

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 переработки отходов стеклобоя
для производства стеклоровинга

Обучающийся

Н.Ю. Ермакова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.А. Мельникова

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



Тольятти 2023



Росдистант

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННО

Аннотация

Бакалаврскую работу выполнила: Ермакова Н.Ю.

Научный руководитель доцент кафедры «Химическая технология и ресурсосбережение» Мельникова Д.А.

Тема работы: Оптимизация технологического процесса переработки отходов стеклобоя для производства стеклоровинга.

Целью работы является снижение негативного воздействия на окружающую среду путем разработки технических решений при подготовке отходов стеклобоя для производства стеклоровинга.

Стекло является ценным, высоколиквидным вторичным сырьем. По строению и физико-химическим свойствам стеклобой представляет собой минеральный ресурс антропогенного происхождения, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду. Применение методов вторичного использования отходов стекла основано на таких свойствах стекла, как высокая прочность, химическая инертность и широкий температурный интервал размягчения. Проведенное в работе исследование показало, что технология производства стеклоровинга на основе стеклобоя достаточно проста, не требует сложного оборудования и крупных материальных вложений.

В первом разделе анализируются масштабы образования стекла, как отхода. Оценивается его влияние на окружающую среду. Рассматриваются существующие проблемы, возникающие при переработке стекла. Во втором разделе осуществляется выбор технологии производства стеклобоя для дальнейшего производства стеклоровинга. Рассчитан материальный баланс. В третьем разделе подобрано оборудование для реализации технологического процесса. Рассчитан предотвращенный экологический ущерб. Заключение содержит основные выводы и результаты работы. Работа изложена на 48 страницах, включает 9 рисунков и 8 таблиц.

Содержание

Введение.....	4
1 Общая характеристика стеклянных отходов и их влияние на окружающую среду	6
1.1 Влияние стеклобоя как компонента твердых отходов на окружающую среду	6
1.2 Существующие проблемы вторичной переработки стеклобоя.....	8
1.3 Анализ технологий получения стеклоровинга	10
2 Выбор технологии переработки стеклянного боя в сырье производства стеклоровинга	13
2.1 Количество и процентное содержание исходного сырья	13
2.2 Предлагаемая технология получения стеклобоя для производства стеклоровинга.....	13
2.3 Патентный поиск по оптимизации оптической сепарации	15
2.4 Расчет материального баланса.....	18
3 Подбор и расчет оборудования процесса получения стеклобоя заданного качества	25
3.1 Расходный бункер	25
3.2 Магнитный сепаратор.....	26
3.3 Подбор дробильного оборудования	30
3.4 Электростатический сепаратор	33
3.5 Сортировщик стеклобоя по цвету частиц	33
4 Экологическая и экономическая оценка ущерба.....	37
4.1 Оценка экологической техногенной нагрузки, формируемой отходами стекла.....	37
4.2 Экономический эффект, достигаемый за счет устранения захоронения стекла.....	41
Заключение	43
Список используемой литературы и используемых источников.....	44

Введение

Одним из ценных материалов, направляемых на свалку, является стекло. Стеклобой – неразлагающийся отход, засоряющий почвенный слой земли, подлежащий переработке или соответствующему захоронению (электронные или фторосодержащие стекла). В обзоре технической литературы отмечается, что применение отходов стекла для производства строительных материалов уменьшает потребление природных ресурсов, минимизирует выбросы парниковых газов и устраняет загрязнение окружающей среды отходами.

«Стеклобой представляет собой трудноутилизируемый отход, неподвергающийся воздействию воды, атмосферных явлений (осадков, солнечной радиации, температурных перепадов) и не разрушающийся под воздействиями органических, минеральных и биологически активных организмов. Период распада материала составляет от 500 до 1000 лет. Доля стеклобоя в твердых бытовых отходах крупных городов нашей страны составляет 8-18 %, что составляет 2,4-2,9 млн. тонн» [18]. «Если количество твёрдых бытовых отходов в год в России принять в размере 400-700 кг на человека, то на миллион человек образуется 60-100 тыс. тонн стеклобоя в год» [19].

«Именно строительные материалы представляются наиболее рациональным продуктом утилизации стеклобоя вследствие сопоставимости объемов их производства с объемами образования отходов стекла» [2]. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является применение отходов стекла для производства стеклоровинга. Ожидается, что в течение прогнозируемого периода (2022-2027 гг.) среднегодовой темп роста рынка стеклоровинга составит 5,5%. По оценкам специалистов, в прогнозируемом периоде ожидается стремительный рост использования стеклоровинга при строительстве объектов инфраструктуры. Главным продуктом из стекловолокна в строительстве является стеклопластиковая арматура, которая разработана как замена для металлической арматуры. «При одинаковых

характеристиках стоимость стеклопластиковой арматуры ниже стальной примерно на 30%. Материал значительно легче металлического аналога, что снижает затраты на перевозку. Так, 2 тонны стального проката стоят столько же, сколько 160 кг композитного» [3].

