однородного и качественного продукта.

## **1.6 Патентный поиск**

### **1.6.1 RU 2 745 544 C1 Способ получения пеностекла**

Авторы патента представляют способ получения пеностекла в области неорганических теплоизоляционных строительных композитов. Состав данного композиты включает в себя стеклобой с размером частиц менее 40 мкм, водный раствор кальцинированной соды и глицерина [23].

Данный состав подвергают выдержке при 200 °С для достижения влажности менее 1 %. Далее массу смешивают с серой для получения стекольной шихты для дальнейшего вспенивания и отжига пеностекла.

Основным недостатком данной технологии является необходимость диспергирования стеклообразного щелочного алюмосиликата до получения частиц с удельной поверхностью 6000-20000 см<sup>2</sup>/г: это удорожает и усложняет процесс получения пеностекла. В результате чего данный способ является экономически не целесообразным. Устранение данного недостатка может стать это производство пеностекла из природного сырья, месторождение которого находится в непосредственной близости к предприятию [36].

Авторы патента подразумевают производство блоков пеностекла, включающее использование порошкообразной смеси с тарным или оконным стеклом, тальком, и нагревом в металлической разборной форме. Однако, отмечается, что отсутствие эффективного газообразователя может влиять на качество вспенивания стекольной массы и, следовательно, на готовый продукт.

Недостатки текущего метода:

- отсутствие эффективного газообразователя: Недостаточное вспенивание стекольной массы может привести к низкому качеству готового продукта;

- ограничение размера блоков: Получаемые блоки имеют небольшой размер, что может быть недостаточным для производства стандартизированных промышленных изделий сложной формы;
- использование разборных форм: Это усложняет и удорожает процесс производства, что может быть неэффективным в промышленных масштабах.

Рекомендации для улучшения данной технологии:

- исследование эффективных газообразователей: провести исследования по разработке или внедрению более эффективных газообразователей для обеспечения более полного вспенивания стекольной массы;
- расширение размеров блоков: рассмотреть возможность увеличения размеров блоков для более широкого применения в промышленности;
- оптимизация состава с использованием вторичного сырья: исследовать методы оптимизации состава, возможно, через контролируемое использование вторичного сырья для получения стабильных характеристик продукта;
- упрощение технологического процесса: рассмотреть возможность оптимизации производственного процесса, например, путем сокращения использования разборных форм для упрощения и снижения затрат;
- внесение изменений в указанные аспекты может существенно улучшить эффективность и качество производства блоков пеностекла, сделав их более конкурентоспособными на рынке.

### **1.6.2 RU 124 905 U1 Пеностекло**

«Полезная модель относится к материалам для изоляции, особенно к пеностеклу, и может быть применена в строительстве, в основном для поглощения звука в ограждающих конструкциях, межкомнатных

перегородках, перекрытиях, а также для теплоизоляции зданий, сооружений и других установок с низкой влажностью окружающей среды» [20].

Звукопоглощающее пеностекло обладает ячеистой структурой, ограниченной тонкими стеклянными стенками. В этих стенках находятся микропоры, связанные с ячеистой структурой и окружающей средой. Изготавливается пеностекло из смеси, включающей порошок механоактивированной цеолитсодержащей породы, содержащей от 7 до 19 % масс. СаО и плавня.

Состав смеси следующий (в % масс.): цеолитсодержащая порода - 81-88; плавень - 12-19. Водопоглощение звукопоглощающего пеностекла составляет 70-80 %, а его звукопоглощающие свойства характеризуются коэффициентом звукопоглощения в диапазоне 0,65–0,83 при частотах от 600 до 4000 Гц. Предел прочности на сжатие не менее 0,7 МПа, что соответствует минимальным значениям для теплоизоляционного пеностекла.

Недостаток звукопоглощающего пеностекла по известному решению: высокие энергозатраты в производстве: пеностекло производится из специально сваренного стекла при температуре 1450-1550 °С. Это приводит к значительным энергозатратам, что удорожает производственный процесс.

### **1.6.3 RU 2 291 125 C2 Шихта для получения пеностекла**

«Изобретение относится к области пеноматериалов и представляет собой новый подход, применимый в производстве пеностекла. Технический эффект данного изобретения заключается в эффективной утилизации стеклобоя (тарного) и отходов сахарного производства (ОСП) путем их интеграции в процесс изготовления пеностекла» [21].

Основные этапы процесса:

а) подготовка шихты:

- 1) совместное измельчение стеклобоя (тарного) и ОСП в шаровой мельнице;
- 2) полученная шихта подлежит укладке в формы, предварительно смазанные каолиновой суспензией;



б) термообработка: укладка шихты подвергается термообработке при температуре 850 °С;

в) обработка полученного пеностекла:

3) извлечение пеностекла из форм;

4) подвержение отжигу с использованием известных температурных режимов для достижения оптимальных свойств;

г) состав шихты:

5) стеклобой;

б) газообразователь (отход сахарного производства) в объеме 3 % по массе: Карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) – 50 %, Оксид кальция ( $\text{CaO}$ ) – 30 %, Органические составляющие – 20 %.

Данный состав является уникальным. Использование данного состава дает возможность получать пеностекло высокого качества и с набором необходимых свойств. После отжига материал подвергается механической обработке для достижения точных геометрических размеров.

Данная технология имеет весомый недостаток. В процессе вспенивания стекла используются карбонатные газообразователи, которые образуют большие поры различных размеров. При этом возрастает коэффициент теплопроводности. Полученная структура пор представлена на рисунке 10.

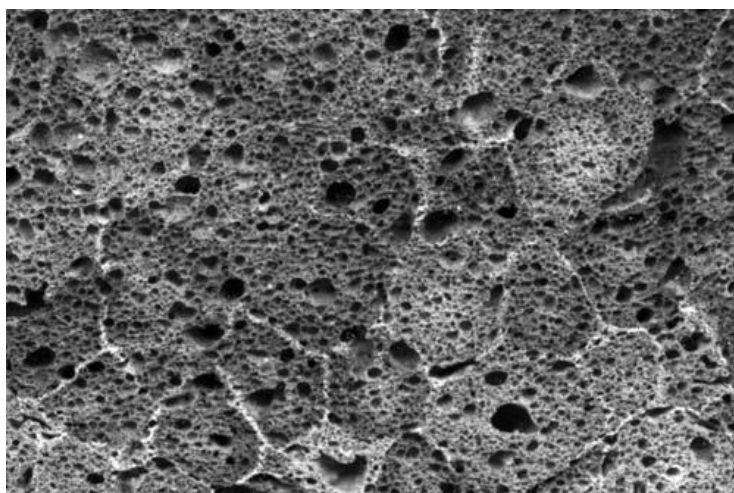


Рисунок 10 – Структура пеностекла



#### **1.6.4 RU 2 526 452 C1 Способ производства гранулированного пеностекла из стеклобоя**

Изобретение связано с производством строительных материалов, а именно с гранулированным пеностеклом. Это материал может использоваться как теплоизоляционный материал и легковесный наполнитель в облегченных бетонах [22].

Технический результат: Технический результат достигается путем использования несортowego стеклобоя для получения тонкомолотого стекольного порошка. К этому порошку добавляют крупнопористый силикагель, измельченный до размера частиц не более 80 мкм, в качестве порообразователя. Этот компонент добавляется в количестве 1%. Связующее готовится смешиванием воды и жидкого стекла, причем связующее составляет 18 % от массы стеклобоя. В качестве газообразователя используют углеродсодержащее соединение, например, тонкомолотый уголь.

Этапы осуществления изобретения:

- измельчение несортowego стеклобоя для получения тонкомолотого стекольного порошка размером 10-50 мкм;
- добавление порообразователя (крупнопористого силикагеля), измельченного до размера частиц 30 мкм, и связующего к тонкомолотому стекольному порошку;
- перемешивание компонентов для получения пеностекольной смеси. порообразователь, связующее и силикагель добавляются в определенных пропорциях;
- гранулирование пеностекольной смеси для получения сырцовых гранул полуфабриката;
- вспенивание сырцовых гранул полуфабриката в печи при температуре 780 °С в течение 20 минут;
- образование пеностеклянного гранулята с плотностью 180 кг/м<sup>3</sup>.

У данного способа есть недостатки, заключающиеся в следующем: для данного метода требуется использовать стекло только одного вида, а так же состав должен быть одинаков [22].

#### **1.6.5 RU 2 758 829 C1 Способ получения пеностекла**

Данное изобретение нацелено на эффективную утилизацию отходов стекла и производство теплоизоляционных строительных материалов, особенно пеностекла. Основные области применения включают тепловую изоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений.

В данном патенте описание представляет процесс производства гранулированного пеностекла, где исходное сырье - несортированный стеклобой, подвергается определенным этапам обработки для создания стекловяжущей суспензии и последующего формирования изделий:

- а) подготовка стекловяжущей суспензии:
  - 1) используют несортированный стеклобой, измельченный до зернистости не более 0,14 мм;
  - 2) смешивают стеклобой с гидроксидом натрия и водой в определенных пропорциях;
  - 3) термическая обработка смеси при 100 °С и атмосферном давлении в течение не менее 8 часов с периодическим перемешиванием;
- б) приготовление формовочной массы: смешивание стекловяжущей суспензии с порошком стеклобоя до получения гомогенной массы;
- в) формование изделий:
  - 4) укладка полученной смеси в формы и уплотнение под воздействием вибрации в течение 1-2 минут;
  - 5) сушка заготовок на воздухе в течение 1 суток, затем при температуре 50 °С в течение 24-72 часов;

г) обработка в печи: После сушки заготовок, изделия подают в предварительно разогретую печь до температуры 700-800 °С и выдерживают при этой температуре не менее 30 минут.