Таким образом, использование стеклобоя в качестве компонента при разработке составов строительных материалов является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволяет получить значительный экономический и экологический эффект. Учитывая экологическую опасность для окружающей среды не утилизируемых отходов стекла, их вторичное использование с получением экологически безопасных строительных материалов по малоотходной технологии является актуальной задачей.

ООО «ЭкоРесурсПоволжье» - экотехнопарк, принимающий коммунальные отходы (ТКО) для сортировки с г. Тольятти, г. Жигулевск и Ставропольский район – 250 тыс. тонн в год.

Целью представленной работы является снижение негативного воздействия на окружающую среду путем разработки технических решений при подготовке отходов стеклобоя для производства стеклоровинга.

Задачи:

- проанализировать действующие технологии получения стеклянного боя;
- провести патентный поиск технических решений при переработке стекла;
- предложить оптимальную технологию получения стеклянного боя, пригодного для производства стеклоровинга;
- осуществить выбор и расчет основного оборудования предлагаемой схемы.

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» [11].

«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)» [2], [6].

«Допустимая величина выщелачивания стекла водой в пересчете на мг Na_2O с 1дм^2 находится в пределах 0,71–0,76» [25].

«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 кг/м^3 будет при выщелачивании водой выделять 10,7 г Na_2O или 13,8 г чистой щелочи NaOH . Следовательно, в год

из 60–100 тысяч тонн стеклобоя на миллион жителей выделится 828–1380 кг чистой щелочи, что приводит к деградации почвенного ресурса» [11].

«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» [8].

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

Экологическая опасность отходов стекла имеет несколько составляющих:

«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 (II). В последнем случае проблема осложняется тем, что не существует надежной технологии вторичного использования свинецсодержащего стекла, а попадая на полигоны отходов соединений свинца (II) вымываются из стекла электроннолучевых трубок, где свинец (II) содержится в значительных количествах, и попадают в грунтовые воды. Наконец, вторичное использование отходов стекла позволяет снижать эмиссию оксида углерода (IV), вследствие замены специально сваренного стекла или снижения температуры обработки материалов при использовании отходов стекла, как плавня» [10].

1.2 Существующие проблемы вторичной переработки стеклобоя

Выделение из ТКО отходов стекла для последующей переработки и утилизации путем первичной сортировки в местах образования ТКО при раздельном или неполном раздельном сборе, а также после сортировки (ручной и механизированной) на мусоросортировочных предприятиях трудоемко и экономически мало рентабельно. Получаемое стекло представляет собой смесь различных сортов стекла и не может быть использовано вторично в стекольной промышленности – одном из основных потенциально возможных потребителей стеклобоя. Выделение стеклобоя из потока при разделении ТКО представляет очень сложную задачу по нескольким причинам. Во-первых, стеклобой маленького размера плохо отделяется от других компонентов, вследствие невысокой плотности, что осложняется интенсивным дополнительным измельчением материала в процессе перемещения и обработки. Во-вторых, из-за высокой прочности и травмоопасности стеклобоя высока вероятность травмирования персонала и повреждения механизмов. Наконец, в-третьих, низкая стоимость вторичного стекла делает процесс его извлечения низкорентабельным.

«Утилизация вышедшей из употребления стеклянной тары (рисунок 1) может проводиться по трем направлениям:

- использование в качестве вторичного сырья при получении новой стеклянной тары;
- применение в качестве основного сырьевого компонента в производстве различных стройматериалов;
- вывоз в составе твердых коммунальных отходов (ТКО) на полигоны» [7].



Рисунок 1– Жизненный цикл стеклянной тары

При производстве новой тары с применением стеклобоя предъявляются жесткие требования к качеству будущей тары (банок, бутылок) и требуется качественная очистка «вторичного стекла», что приводит к большим затратам, а иногда является просто невозможным.

Вывоз на полигоны также не является эффективным способом использования жизненного цикла стеклобоя. Отходы из стекла разлагаются сотни лет, а также необходимы большие площади полигонов для захоронения стеклянных отходов.

Поэтому при поиске наиболее приемлемых технологических решений по вторичному использованию стеклобоя, как и при переработке других видов отходов, следует исходить из таких решений, которые позволяют оптимизировать экологический, экономический и социальный эффект.

Применение стеклобоя для производства стеклоровинга.

«Ровинг – это пучок нитей, пропитанных замасливателем. Производство стеклоровинга заключается в вытягивании стеклянных нитей диаметров от 13 до 30 мкм из расплавленного стекла, которые в дальнейшем соединяются в пучки – комплексную нить. В стеклоровинг входит от 10 до 60 комплексных нитей. При производстве стеклянные нити обрабатываются замасливателями специальных составов в зависимости от назначения ровинга» [16].