Этот процесс позволяет получить готовое гранулированное пеностекло, которое может быть использовано в качестве строительного материала, теплоизоляционного материала или легковесного заполнителя в бетонах.

Заявляемый способ получения пеностекла направлен на решение нескольких ключевых задач, что делает его привлекательным с технологической и экономической точек зрения [24].

Основные аспекты решения задачи:

- снижение технологической сложности: Использование несортированного стеклобоя в процессе производства пеностекла уменьшает необходимость в сложных технологических операциях и этапах сортировки. Это упрощает производственные процессы, сокращает время производства и упрощает оборудование;
- экономия энергии: Применение несортированного стеклобоя может сопровождаться снижением температурных и временных режимов обработки материала. Это позволяет сократить энергозатраты, что важно для улучшения энергетической эффективности производства;
- снижение себестоимости: Использование отходов стеклобоя в качестве вторичного сырья позволяет снизить эксплуатационные затраты. Это в свою очередь снижает себестоимость производства пеностекла, что может сделать продукцию более конкурентоспособной на рынке;
- экологическая устойчивость: Уменьшение технологической сложности и энергозатрат, а также повышение эффективности использования стеклобоя, способствует сокращению негативного воздействия на окружающую среду.

Заявляемый способ предоставляет комплексное решение для оптимизации производства пеностекла, сфокусированное на снижении

технологической сложности, энергозатрат и общей себестоимости материала.

### **Выводы по разделу:**

Исследование, которое было проведено, показало, что пеностекло обладает рядом уникальных физико-механических свойств, что делает его наиболее перспективным для создания новых теплоизоляционных материалов. Этот материал отличается низкой теплопроводностью, высокой прочностью при небольшом весе, химической и биологической стойкостью, а также обладает большой морозоустойчивостью и долговечностью. Все эти качества определяют его высокую конкурентоспособность [26].

Проведенный патентный анализ показал, что получение пеностекла улучшенных свойств, можно добиться использованием в процессе вспенивания не только стеклобоя, но и специально подготовленной шихты, обладающей пиропластическими свойствами. Шихта позволяет добиться гомогенного состава пеностекла. В качестве компонентов шихты выступают песок, мел, доломит, сода, полевой шпат, сульфат натрия.

Так же в результате того, что можно использовать несортированное стекло различного цвета, снижается себестоимость продукции и упрощается технологический процесс получения материалов. Полученный пеностекольный гранулят обладает рядом преимуществ.

В качестве основы выбраны наиболее подходящие патенты RU 2 526 452 C1 и RU 2 758 829 C1 с учетом необходимых параметров, так же были учтены преимущества и недостатки способов получения пеностекла.

## **2 Расчётно-технологическая часть**

Мировой опыт демонстрирует, что использование пеностекла в форме блоков не всегда является наилучшим вариантом. «В некоторых случаях, для строительства более предпочтительным оказывается применение пеностекла в виде гравия или щебня. Разработан опыт применения таких материалов, как пеностеклянный щебень Schaumglas Schotter и гравий Poraver. Оптимальным считается производство мелких гранул теплоизоляционного материала в связи с более эффективным теплообменом.

Суть разработанной технологии заключается в нескольких основных принципах. Во-первых, подвергать термообработке не порошок, а гранулированный продукт. Это снижает энергозатраты и позволяет использовать полупродукт для производства как блоков, так и гравия. Гранулированный полупродукт также уменьшает требования к качеству исходного сырья за счет введения специальных химических добавок при формировании гранул.

Во-вторых, меньшая чувствительность технологии к качеству сырья позволяет сократить затраты и использовать как несортированный стеклобой, так и низкосортное стекло.

В-третьих, появляется возможность производства различных видов продукции. Эти принципы легли в основу внедренной в промышленном масштабе мокрой технологии производства пеностекла» [17]-[19].

### **2.1 Описание подготовки сырьевых материалов**

Технология производства пеностекла включает в себя стадии подготовки сырья для шиты и обработки стеклобоя, т.е. очистки от второстепенных загрязнителей. Данные этапы необходимо включать перед измельчением сырья в порошок для дальнейшей сушки и просеивания.

Производство пеностекла включает в себя подготовительное и смесительное отделение, где непосредственно осуществляется подготовка сырья и смешивание сырья и шихты.

Поступают материалы различными путями в зависимости от агрегатного состояния и химических свойств. Например, песок доставляют в вагонах, доломит – в цистернах, сыпучие (мел, полевой шпат и сульфат натрия) – в мешках, а сода – в хопперах.

Поступление различных материалов осуществляется разными способами, например, песок доставляется на полувагонах, доломит в цистернах, мел, полевой шпат и сульфат натрия - в мешках и вагонах, а сода может поступать в хопперах или в виде кусков в мешках в полувагонах [9].

Все сыпучие материалы необходимо просеивать через сито и просушивать в сушильных барабанах. Данный аппарат представлен на рисунке 11.

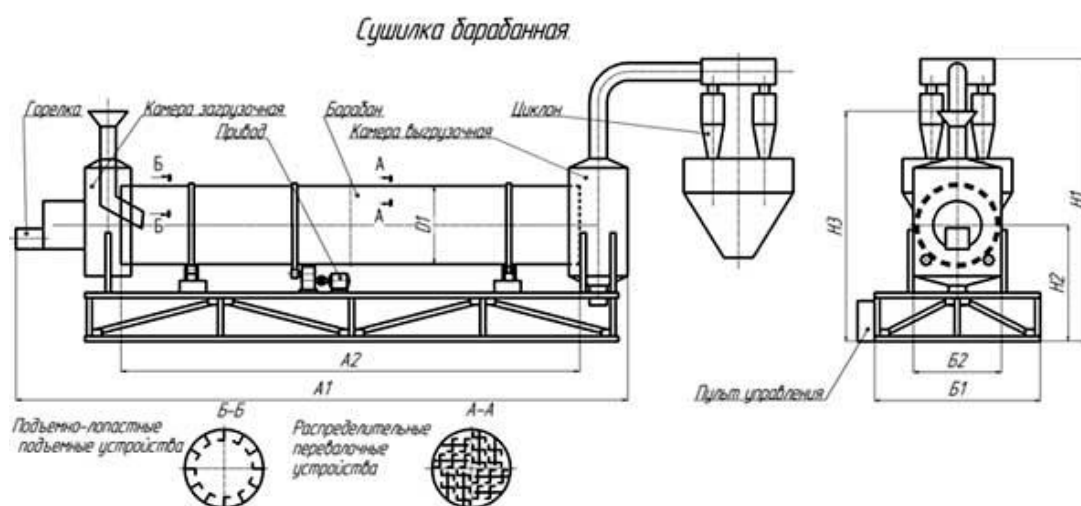


Рисунок 11 – Сушилка барабанная

Технологическая линия оснащена датчиками взвешивания для обеспечения более точного взвешивания. Смешивание непосредственно происходит в смесителях, оснащенных мешалками.

Технологические этапы производства продукции:

- а) подготовка сырьевых материалов:
  - 1) поступление кварцевого песка из резервуара с использованием мостового грейферного крана;
  - 2) бункер с металлической решеткой для хранения песка;
  - 3) дробление мерзлого песка при необходимости в щековой дробилке;
  - 4) направление песка через лотковый питатель и ленточный конвейер в сушильный барабан;
  - 5) отопление барабана природным газом;
  - 6) поддержание температуры газовой среды в готовой части барабана не выше 700 °С, а температуры песка при выходе из барабана - 110±10 °С;
  - 7) сухой песок проходит через сито-бурат с ситом № 08 и подается в весовые бункера;
  - 8) влажность песка не превышает 0,2 %, а его сыпучесть остается на высоком уровне.
- б) транспортировка готовой шихты:
  - 1) готовая шихта транспортируется из составного цеха в вагонетках по железнодорожному пути в цех по производству гранулята.

Эти операции обеспечивают качественное производство продукции с учетом необходимых параметров и контроля на каждом этапе. Стадии подготовки кварцевого песка представлены на рисунке 12.

Кальценированная сода, хранящаяся в бункерах накопителях, поступает по ленточному конвейеру. С помощью элеватора поступает на вибрационный грохот, где сырье просеивается через сито № 1,6. Стадии подготовки кальценированной соды представлены на рисунке 13.