Арматура из стеклопластика или других композитов успешно заменяет стальные аналоги. Все нормы по изготовлению композитной полимерной арматуры регламентирует ГОСТ 31938-2012.

1.3 Анализ технологий получения стеклоровинга

Использование стеклобоя в строительстве сводится к изготовлению строительных материалов и изделий по технологиям, предусматривающим его повторное плавление.

«Этапы создания стеклянных нитей:

- сырье расплавляют;
- полученный вязкий расплав под высоким давлением пропускается через сотни микроскопических отверстий. Это придает материалу нитеобразную форму;
- охлаждают и наматывают на специальные катушки;
- готовое стекловолокно обрабатывают замасливателем» [14].

«Характеристиками ровинга являются количество, текс и диаметр элементарной нити. Выпускается ровинг с номинальной линейной плотностью от 84 до 5040 текс и более и диаметром элементарного волокна 10 ± 1 и 13 ± 1 микрон. Для производства ровингов используется бес щелочное алюмоборосиликатное стекло «Е». Содержание щелочей в составе стекла — не более 1 %» [24], [25], [27].

«Стекловолокно (ровинг или стеклоровинг) изготавливается из стекла класса "Е" и имеет характеристики, представленные в таблице. Почти 90 %

всех стеклянных волокон, которые выпускаются сегодня в мире это стекловолокно марки E. В настоящее время используется два типа стекловолокна марки E. В большинстве случаев E стекло содержит 5–9 масс. % оксида бора» [7], [27].

Характеристики стекловолокна представлена в таблице 1.

Таблица 1- Характеристики стекловолокна

Тип волокна	Состав, масс. %									
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ZrO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
E (с бором)	52-56	4-6	12-15	21-23	0.4-4	0.2-0.5	0-1	0-0.2	0.2-0.5	0.2-0.7
E (без бора)	59-60	-	12-13	22-23	3-4	0.5-1.5	0.6-0.9	0-0.2	0.2	0.1

Стекловолокно марки E получают на основе системы MgO-CaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂.

Содержание SiO₂ в борсодержащих стеклах марки E составляет 52-56 мас. %, содержание Al₂O₃-12-15мас. % Содержание CaO отличается незначительно и составляет 21-23 мас.%. Содержание MgO в стекле варьируется от десятых долей процента до 4 мас.%. Температура получения волокон из борсодержащего E-стекла составляет 1140–1185°C.

«В качестве альтернативы получают E-стекла, не содержащие бора, например, волокно Advantex фирмы OwensCorningCorp. Они содержат, мас. %: SiO₂-59-60; Al₂O₃-12-15; CaO-22-23; MgO-3-4. Температура формования волокна из E-стекла данного типа составляет 1250–1260°C. Более высокая температура получения экологически чистых стеклянных волокон приводит к росту потребления энергоресурсов. Механические свойства обоих видов волокон на основе E-стекла почти одинаковы. Прочность на разрыв составляет 3100-3800МПа, однако модуль упругости у волокон без оксида бора выше (80-81ГПа), чем у обычных волокон 29 (76–78 ГПа). Основным отличием стекловолокна марки E без бора является более высокая кислотостойкость» [28].

Для производства стеклоровинга необходимо вытягивание стеклянных нитей диаметров от 13 до 30 мкм из расплавленного стекла, которые в дальнейшем соединяются в пучки – комплексную нить. В стеклоровинг входит от 10 до 60 комплексных нитей.

«Нити производят не только с помощью стеклянного расплава. Также используется стекло округлой формы, которое сначала сплавляют. Такая технология стоит существенно дороже» [26].

Стеклянные нити обязательно обрабатываются замасливателями специальных составов в зависимости от назначения ровинга. Это позволяет сделать ровинг водонепроницаемым и устойчивым к трению и растяжению, а также способствует объединению волокон в комплексную нить.

Выводы по разделу

«Техногенная нагрузка, формируемая отходами стекла, обусловлена двумя основными факторами: выведением из оборота земель под складирование стеклобоя и выщелачиванием химических компонентов из состава стекла» [13]. «Основными специфичными свойствами стекла, отличающими его от других компонентов ТКО и первичного сырья следует признать ионообменные свойства и пиропластичность» [26]. Стеклоровинг – востребованный продукт переработки стеклобоя. Для производства ровингов используется бесщелочное алюмоборосиликатное стекло «Е». Содержание щелочей в составе стекла — не более 1 %.

2 Выбор технологии переработки стеклянного боя в сырье производства стеклоровинга

2.1 Количество и процентное содержание исходного сырья

Ежегодно образуется порядка 1600 тонн вторичного стекольного сырья. Состав стекла по цвету не равномерен, наибольшее процентное содержание прозрачного и коричневого стекла. Средний засор 20%.

Количество и процентное содержание исходного сырья представлено в таблице 2.