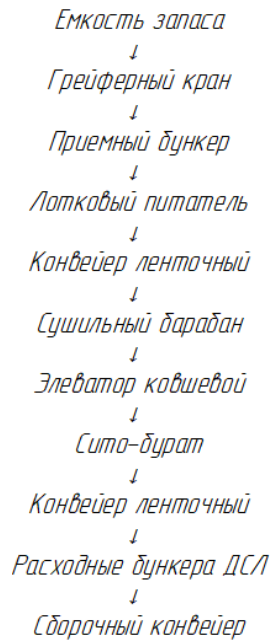


Рисунок 12 – Блок-схема подготовки песка кварцевого

«Мел, который извлекается с склада при помощи мостового грейферного крана, поступает в приемный бункер. Этот бункер закрыт металлической решеткой, в которой ячейки имеют размер не более 100x100 мм. После этого мел передается посредством ленточного конвейера на элеватор для последующего просеивания на вибрационном грохоте, использующем сетку № 1,1 (согласно рисунку 14). Пройдя через просеивание, мел собирается в промежуточном бункере, расположенном ниже грохота. Извлеченный после просеивания мел подается из промежуточного бункера при помощи пневмокамерного насоса для транспортировки в циклон разгрузатель, а затем направляется в бункера весовой линии» [16]. Стадии подготовки мела представлены на рисунке 15.



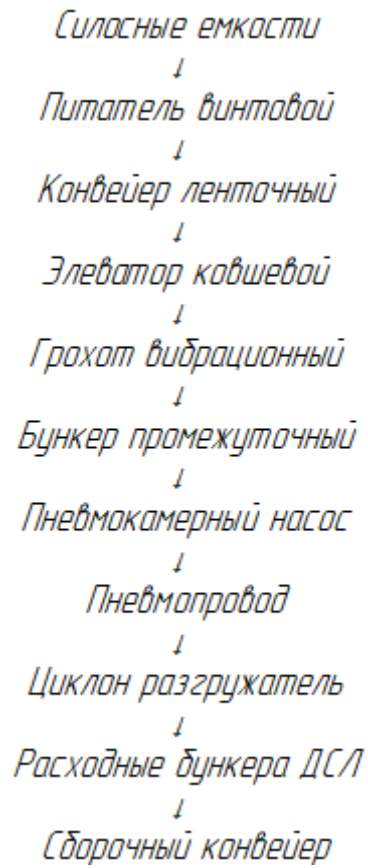


Рисунок 13 – Блок-схема подготовки соды кальцинированной

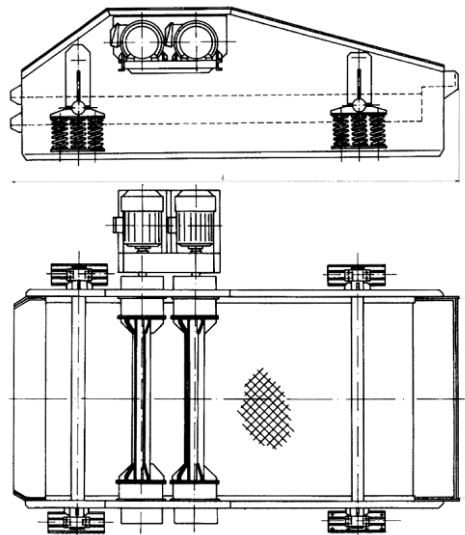


Рисунок 14 – Грохот вибрационный

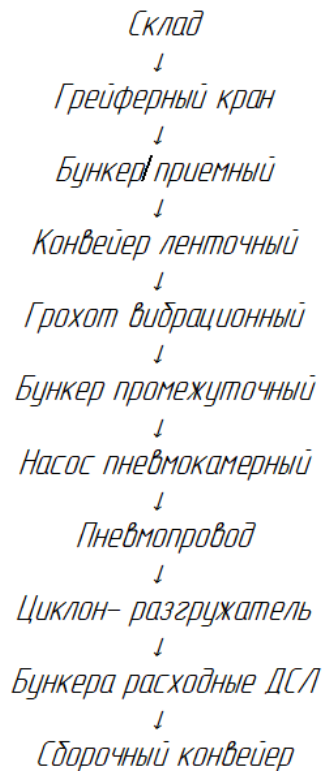
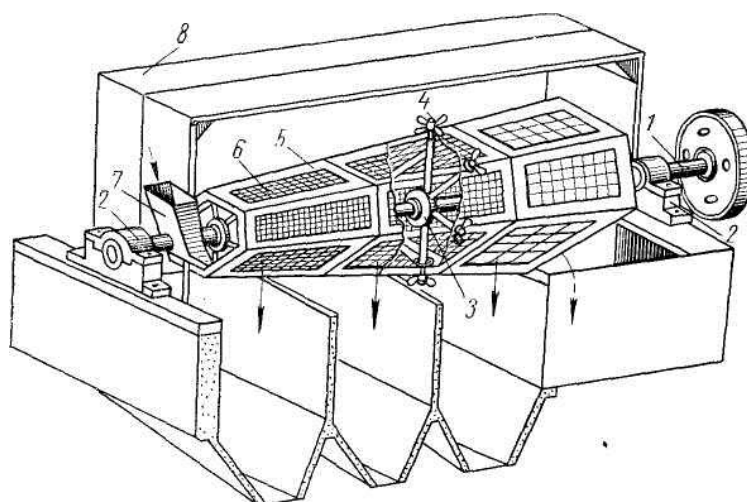


Рисунок 15 – Блок-схема подготовки мела

«Их силосные емкости предназначены для хранения доломита, который подается на просеивание через ленточный элеватор в сито-бурат с сеткой № 08, как показано на рисунке 16. Просеянный доломит затем транспортируется из промежуточного бункера с помощью пневмокамерного насоса по пневмопроводу в циклон-разгрузатель, где он разгружается в расходные бункеры» [27]. Стадии подготовки доломита представлены на рисунке 17.



1 – вал; 2 – подшипники; 3 – втулки с крестовинами; 4 – барашки; 5 – съемные рамки 6 – проволочные сетки; 7 – приемная воронка; 8 – ограждение

Рисунок 16 – Сито-бурат

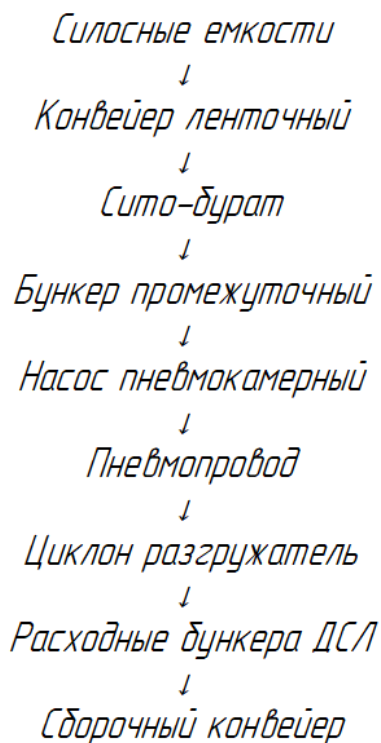


Рисунок 17 – Блок-схема подготовки доломита

Полевой шпат из хранилища поступает в приемный бункер, используя грейферный кран. Бункер оборудован металлической решеткой с отверстиями не превышающими 100x100 мм. «После этого шпат перемещается из бункера по ленточному конвейеру и элеватору с ковшем к

ситу-бурату для просеивания через сетку № 07. Если требуется сушка, материал направляется из бункера в сушильный барабан через ленточный конвейер. Температура газовой среды в сушильном барабане поддерживается не более 400 °С, а отходящие газы охлаждаются до 60 °С. Влажность после сушки ограничивается 0,2 %. Затем просушенный полевой шпат подвергается просеиванию через сито-бурат. В конечном итоге, просеянный материал перемещается по ленточному конвейеру в расходные бункера весовой линии» [27]. Стадии подготовки полевого шпата представлены на рисунке 18.

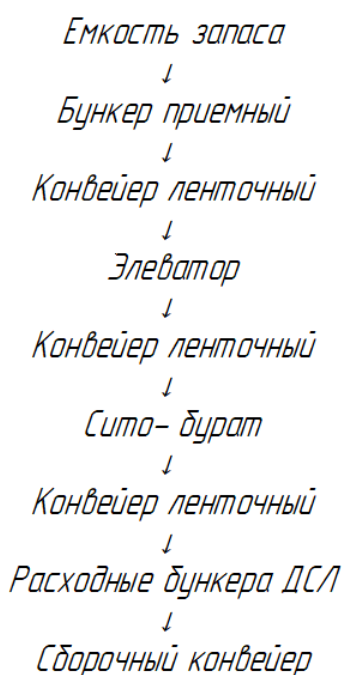


Рисунок 18– Блок-схема подготовки полевого шпата

Сульфат натрия поступает в приемный бункер, используя мостовой грейферный кран. Бункер закрыт металлической решеткой с ячейками размером не более 100x100 мм. Затем сульфат натрия подается на грохот вибрационный для просеивания через сетку № 1,6 и направляется в промежуточный бункер. Промежуточный бункер содержит уже просеянный материал. Транспортировка материала из промежуточного бункера осуществляется с помощью элеватора ковшевого типа по пневмопроводу, используя пневмокамерный насос. Он разгружается через циклон-

разгрузатель в расходный бункер. Стадии подготовки сульфата натрия представлены на рисунке 19.

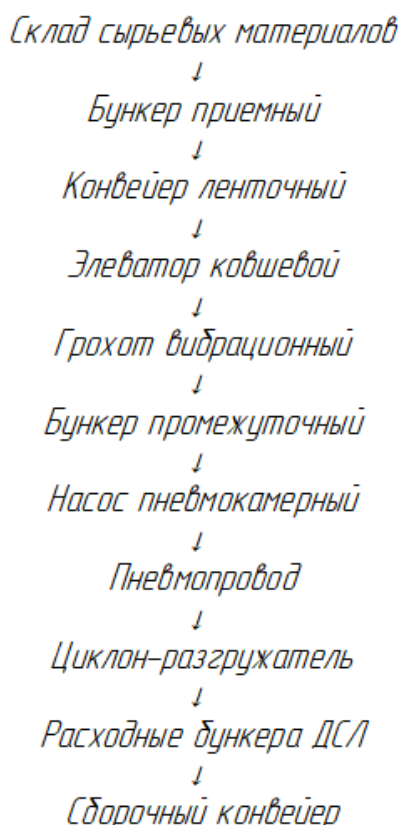


Рисунок 19 – Блок-схема подготовки сульфата натрия

«Подготовленные сырьевые компоненты из расходных бункеров направляются в дозаторы (весы), где регистрируются фактические массы загруженных и выгруженных доз материалов при помощи измерительного устройства. Дозирование осуществляется в соответствии с рецептом шихты. Взвешенные дозы компонентов поступают на сборочный конвейер и затем в смеситель. В процессе смешивания происходит усреднение и установка влажности компонентов согласно технологическим параметрам, формируя равномерную смесь, называемую шихтой. Шихта должна быть однородной с влажностью  $4,5 \pm 5,0 \%$ » [24].

«Готовая шихта из смесителя транспортируется в расходный бункер при помощи элеватора, затем направляется в вагонетку для перевозки в цех по производству гранул. Процесс формирования стекломассы происходит в

регенеративной стекловаренной печи при температуре 1550 – 1580 °С, используя пять стадий стекловарения: силикатообразование, стеклообразование, осветление (дегазация), гомогенизация (усреднение) и охлаждение (студка).

В данном контексте гомогенизация и осветление стекломассы не требуются. На стадии охлаждения стекломасса должна приобрести температурную однородность. Блок-схема подготовки шихты представлена на рисунке 20. Опыт использования различных технологических линий выявил, что установки для двухстадийного процесса производства пеностекла, с вспениванием блоков и их отжигом в отдельных тепловых агрегатах (печи вспенивания и печи отжига), являются наиболее прибыльными и способными обеспечивать производство высококачественной продукции» [13].

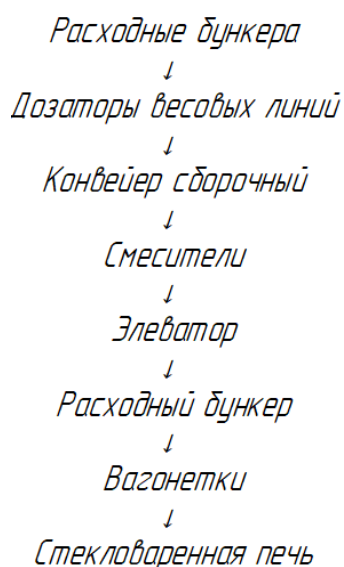


Рисунок 20 – Блок-схема подготовки шихты

## **2.2 Технологическая схема оптимизации процесса производства пеностекла из отходов стеклобоя и подбор оборудования**

Сырье для производства стекловолокна:

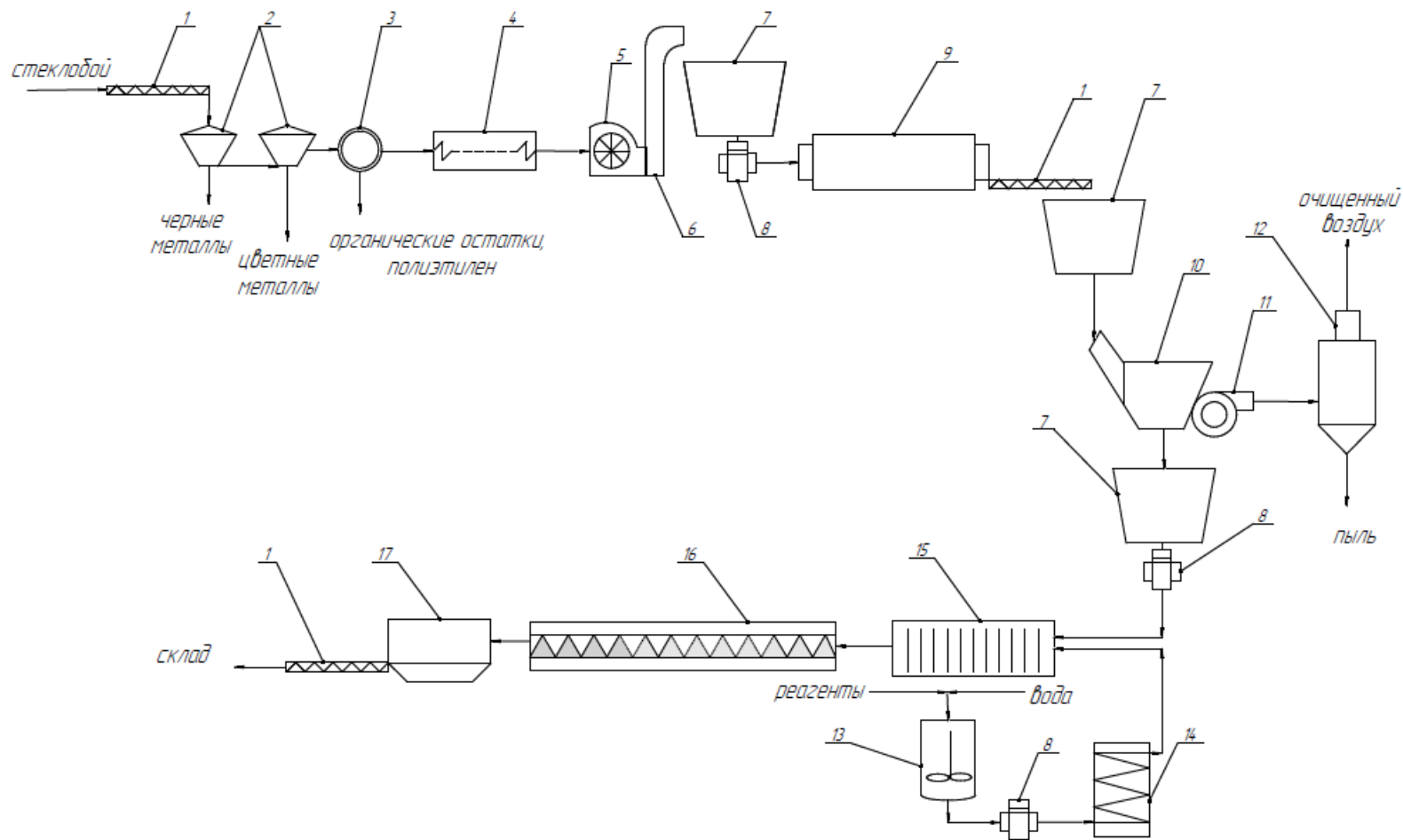
- стеклобой листовой;
- стеклобой бутылочный.

Ниже на рисунке 21 представлено описание предлагаемой технологии.

Стеклобой поступает на конвейер ручной сортировки. При сортировке отбираются и другие виды отходы для последующей утилизации. На этом же этапе происходит бой бутылочного и листового стекла о твердую поверхность бункера.

Далее стеклобой подвергается мойке в моечном барабане с целью очищения от органических остатков и этикеток. Далее просушивается в сушильном барабане.

«После чего стеклобой поступает на магнитный и электростатический сепараторы, с целью отделения черного и цветного металлов, затем в дробилку. После дробления стеклобой с помощью элеватора подается в бункер-накопитель, откуда с помощью дозатора подается в мельницу на помол до фракции менее 50 мкм. Шаровая мельница периодического действия, имеет барабан, вал которого вращается на двух подшипниках. Привод мельницы осуществляется от электродвигателя через редуктор, фрикционную муфту и зубчатую передачу. Барабан шаровой мельницы заполнен примерно на 1/3 высоты мелющими телами и измельченным материалом. При вращении шары увлекаются стенками и поднимаются на определенную высоту. Затем шары вместе с материалом падают и ударами измельчают материал. Мельница загружается мелющими телами и материалом через люк, а по окончании помола разгружается через этот же люк» [37]. Характеристики мельницы представлены в таблице 3.



1 – ленточный конвейер; 2 – магнитный и электростатический сепаратор; 3 – моечный барабан; 4– вибрационная сушилка; 5 – дробилка; 6 – элеватор; 7 – накопительный бункер; 8 – дозатор; 9 – шаровая мельница; 10 – воздушный сепаратор; 11 – вентилятор; 12 – циклон; 13 – емкость с мешалкой; 14 – ванная печь; 15 – скоростной смеситель непрерывного действия; 16 – барабанный гранулятор; 17 – аппарат воздушного охлаждения.