Таблица 2 - Количество и процентное содержание исходного сырья

год	стекло						Всего
	прозрачное	%	зеленое	%	коричневое	%	
2020	670	45	220	15	589	40	1479
2021	688	44	246	16	886	56	1574
2022	570	35	258	16	822	50	1650
Средние значения	-	41		15	-	49	1568

«Ровинг – это основа будущей арматуры. От него зависят ее прочностные и другие технические характеристики. Поэтому для изготовления композитной арматуры очень важно использовать качественное сырье» [3].

ГОСТ 17139-2000 Стекловолокно. Ровинги. Согласно ГОСТ 17139-2000 Стекловолокно. Ровинги. Для стеклоровинга требуется прозрачное стекло. Содержание цветного стекла свх 5%.

2.2 Предлагаемая технология получения стеклобоя для производства стеклоровинга

Сырье для производства стекловолокна (в соотношении 1,5 тонны на 1 тонну готовой продукции):

- стеклобой листовой бесцветный;
- стеклобой бутылочный бесцветный.

Допускается использование цветного стекла листового и бутылочного стеклобоя до 5% от общей массы сырья. Стекло разного цвета имеет разный химический состав.

Действующая технология получения стеклобоя из ТКО предусматривает ручную сортировку отходов для извлечения изделий из стекла и стадию боя этих изделий путем сброса их в контейнер (удар о твердую поверхность бутылочного стекла). При сортировке отбирается вторичное сырье для последующей утилизации, в том числе бутылочное стекло (зеленое, коричневое, прозрачное).

Данная технология не предусматривает предварительную очистку изделий от загрязнений, сортировку по цвету и размерам. Состав стеклобоя – смешанный, несортированный, размер не определен, имеются загрязнения различного характера. Таким образом, получаемый стеклобой требует дополнительные стадии очистки и сортировки для использования его в качестве сырья производства стеклоровинга [26], [34].

Ниже представлено описание предлагаемой технологии (рисунок 2).

Стеклобой поступает на мойку, затем идет этап сортировки стеклобоя по цвету, сушка. После сушки стеклобой поступает на магнитный сепаратор, проходит дробилку и попадает на вибрационные сита, позволяющие выделить фракцию стекла требуемого размера. Крупные частицы стекла возвращаются в дробилку для дополнительного измельчения. Далее измельченное стекло подается в воздушный сепаратор, в котором за счет вверх идущего потока воздуха происходит очистка стекла от частиц пыли и остатков этикеток. Далее очищенное стекло попадает в сортировщик, который позволяет селективно разделить частицы стекла различного цвета.

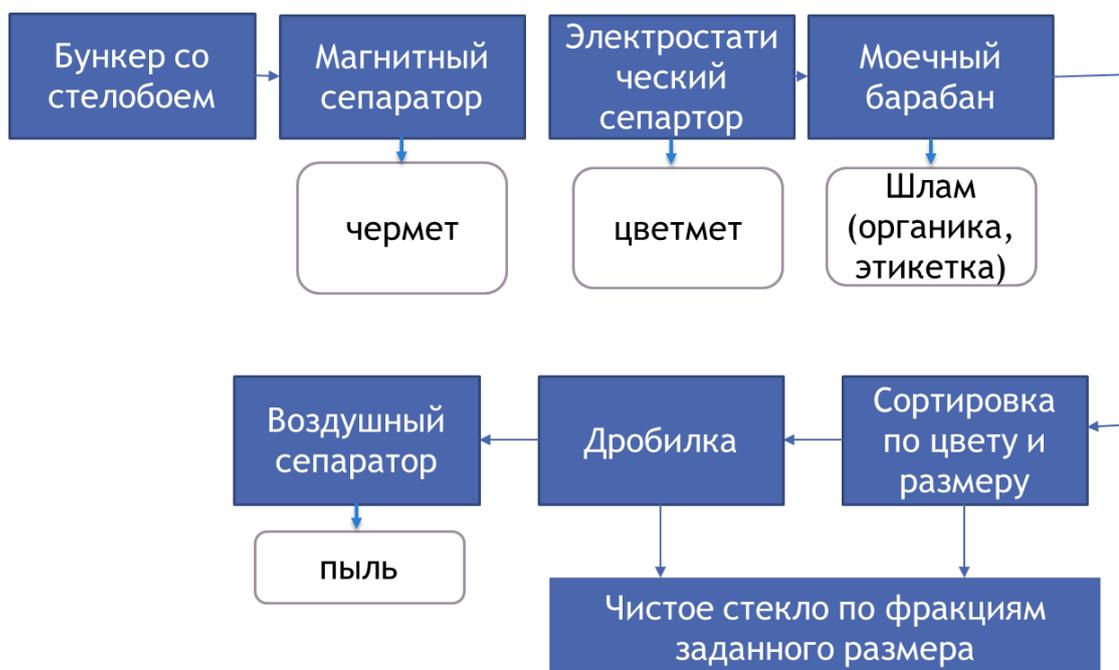


Рисунок 2 – Принципиальная схема переработки стеклобоя

Результатом предлагаемой технологии станет получение фракций стекла заданного размера и цвета, пригодного для использования в качестве сырья производства стеклоровинга.