Рисунок 21– Принципиальная технологическая схема получения пеностеклянного гранулята



Таблица 3 – Техническая характеристика трубной многокамерной мельницы СМ – 14

Техническая характеристика	Значения
Диаметр барабана, мм	1500
Длина барабана, мм	5445
Число оборотов, об/сек.	0,45
Производительность, т/ч	6 - 8
Мощность электродвигателя, кВт Масса мелющих тел, т Масса мельницы без мелющих тел, т	130 12,25 39,4

Далее молотый стеклобой с помощью элеватора поступает в бункер-накопитель. Далее измельченное стекло подается в воздушный сепаратор, в котором за счет вверх идущего потока воздуха происходит очистка стекла от частиц пыли.

«Необходимая добавка к стеклобою – реагент – загружается в емкость с мешалкой совместно с водой, где готовится вязущий раствор. Приготовление раствора и подача всех компонентов контролируются АСУТП. Варка реагента осуществляется в ванной печи с подковообразным направлением пламени. Данная печь более экономична и стекломасса получается более качественной, расход огнеупоров уменьшается. Ванная печь непрерывного действия позволяет установить стабильный температурный и газовый режим. Шихта загружается в загрузочные карманы, постепенно проходит зоны бассейна с различными температурными условиями и переходит в однородную гомогенную стекломассу. В каждой зоне необходимо поддерживать постоянный температурный режим. К контролируемым параметрам относятся: уровень стекломассы, давление, разрежение печи, температура варки. Газовый режим печи имеет большое значение для нормального хода варки стекла. Атмосферу в печи необходимо постоянно контролировать, анализируя дымовые газы горелок. Наиболее часто в варочной части печи поддерживают слабоположительное давление. Измеряют давление на уровне заклинка. Варка стекла должна производиться при температуре 1530 °С» [10].

«С помощью дозаторов, управляемых АСУТП, молотый стеклобой и

вяжущий реагент, а также газообразователь, непрерывно подаются в скоростной смеситель непрерывного действия до получения однородной массы. В качестве газообразователя предложено использовать азотсодержащее соединение. Компоненты отвешиваются на весах автоматах и смешиваются в лопастном смесителе. Соотношение жидкого стекла и молотого стекла 55:45. Соотношение стеклобоя и шихты варьируется в зависимости от нужды в том или ином декоративном эффекте. Чаша смесителя вращается вокруг вертикальной оси на четырех роликах, установленных на станине. В нижней части чаши с наружной стороны закреплен зубчатый венец, через который чаша приводится во вращение. Привод валов осуществляется от электродвигателя через ременную передачу. Компоненты загружаются в бункеры, а из бункеров они согласно рецепту, поступают в чашу смесителя» [7].

Для попадания компонентов в чашу включают электродвигатель, чаша и два вертикальных вала, несущий каждый по три лопасти вращаются в противоположных направлениях. Технические характеристики смесителя представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики лопастного смесителя

Техническая характеристика	Значения
Тип смесителя	СБ - 138 Б
Объем готового замеса, т/ч	0,8
Число циклов работы в час	33
Продолжительность перемешивания, с	65
Крупность заполнителя, мм не более	70
Частота вращения ротора, об/мин	22,7
Установленная мощность электродвигателя, кВт	37
Масса, кг	3500
Габаритные размеры, мм длина ширина высота	2850 2700 1860

«Сваренная стекломасса подается в гранулятор. Горячая стекломасса в виде струи вместе с водой поступает в барабан, где происходит ее термодробление и перемещение винтовой поверхностью к разгрузочному отверстию конуса - бутары барабана. Излишки воды вытекают из

загрузочного окна и отверстия конуса - бутары в баки. Приемное устройство, сам барабан, винтовая поверхность, конус – бутара и баки выполнены из нержавеющей стали. Вращение барабана осуществляется посредством шестерни, находящейся в зацеплении с зубчатым колесом от электромотора через редуктор после которого масса поступает в сушилку-окатыватель, где образуются сырцовые гранулы полуфабриката, которые далее транспортируются на склад» [31]. Полученные гранулы можно использовать для пеностеклянного гравия, плит и блоков, предварительно обработав их в печах разного назначения.

Технические характеристики гранулятора приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики гранулятора

Техническая характеристика	Значения
Диаметр барабана, мм	820
Число оборотов, об/мин	4,85
Производительность, т/ч	20
Привод гранулятора Электродвигатель, тип Мощность, кВт; об/мин Редуктор, тип Передаточное отношение	А-02-42-8 3; 710 РМ350-1-1Ц 48,57
Габаритные размеры, мм длина ширина высота	4228 1660 1600

Результатом предлагаемой технологии станет получение гранулированного пеностекла заданного размера и цвета, пригодного для использования в качестве сырья для получения плит и блоков из пеностекла, а также пеностеклянного гравия.

Выбор и расчёт основного технологического оборудования определяется формулой 1:

$$K = \frac{P_T}{P_q \cdot K_H} \quad (1)$$

где  $P_T$  – требуемая часовая производительность по данному пределу, м<sup>3</sup>/ч;  $P_T = 182 \text{ кг/ч} = 0,182 \text{ т/ч}$ ;

$P_q$  – часовая производительность выбранной машины;

$K_n$  – нормативный коэффициент использования оборудования по времени (0,8-0,9).

Найдем необходимое для выполнения производственной программы количество дробилок по формуле:

$$K = \frac{0,182}{20 \cdot 0,85} \approx 1$$

Найдем необходимое для выполнения производственной программы количество грануляторов по формуле:

$$K = \frac{0,182}{20 \cdot 0,85} \approx 1$$

Найдем необходимое для выполнения производственной программы количество шаровых мельниц по формуле:

$$K = \frac{0,182}{7 \cdot 0,85} \approx 1$$

Найдем необходимое для выполнения производственной программы количество смесителей по формуле:

$$K = \frac{0,182}{6 \cdot 0,85} \approx 1$$

Сведем все оборудование в таблицу 6.

Таблица 6 – Ведомость оборудования производств

Наименование оборудования и марка	Количество, шт.	Габаритные размеры, ШхДхВ, см	Мощность электродвигателя, кВт	Производительность, т/ч	Примечание
1	2	3	4	5	6
Весовой дозатор	4	100x200x225	-	2	
Щековая дробилка СМД-28	1	228x200x192	50	19,8...48 т/ч	
Гранулятор	1	422,8x166x168	49	20 т/ч	
Шаровая мельница СМ-14	1	544,5x150x150	-	6-8 т/ч	
Смеситель СБ-138Б	1	285x270x186	37	6 т/ч	

### 2.3 Материальный баланс

Для расчета материального баланса начертим блок-схему материальных потоков, представленную на рисунке 22.

Для расчета материального баланса необходимо произвести расчет шихты.

Исходные данные:

Производительность по образованию не очищенного стеклобоя в год  $G = 1650$  т/год;

Количество рабочих дней  $n = 365$  дней;

Количество рабочих часов в сутки  $t = 24$  часов;

Массовая доля шихты  $\omega_{ш} = 55$  %;

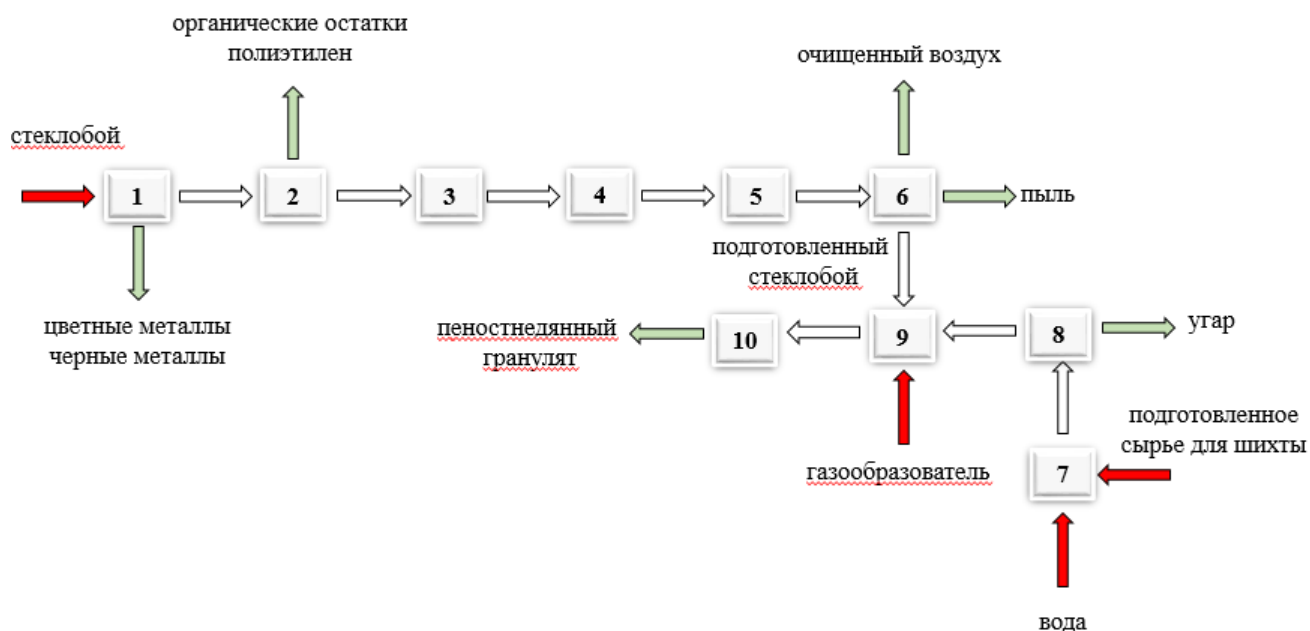
Массовая доля стеклобоя  $\omega_c = 45$  %;

Угар шихты  $\delta = 2,5$  %;

Объем газообразователя  $\gamma = 3$  %;

Массовой состав шихты представлен в таблице 7.

Образование попутных отходов при очищении стеклобоя представлено в таблице 8.



1 – магнитный и электростатический сепараторы; 2 – моечный барабан;  
 3 – вибрационная сушилка; 4 – дробилка; 5 – шаровая мельница;  
 6 – воздушный сепаратор с циклоном и вентилятором;  
 7 – емкость с мешалкой; 8 – ванная печь;  
 9 – скоростной смеситель непрерывного действия; 10 – барабанный гранулятор.

Рисунок 22 – Блок-схема материальных потоков

Таблица 7 – Массовой состав шихты

Компонент	Песок	Мел	Доломит	Сода	Полевой шпат	Сульфат натрия
Массовая доля компонентов шихты, %	54,09	1,28	16,04	18,67	8,48	1,44

Таблица 8 – Образование попутных отходов при очищении стеклобоя

Отход	Черные металлы	Цветные металлы	Органика и этикетки	Пыль
Массовая доля отхода, %	10	7	8	1,5

1) Рассчитаем среднечасовую производительность по стеклобою по формуле 2:

$$G_{\text{сч}} = \frac{G}{n \cdot t} \quad (2)$$

где  $G$  – среднегодовая производительность образования стеклобоя, т/год;

$n$  – количество рабочих дней, дни;

$t$  – количество рабочих часов в стуках, ч.

$$G_{\text{сч}} = \frac{1650}{365 \cdot 24} = 188,36 \text{ кг/ч}$$

2) Рассчитаем сколько образовалось попутных отходов при сепарации по формуле 3:

$$G_i = \frac{G_{\text{сч}} \cdot \omega_{\text{iот}}}{100} \quad (3)$$

где  $\omega_{\text{iот}}$  – массовая доля отхода, %;

100 – перевод.

$$G_{\text{ч.Ме}} = \frac{188,36 \cdot 10}{100} = 18,836 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{цв.Ме}} = \frac{188,36 \cdot 7}{100} = 13,185 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{орг и этик}} = \frac{188,36 \cdot 8}{100} = 15,069 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{пыль}} = \frac{188,36 \cdot 1,5}{100} = 2,825 \text{ кг/ч}$$

3) Рассчитаем сколько чистого стеклобоя получается по формуле 4:

$$G'_{\text{ст}} = G_{\text{сч}} - G_{\text{ч.Ме}} - G_{\text{цв.Ме}} - G_{\text{орг и этик}} - G_{\text{пыль}} \quad (4)$$

$$G'_{\text{ст}} = 188,36 - 18,836 - 13,185 - 15,069 - 2,825 = 138,445 \text{ кг/ч}$$

4) Рассчитаем, сколько необходимо шихты по формуле 5:

$$G_{\text{ш}} = \frac{G'_{\text{ст}} \cdot \omega_{\text{ш}}}{\omega_{\text{с}}} \quad (5)$$

где  $\omega_{\text{ш}}$  – массовая доля шихты, %;

$\omega_{\text{с}}$  – массовая доля стеклобоя, %.

$$G_{\text{ш}} = \frac{138,445 \cdot 55}{45} = 169,211 \text{ кг/ч}$$

5) Рассчитает массу компонентов шихты по формуле 6:

$$m_i = \frac{G_{\text{ш}} \cdot \omega_{i\text{ш}}}{100} \quad (6)$$

где  $\omega_{i\text{ш}}$  – массовая доля компонентов шихты, %.

$$m_{\text{песок}} = \frac{169,211 \cdot 54,09}{100} = 91,526 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{мел}} = \frac{169,211 \cdot 1,28}{100} = 2,166 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{доломит}} = \frac{169,211 \cdot 16,04}{100} = 27,141 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{сода}} = \frac{169,211 \cdot 18,67}{100} = 31,591 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{шпат}} = \frac{169,211 \cdot 8,48}{100} = 14,349 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{169,211 \cdot 1,44}{100} = 2,437 \text{ кг/ч}$$

6) Найдем массу газообразователя по формуле 7:

$$m_{\text{газ}} = \frac{G'_{\text{ст}} \cdot \gamma}{100} \quad (7)$$

где  $\gamma$  – объем газообразователя, %.

$$m_{\text{газ}} = \frac{138,445 \cdot 3}{100} = 4,153 \text{ кг/ч}$$



7) Найдем массу угара шихты по формуле 8:

$$m_{\text{угар}} = \frac{G_{\text{ш}} \cdot \delta}{100} \quad (8)$$

где  $\delta$  – угар шихты, %.

$$m_{\text{угар}} = \frac{169,211 \cdot 2,5}{100} = 4,230 \text{ кг/ч}$$

8) Найдем, сколько пеностекла образовалось по формуле 9:

$$m_{\text{пеностекло}} = G'_{\text{ст}} + G_{\text{ш}} - m_{\text{угар}} - m_{\text{газ}} \quad (9)$$

$$m_{\text{пеностекло}} = 138,455 + 169,211 - 4,230 + 4,153 = 303,391 \text{ кг/ч}$$

Полученные значения внесли в таблицу 9.

Таблица 9 – Материальный баланс получения пеностекла

Приход			Расход		
Компонент	кг/ч	%	Компонент	кг/ч	%
Стеклобой в том числе	188,360	45	Пеностеклянные гранулы	303,391	83,9
Черные металлы	18,836	-	Черные металлы	18,836	5,2
Цветные металлы	13,185	-	Цветные металлы	13,185	3,6
Органика и этикетки	15,069	-	Органика и этикетки	15,069	4,2
Пыль	2,825	-	Пыль	2,825	0,8
Шихта в том числе	169,211	55	Угар шихты	4,230	1,1
Песок	91,526	-	Газообразователь	4,153	1,2
Мел	2,166	-			
Доломит	27,141	-			
Сода	31,591	-			
Полевой шпат	14,349	-			
Сульфат натрия	2,437	-			
Газообразователь	4,153	-			
<b>ИТОГО</b>	<b>361,724</b>	<b>100</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>361,724</b>	<b>100</b>

**Вывод по разделу:**

В расчетной части представлена принципиальная технологическая схема предлагаемой технологии переработки стеклобоя. Описаны этапы подготовки сырья и производства гранулированного пеностекла. Проведен подбор технологического оборудования. Рассчитан материальный баланс получения пеностекла с выходом около 84 % от общей массы поступившего неочищенного стеклобоя на производство.

### **3 Оценка экологической техногенной нагрузки, формируемой отходами стекла**

Экологическая техногенная нагрузка, вызванная размещением отходов стекла в окружающей среде, представляет собой две основные составляющие. Первая заключается в загрязнении почвы компонентами, которые выщелачиваются из стекла. Вторая связана с выводом земель из хозяйственного оборота для размещения отходов стекла в случае отсутствия их вторичной переработки [25].

Для оценки вреда, причиняемого окружающей среде от отходов стекла в различных регионах и в определенный период времени, необходимо оценить удельную величину такого вреда на единицу массы отходов стекла. В данном контексте рассматривается целесообразность оценки вреда от размещения отходов стекла на тонну материала [14].

Расчет вреда, причиненного почвам отходами стекла, осуществляется согласно «Методике исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды», утвержденной Приказом Минприроды России от 08.07.2010 №238 (в редакции Приказа Минприроды России от 11.07.2018 № 316) по формуле 10 [13]:

$$УЩ = УЩ_{загр} + УЩ_{отх} \quad (10)$$

где УЩ – общий ущерб вреда, причиненного почвам;

УЩ<sub>загр</sub> – размер вреда при загрязнении почв выщелачиваемыми компонентами;

УЩ<sub>отх</sub> – размер вреда в результате порчи почв при их захламлении.

Размер вреда при загрязнении почв выщелачиваемыми компонентами осуществляется по формуле 11:

$$УЩ_{загр} = СЗ \cdot S \cdot K_r \cdot K_{исп} \cdot T_x \quad (11)$$

где СЗ – безразмерная степень загрязнения;

S – площадь загрязненного участка, м<sup>2</sup>;

K<sub>r</sub> – безразмерный показатель, характеризующий глубину загрязнения почв;

K<sub>исп</sub> – показатель, характеризующий категорию земель на которых располагают отходы стекла;

T<sub>x</sub> – такса для исчисления размера вреда, руб./м<sup>2</sup>.

Для расчета удельной величины ущерба У'загр на тонну стекла определим численное значение вышеуказанных величин.

Безразмерная степень загрязнения почв СЗ зависит от соотношения фактического содержания i-го загрязняющего вещества в почве к нормативу качества окружающей среды для почв и находится по формуле 12:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{X_n} \quad (12)$$

где X<sub>i</sub> – фактическое содержание i-го загрязняющего вещества в почве, мг/кг;

X<sub>n</sub> – норматив качества окружающей среды для почв, мг/кг.