2.3 Патентный поиск по оптимизации оптической сепарации

Был проведен патентный поиск с целью оптимизации процесса оптической сепарации с целью повышения качества сортировки. Результатом которого стал патент №2755286 Ефременков Валерий Вячеславович (RU) [9].

«Операция сепарации какого-либо цветного или бесцветного стекла из разноцветной смеси производится по показаниям оптического устройства, анализирующего цвет стекла, и выполняется с помощью эжекторов (пневматических клапанов), «отстреливающих» из потока стеклобоя узконаправленными струями сжатого воздуха частицы стекла с заданным для сепарации цветом» [4]. «При этом наиболее оптимальным является алгоритм оптической сепарации, при котором из смеси разноцветного стекла, сбрасываемого с ленточного питателя сепаратора в; зону установки

оптической системы, анализирующей цвет стекла, сначала «отстреливаются» (сепарируются) более темные частицы стекла, что связано с большей чувствительностью оптической системы, а выделение бесцветного стеклобоя происходит после выделения цветного стекла, причем сепарация бесцветного стекла для повышения его качества производится за два цикла» [8].

«Также для экономии сжатого воздуха, расход которого достаточно большой (количество эжекторов на одном сепараторе варьируется от 60 до 120 и более, а расход сжатого воздуха давлением 0,6кПа составляет 600...2400 л/мин), необходимо первоначально «отстреливать» тот цветной стеклобой, которого меньше находится в смеси, а это в рассмотренных схемах отсутствует» [34].

«Оптимизация процесса оптической сепарации при этом достигается за счет того, что при наладочных работах оптических сепараторов в памяти их микропроцессорных блоков управления предварительно записываются параметры, полученные при оптическом сканировании керамики, коричневого, зеленого и бесцветного стеклобоя, а также такие дополнительные параметры, как «сканируемое стекло не коричневого цвета», «сканируемое стекло не зеленого цвета», «сканируемое стекло не бесцветное».

Наличие этих дополнительных параметров позволяет, например, при прохождении через оптический сепаратор стеклобоя с преимущественным содержанием коричневого стекла направлять коричневое стекло транзитом через оптический сепаратор, а «отстреливать» сжатым воздухом зеленые и бесцветные стекла, то есть, не коричневые» [7]. «Такой режим сепарации позволяет существенно экономить расход сжатого воздуха и снижает погрешности сепарирования, так как количество операций «отстреливания» значительно снижается за счет того, что стеклобой с преимущественным процентным содержанием (будь то коричневый, зеленый или бесцветный стеклобой) не «отстреливается».

При этом один и тот же оптический сепаратор (в данной линии это второй и третий оптические сепараторы) в зависимости от выбранного режима

управления (все режимы управления записываются в памяти микропроцессорного блока управления оптическим сепаратором) может в предлагаемой линии работать как в режиме транзитного пропуска через себя зеленого, коричневого и бесцветного стекла, так и в режиме «отстреливания» этих разноцветных стекол, если их процентное содержание не является преимущественным в смеси» [7].

«Другим преимуществом предлагаемой технологической линии переработки стеклобоя является то, что финишная оптическая сепарация бесцветного стеклобоя, которая выполняется после операций предварительного удаления из него коричневого и зеленого стекла, производится двумя последовательно соединенными оптическими сепараторами, окончательно повышающими качество сепарации. А это особенно важно, так как примеси цветного стекла в бесцветном стеклобое при производстве стеклянной тары премиум класса практически недопустимы» [9]. «При этом важно отметить то, что оптическая сепарация бесцветного стеклобоя осуществляется теми же самыми сепараторами, выполняющими выделение из смеси разноцветного стеклобоя коричневого и зеленого стекла, но работающими в разных режимах сепарации» [9].

«Следует отметить и то, что образующиеся на стадии финишной оптической сепарации бесцветного стекла разноцветные стеклянные отходы могут по завершении переработки конкретной партии стеклобоя с преимущественным процентным содержанием стекла того или иного цвета пройти 2-3 цикла повторной оптической сепарации для окончательного разделения примесей по цвету стекла» [33].

Вывод по патентному решению: «Изменяя режимы работы технологической линии и задавая второму и третьему оптическим сепараторам разные параметры, соответствующие разным партиям стеклобоя с преимущественным процентным содержанием коричневого, зеленого и бесцветного стеклобоя, можно оптимизировать процесс оптической сепарации и минимизировать расход сжатого воздуха за счет «отстреливания» частиц

стекла того цвета, которого в каждой конкретной партии стеклобоя меньше» [5].