«Степени загрязнения СЗ придают дискретные значения от 1,5 до 6,0 в зависимости от соотношения С. Для определения коэффициента С необходимо знать фактическое вымывание загрязняющих компонентом из отходов стекла. В расчете коэффициента, учитывающего степень загрязнения почв, участвуют только те вещества, для которых отношение фактического содержания i-го загрязняющего вещества в почве к нормативу качества для почв превышает единицу и определяется дискретными значениями, приводимыми в вышеуказанной Методике» [34].

«Выше было показано, что отходы стекла в зависимости от качественной характеристики вымываемых компонентов можно подразделить на два основных типа: натрий-кальциевое стекло и свинецсодержащее стекло.

В формуле 11 площадь загрязненного участка одной тонной стекла  $S$  принимаем равным  $10 \text{ м}^2$ , так как отходы стекла легко складировуются навалом, а плотность материала существенно зависит от фракционного состава стекла.

Безразмерный показатель  $K_r$ , характеризующий глубину загрязнения почв имеет переменный характер в зависимости от глубины загрязнения почв и принимается от 1,0 до 2,0 в соответствии с вышеуказанной «Методикой». В литературе отмечается высокая растворимость и подвижность соединений свинца (II). При попадании растворенных соединений свинца (II) в почву происходит их интенсивная сорбция большинством видов почв. Поэтому считаем для выщелачиваемых соединений свинца (II) фактической глубиной загрязнения почв максимальную до 20 см, что соответствует  $K_r$  равное 1,0.

Для вымываемых ионов  $\text{Na}^+$  характерна высокая подвижность и низкая сорбируемость почвами, поэтому глубину загрязнения можно признать максимально допустимый Методикой уровень в 2,5 метра и соответственно  $K_r$  равное 2,5.

Безразмерный показатель  $K_{\text{исп}}$ , характеризующий категорию земель, на которых располагают отходы стекла, зависит от места расположения складированных отходов. В связи с рассмотрением отходов стекла, как коммунального отхода, принимаем коэффициент для населенных пунктов  $K_{\text{исп}} = 1,3$ .

Наконец, размер  $T_x$ , таксы для исчисления размера вреда принимаем равную  $400 \text{ руб/м}^2$  для зона хвойно-широколиственных лесов, как наиболее характерную для средней полосы России» [11].

Таким образом, формула 11 для натрий-кальциевого и свинецсодержащего стекла принимает численный вид:

$$УЩ_{загрNa} = CZ_{Na} \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 1,3 \cdot 400 = CZ_{Na} \cdot 1300 \text{ руб/т}$$

$$УЩ_{загрPb} = CZ_{Pb} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 400 = CZ_{Pb} \cdot 520 \text{ руб/т}$$

$CZ_{Na}$  и  $CZ_{Pb}$  – безразмерная степень загрязнения натрий-кальциевым и свинецсодержащим стеклом, которые должны быть определены экспериментально.

Определение вреда вследствие размещения отхода в окружающей среде  $УЩ_{отх}$  в формуле 10 производится в соответствии с формулой 13:

$$УЩ_{отх} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot T_{отх}) \cdot K_{исп} \quad (13)$$

где  $УЩ_{отх}$  – размер вреда (руб);

$M_i$  – масса отходов с одинаковым классом опасности, (т);

$T_{отх}$  – такса для исчисления размера вреда, причиненного почвам в результате размещения отходов, тыс.руб./т;

$K_{исп}$  – безразмерный показатель категории земель и целевого назначения.

Так как расчет производится для удельной величины ущерба, приходящегося на одну тонну, размещаемых отходов стекла, то есть считаем удельную величину и  $M = 1$  т.

Такса для исчисления размера вреда  $T_{отх}$  определяется для любых видов стекла в соответствии с пятым классом опасности отходов, причем последний определяется в соответствии с Приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 (ред. от 02.11.2018) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов». Поэтому для любых видов стекла можно принять, как для отходов пятого класса опасности  $T_{отх} = 4000$  руб/т.

Учитывая, что выше было определено  $K_{исп} = 1,3$ , считаем ущерб от размещения отходов.

$$УЩ_{отх} = 1 \cdot 1,3 \cdot 4000 = 5200 \text{ руб/т}$$

«Таким образом, расчет вреда, причиненного почвам отходами стекла, может быть осуществлен в соответствии с известной Методикой. Часть размера вреда, причиненного отходами стекла и обусловленная порчей почвы при захламлении стекла, составляет 5200 руб/т. Для определения части размера вреда о загрязнении почв, определяемого выщелачиванием компонентов необходимо экспериментально определить количество выщелачиваемых компонентов» [11].

### **3.1 Ущерб от складирования отходов стекла в окружающей среде**

Экологическая нагрузка отходов стекла оказывает негативное воздействие на окружающую среду, в частности, на почвы. Этот вред зависит от состава стекла, причем различные типы стекла могут вызывать различные виды ущерба.

Для натрий-кальциевого стекла характерен удельный вред в размере 5200 рублей на тонну стекла. Этот ущерб связан с порчей почв при их захламлении отходами стекла. Важно отметить, что в данном случае величина ущерба определяется исключительно ущербом от размещения отходов стекла, и компоненты, выщелачиваемые из стекла, не оказывают влияния на состав почвы.

Свинцесодержащее стекло, помимо ущерба от размещения отходов, вызывает дополнительный вред в виде выщелачивания свинца (II). Общий размер ущерба для этого вида стекла составляет 7800 рублей на тонну. Важно подчеркнуть, что в данном случае величина ущерба включает как ущерб от размещения отходов, так и ущерб от загрязнения почвы выщелачиваемым компонентом свинца.

Таким образом, эти данные подчеркивают необходимость управления отходами стекла с учетом их состава, чтобы минимизировать негативное

воздействие на почвы и, следовательно, сохранить экологическое равновесие [10].

### **3.2 Экономический эффект, достигаемый за счет устранения захоронения стекла**

При отсутствии спроса на грязный разноразмерный стеклобой отбор из ТКО стекла не рентабелен, что приведет к его захоронению в составе отходов после сортировки. Экономический расчет будет слагаться из: плата НВОС за захоронение. затраты на транспортировку.

Оплата НВОС за захоронение находится по формуле 14:

$$П_1 = V \cdot S_1 \quad (14)$$

где  $V$  – объем стекла, поступаемого на предприятие;

$S_1$  – плата за захоронение 1 тонны, руб.

Подставляем данные в формулу (14):

$$П_1 = 1650 \cdot 71,21 = 117496,5 \text{ руб/год}$$

Затраты на транспортировку находятся по формуле 15:

$$П_2 = V \cdot S_2 \quad (15)$$

где  $S_2$  – плата за транспортировку 1 тонны, руб.

Подставляем данные в формулу (15):

$$П_2 = 1650 \cdot 3500 = 5775000 \text{ руб/год}$$

Суммарный экономический эффект представлен формулой 16:



$$\mathcal{E} = \Pi_1 + \Pi_2 \quad (16)$$

Таким образом,

$$\mathcal{E} = 117496,5 + 5775000 = 5892496,5 \text{ руб/год} = 5,9 \text{ млн руб/год}$$

### **Выводы по разделу:**

Анализ литературных данных подтверждает, что отходы, такие как натрий-кальциевое стекло и свинцесодержащее стекло, наносят серьезный ущерб окружающей среде. Решение этой проблемы может быть обусловлено вторичной переработкой отходов стекла.

В контексте натрий-кальциевого стекла, ущерб обусловлен преимущественно ухудшением окружающей среды в результате складирования отходов. Однако для свинцесодержащего стекла, величина ущерба определяется как ущерб от их размещения, так и от загрязнения почвы свинцом. Удельный вред для натрий-кальциевого стекла составляет 5200 рублей на тонну стекла, вызванных исключительно порчей почвы при их захоронении. В случае свинцесодержащего стекла, помимо ущерба от размещения, выщелачивание свинца (II) дополнительно увеличивает ущерб до 7800 рублей на тонну стекла.

Осуществление переработки этих отходов стекла позволило достичь значительного экономического эффекта, превышающего 5,9 миллионов рублей в год благодаря устранению необходимости их захоронения.

## Заключение

В ходе работы достигнута цель, которой являлось уменьшение отрицательного воздействия на окружающую среду путем разработки технических методов обработки отходов стекла для использования в производстве пеностекла.

Для достижения этих условий исследование, которое было проведено, показало, что пеностекло обладает рядом уникальных физико-механических свойств, что делает его наиболее перспективным для создания новых теплоизоляционных материалов. Этот материал отличается низкой теплопроводностью, высокой прочностью при небольшом весе, химической и биологической стойкостью, а также обладает большой морозоустойчивостью и долговечностью. Все эти качества определяют его высокую конкурентоспособность.

В результате расширения сырьевой базы, снижения себестоимости и упрощения процесса производства с помощью несортového стеклобоя, полученное гранулированное пеностекло обладает повышенной щелочностойкостью по сравнению с обычным, благодаря добавке шихты.

Использование единого полупродукта – гранулированного сырья открывает новые возможности для масштабирования производства и улучшения гибкости линий.

В качестве основы выбраны наиболее подходящие патенты RU 2 526 452 C1 и RU 2 758 829 C1 с учетом необходимых параметров, так же были учтены преимущества и недостатки способов получения пеностекла.

В расчетной части представлена принципиальная технологическая схема предлагаемой технологии переработки стеклобоя. Описаны этапы подготовки сырья и производства гранулированного пеностекла. Проведен подбор технологического оборудования. Рассчитан материальный баланс получения пеностекла с выходом около 84 % от общей массы поступившего неочищенного стеклобоя на производство.

Проведенный расчет предотвращённого экологического ущерба, причиненного отходами стекла и обусловленная порчей почвы при захламлении стекла, составляет 5200 руб/т. Экономический эффект, достигаемый за счет устранения захоронения стекла составил 5,9 млн./год.

Таким образом, предлагаемая технология переработки стекла позволит снизить негативное воздействие отходов на окружающую среду, а также получить продукт заданного качества.

В работе были выполнены следующие задачи:

- проведение патентного поиска технических решений при переработке стекла. Это позволит выявить существующие патентные разработки и инновации, связанные с переработкой стекла, которые могут быть применены в разрабатываемой технологии;
- предложение оптимальной технологии получения стеклобоя, пригодного для производства пеностекла. На основе проведенного анализа и патентного поиска будет разработана оптимальная технология, которая позволит эффективно подготавливать отходы стеклобоя для использования в производстве пеностекла;
- для реализации разработанной технологии необходимо выбрать соответствующее оборудование и провести его расчет, чтобы обеспечить эффективную и безопасную работу системы переработки стеклобоя.

Предложенная технология позволяет вовлекать стеклобой в технологический цикл, а значит, решает экологическую задачу.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Белокопытова А.С. Разработка процессов утилизации стеклобоя путем создания композиционных материалов. // Автореф. дис. канд. техн. наук. \_М., 2018. С.18.
2. ГОСТ Р 56617-2015. Технические требования к стеклобою, предназначенному для использования в производстве стекловолокна. Дата введения 2019 г.
3. Денисова Д.В., Красногоров В.А. Высокопроизводительные комплексы RESOLINE для переработки стеклобоя // Стекло. Glass Russia - 2018 - №5 - С. 76-78.
4. Еременков В.В. Патент № RU 2755286. Технологическая линия переработки стеклобоя.
5. Ефременков В.В. Использование стекольного боя в производстве стеклотары //Стекло. Glass Russia - 2023 - №6 - С. 36-39.
6. Ефременков В.В., Матвеев А.А. Разработка и изготовление оборудования для вторичной переработки стекла. - Glass Russia. - 2019. -№9.- С.30-37.
7. Казьмина О.В. Возможные виды брака в технологии стекла и способы их устранения: Учебное пособие / Казьмина О.В., Мелконян Р.Г. - Томск:Изд-во Томского политех. университета, 2018. - 129 с.
8. Кетов П.А. Минимизация негативного воздействия на окружающую среду отходов стекла путем использования в строительстве / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пермь, 2019.
9. Кетов П.А. Разработка экологически безопасного энергоэффективного строительного ячеистого материала, соответствующего принципам зеленого строительства // Вестник МГСУ. - 2018. - Т.13. - Вып.3(114).- С. 368-377.

10. Кетов П.А., Фукалова Н. И. Переработка свинецсодержащих стекол в строительные материалы // Экология и промышленность России. - 2022. -№4. - С. 24-27.
11. Мелконян Р.Г. Экологические и экономические проблемы утилизации стекла / Р.Г. Мелконян // «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр»: I междунар. конференция. Москва, 16—18 сентября 2022 г. М.: Изд-во РУДН, 2002. С. 157–159.
12. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды», утвержденной Приказом Минприроды России от 08.07.2021 №238 (в ред. Приказа Минприроды России от 11.07.2018 № 316).
13. Минько Н.И., Биналиев И.М. Роль сульфата натрия в технологии стекла // Стекло и керамика. - 2018. - № 11.- С. 3-8.
14. Минько Н.И., Калатоzi В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. -2018, №1.-с.82-88.
15. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по синтезу пеностекол и внедрение их результатов в производство / М.М. Зонхийев, Д.Р. Дамдинова, Р.Р. Беппле, В.Е. Павлов // Вестник ВСГУТУ. — 2019. — № 03. — С. 28-34.
16. О перспективах организации производства гранулированного пеностекла в республике Беларусь / И. М. Терещенко, И. В. Войтов, О. Б. Дормешкин [и др.] // Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. — 2020. — № 2. — С. 98-101.
17. Основы проектирования предприятий производства стекла: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 01-06 «Технология стекла и ситаллов» / И. А. Левицкий, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск: БГТУ, 2021. – 138 с.

18. Павлушкина Т.К., Киселенко Н.Г. Использование стеклобоя в производстве строительных материалов // Стекло и керамика. 2021. №5. С. 27–34.
19. Патент РФ № RU124905U1. Казанцева Л.К. Пеностекло. Публ. 20.02.2013 г.
20. Патент РФ № RU2291125C2. Баранов Е.В. Шихта для получения пеностекла. Публ. 10.01.2007 г.
21. Патент РФ № RU2526452C1. Пузанов А.И. Способ производства гранулированного пеностекла из стеклобоя. Публ. 20.08.2014 г.
22. Патент РФ № RU2745544C1. Лазарев Е.В. Способ получения пеностекла. Публ. 26.03.2021 г.
23. Патент РФ № RU2758829C1. Бердникова Л.К. Способ получения пеностекла. Публ. 02.11.2021 г.
24. Пузанов С.И. Оценка комплексного воздействия стеклобоя на окружающую среду и совершенствование технологий его вторичного использования: Автореф. дис. канд. техн. наук. Пермь, 2019. 18 с.
25. Разработка составов вяжущих с использованием стеклоотходов / Н. И. Бондаренко, N. Bondarenko, В. О. Басов [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2022. — № 1. — С. 83-89.
26. Современные тенденции сбора и переработки стеклобоя / Е.А. Лазько, Н.И. Минько, В.С. Бессмертный, А.А. Лазько // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2021. — № 1. — С. 109-112.
27. Строительные материалы на основе отходов стекла / А. Д. Богатов, А. D. Bogatov, С. Н. Богатова [и др.] // Эксперт: теория и практика. — 2023. — № 1 (20). — С. 44-50.
28. Таймазова К.П., Оказова З.П. Российский рынок стеклобоя IV Междунар. Студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум», 15 февраля-31 марта 2021 г.

29. Технология стекла. Справочные материалы / под ред. П. Д. Саркисова, В. Е. Маневича, В. Ф. Солинова, К. Ю. Субботина. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2019.
30. Тимко А.Ю. Свойство стеклянных и углеродных волокон. Дизайн, технологии и инновации (сборник материалов международной научно-технической конференции. Том Часть 2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологии». 2020. с.114-117.
31. Трич Ю.А. Актуальные аспекты вовлечения отходов стекла во вторичное пользование / Ю.А. Трич // Труды БГТУ. №7. Экономика и управление. — 2020. — № 7(180). — С. 331-333.
32. Трич Ю.А. Ресурсосбережение как фактор конкурентоспособности стекольной отрасли республики беларусь / Ю.А. Трич // Труды БГТУ. №7. Экономика и управление. — 2021. — № 7(171). — С. 233-235.
33. Трофимов Г.В. Профессиональные секреты переработки стеклобоя // Твердые бытовые отходы - 2018 - №10 - С. 22-26.
34. Трушин А.В. Факторы, оказывающие влияние на развитие российского рынка стеклобоя //Аллея науки. -2018.-№10.- с.348-351.
35. Яшкунов А.Г., Лазарева Е.А., Зубехин А. П. Ресурсосберегающая технология строительных стеклоизделий на основе стеклобоя, природного и техногенного сырья // Материалы доклада на Международной научно-практической конференции «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии», Белгород. БГТУ, 2022. №10. С. 332–334.
36. Cocking R. The challenge for glass recycling // Sustainable Waste Management: Proceedings of the International Symposium 9-11 September 2023, Dundee UK. P. 73–78.

37. Doring E. Recycling of post-consumer special glass, present situation and possibilities // Recycling and Reuse of Waste Materials: Proceedings of the
38. G.M. Sadiqul Islam, M.H.Rahman, Nayem Kazi Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice // International Journal of Sustainable Built Environment.- June 2018.- Volume 6.- Issue 1.- Pages 37-44.
39. Glusing A.K., Conradt R. Dissolution kinetics of impurities in recycled cullet // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19-20 March 2021, Dundee UK. P. 29-41.
40. Jakob König, Rasmus R. Petersen, Yuanzheng Yue Influence of the glass–calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass // Journal of the European Ceramic Society. - June 2019.- Volume 34.- Issue 6.- Pages 1591-1598.
41. Monich P.R., Romero A.R., Höllen D., Bernardo E. Porous glass-ceramics from alkali activation and sinter-crystallization of mixtures of waste glass and residues from plasma processing of municipal solid waste // Journal of Cleaner Production.-July 2018.- Volume 188.- Pages 871-878.
42. Patent US 4826788, C03B19/08. Composition for producing foamed glass molded products. Heinz Dennert, Hans V. Dennert, Alois Seidl. Published 2.05.2019.