«При этом параметры, записываемые в микропроцессорные блоки (не показаны) первого, четвертого и пятого оптических сепараторов остаются неизменными» [8].

«Также за счет того, что при переработке партий стеклобоя, имеющих разный преимущественный цвет, используется для разделения стеклобоя на коричневое, зеленое и бесцветное стекло всего два оптических сепаратора (основное разделение производится на втором и третьем сепараторах), уменьшается стоимость оборудования всей линии, в которой наиболее дорогими аппаратами являются оптические сепараторы. Кроме того, за счет двухкаскадной очистки бесцветного стеклобоя существенно повышается его качество, а возможность использования (или утилизации) отсевов разноцветного стекла также повышает функциональные возможности линии» [9].

На основе анализа патента предлагается установка двух оптических сепараторов.

2.4 Расчет материального баланса

Материальный баланс любого технологического процесса или части его составляется на основании закона сохранения веса (массы) вещества (формула 1):

$$\sum G_{исх} = \sum G_{кон} \quad (1)$$

где $\sum G_{исх}$ - сумма весов (масс) исходных продуктов процесса;

$\sum G_{кон}$ - сумма весов (масс) конечных продуктов процесса в тех же единицах измерения.

В обычном известково-натриевом стекле при добавлении Cr_2O_3 и Fe_2O_3 стекло становится изумрудно-зеленым, при добавлении сероуглеродного или MnO_2 и Fe_2O_3 стекло становится коричневым [32].

Ежегодно образуется порядка 1600 тонн вторичного стекольного сырья, в таблице 3 показано процентное количество собранного стекла по цветам.

Состав стеклобоя – смешанный, несортированный, размер не определён, имеются загрязнения различного характера.

Состав стекла по цветам не равномерен, наибольшее процентное содержание прозрачного и коричневого стекла. Средний засор - 20%.

Таблица 3 – Отбор стекла при сортировке на предприятии ООО«ЭкоРесурсПоволжье»

Год	Стекло						Всего
	Прозрачное	%	Зеленое	%	Коричневое	%	
2020	670	45	220	15	589	40	1479
2021	688	44	246	16	886	56	1574
2022	570	35	258	16	882	50	1650
Ср. значения	-	41		15	-	49	1568

Рассчитаем требуемую производительность:

$$\Pi = \frac{G}{D} / \text{Траб} \quad (2)$$

где G – количество стекла. Поступающего на переработку, кг/год;

D – количество рабочих дней в году;

Траб – количество рабочих часов на ОАО «ЭкоРесурсПоволжье»;

Расчёт ведем исходя их Производственного календаря 2022 года.

$D=247$ дней в году.

$\text{Траб} = 8\text{ч}$; Принятый рабочий день на предприятии.

Подставляем данные в формулу (1):

$$П = \frac{1650}{\frac{247}{8}} = 835 \text{ кг/ч}$$

Все дальнейшие расчеты будем вести для 835 кг/ч.

Для расчета материального баланса будем использовать процент отбора вторичных материальных ресурсов сортировочного комплекса ООО«ЭкоРесурсПоволжье», который приведен на рисунке 12.

Для удобства выпишем процент отбора различных фракции из общего потока ТКО, поступающего на сортировочный комплекс ООО«ЭкоРесурсПоволжье», в таблицу 4.

Таблица 4 – Процент отбора различных фракции сортировочного комплекса ООО «ЭкоРесурсПоволжье»

Технологический пост	Фракция	Процент
Бункер со стеклобоем	Получения стеклобоя	-
Магнитный сепаратор	Черные металлы	10%
Электростатический сепаратор	Цветные металлы	7%
Моечный барабан	Необезвоженный шлам	8%
Оптический сепаратор 1	Коричневое стекло	45%
Оптический сепаратор 2	Зеленой стекло	11,5%
Дробилка	Получение необходимых фракций по размеру	-
Воздушный сепаратор	Этикетки	1,5%

Блок-схема материальных потоков технологического процесса приведена на рисунке 3 и материальный баланс на рисунке 4.

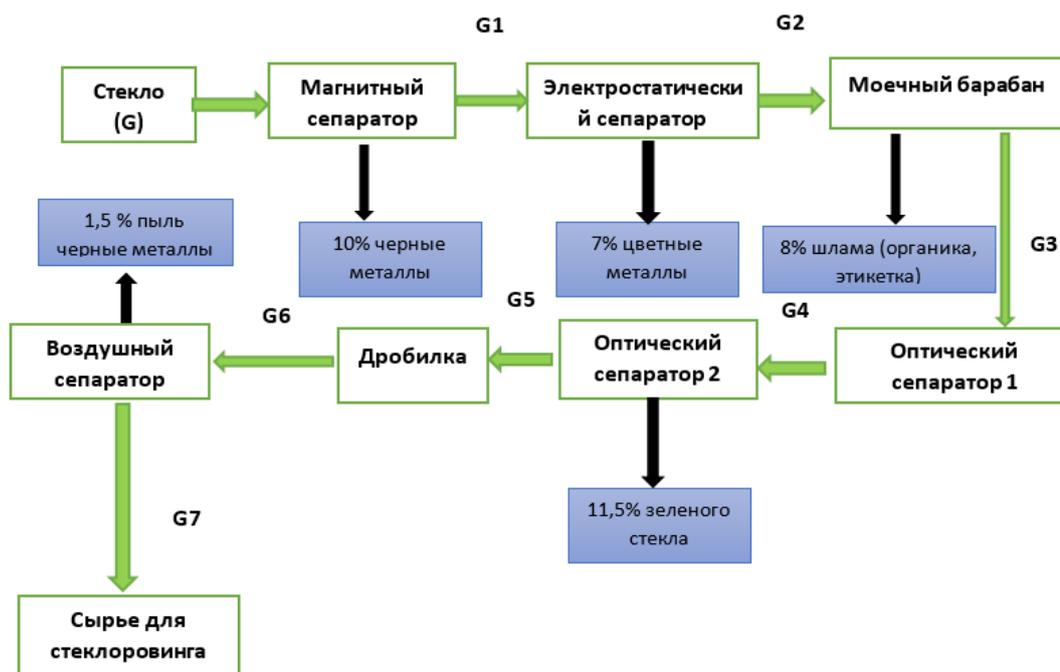


Рисунок 3 - Схема материальных потоков применяемого технологического процесса

Применительно к данному процессу эту формулу 1 можно представить в следующем виде (формула 3):

$$G = \sum G_i \quad (3)$$

где G_i – i -й поток.

Расчет материального баланса ведем, используя данные предприятия из таблиц 5 и 6, рассчитывая каждый компонент по формуле 4:

$$G_i = \frac{\Pi \cdot (x + a)^n \cdot \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k \cdot a^{n-k} (100 - ni)}{100} \quad (4)$$

где Π – часовая производительность/общий поток стекла, кг/час;

ni – содержание i -ого компонента на каждом этапе технологического процесса, %.

Магнитный сепаратор:

$$G1 = \frac{835 \cdot (100 - 10)}{100} = 751,5 \text{ кг/ч}$$

Электростатический сепаратор:

$$G2 = \frac{751,5 \cdot (100 - 7)}{100} = 698,9 \text{ кг/ч}$$

Моечный барабан:

$$G3 = \frac{698,9 \cdot (100 - 8)}{100} = 642,99 \text{ кг/ч}$$

Оптический сепаратор 1:

$$G4 = \frac{642,99 \cdot (100 - 45)}{100} = 353,65 \text{ кг/ч}$$

Оптический сепаратор 2:

$$G5 = \frac{353,65 \cdot (100 - 11,5)}{100} = 312,98 \text{ кг/ч}$$

Дробилка:

$$G5 = G6 = 312,98 \text{ кг/ч}$$

Воздушный сепаратор:

$$G7 = \frac{312,98 \cdot (100 - 1,5)}{100} = 308,29 \text{ кг/ч.}$$

Таблица 5 – Материальный баланс применяемой технологической схемы

Приход			Расход		
Вещество	Кг/ч	%	Вещество	Кг/ч	%
Стекло	835	100	Черный металл	83,5	10
			Цветной металл	52,6	7
			Влажный шлам	55,9	8
			Коричневое стекло	289,35	45
			Зеленое стекло	40,67	11,5
			Пыль	4,69	1,5
			Стеклобой, подготовленный для стеклорвинга	308,29	17
Итого	835	100	Итого	835	100

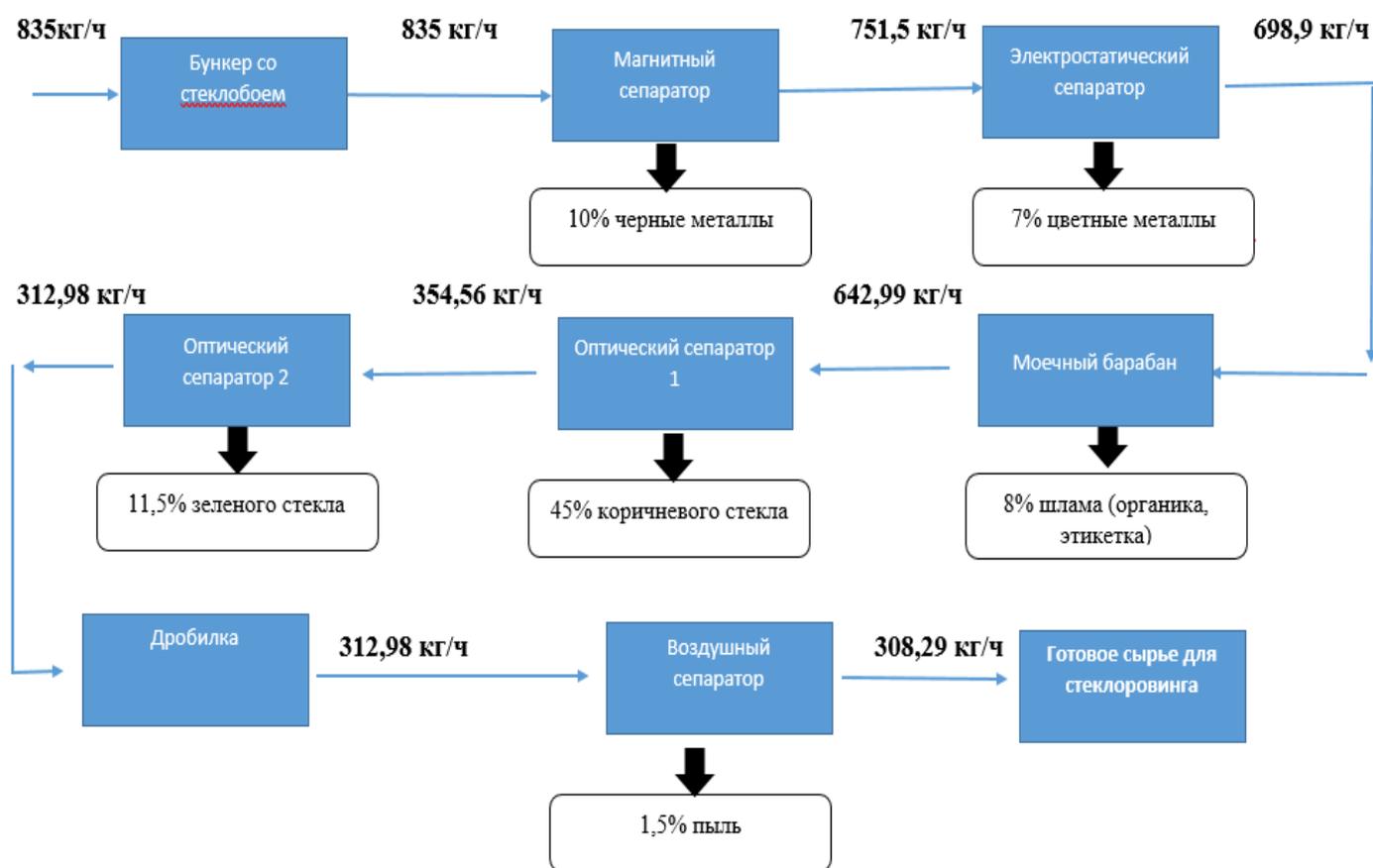


Рисунок 4 - Процент отбора вторичных материальных ресурсов предлагаемого технологического процесса

Выводы по разделу 1.

К качеству сырья производства стеклорвинга предъявляются определённые требования, включающие в себя требования к форме, размерам, цвету, степени очистки и химическому составу исходного стекла.

В представленной главе рассмотрена технология переработки стеклобоя.

Выводы, что используемая технология, включающая в себя ручную сортировку стеклянной тары из ТКО (твердые коммунальные отходы) и бой стекла путем сброса в контейнер, не позволяет получить стекло заданного качества для производства стеклоровинга.

В связи с чем была предложена технология, включающая дополнительные стадии дробления, очистки и разделения стеклобоя. Рассчитанный материальный баланс показал, что при входных данных: стекло 835 кг/ч, на выходе будем иметь 308,29 кг/ч подготовленного для стеклоровинга стеклобоя.

Предложенная технология должна обеспечить необходимое качество стекла перед подачей его на стадию производства стеклоровинга.

3 Подбор и расчет оборудования процесса получения стеклобоя заданного качества

3.1 Расходный бункер

ГОСТР 56617—2015 регулирует требования «Технические требования к стеклобою, предназначенному для использования в производстве стекловолокна». Метод получения стеклобоя при сортировке: удар о твердую поверхность бутылочного стекла. Расход стеклобоя на получение 1 кг стеклоровинга в среднем составляет 1,5кг.

«Бункера устанавливают над технологическим оборудованием для обеспечения его непрерывной работы. Обычно бункера рассчитывают на –1,5–2,0-часовой запас материала» [22]. «На производстве применяются бункера прямоугольного поперечного сечения. Верхняя часть бункера имеет вертикальные стенки, высота которых не должна превышать более чем в 1,5 раза размеры бункера в плане, нижнюю часть его выполняют в виде усеченной пирамиды с несимметричными наклонными стенками. Для полного опорожнения бункера угол наклона стенок пирамидальной части на 10–15° превышает угол естественного откоса загружаемого материала в покое и угол трения о его стенки. Ребро двухгранного угла между наклонными стенками имеет угол наклона к горизонту не менее 45°, а при хранении влажного материала с большим содержанием мелких фракций — не менее 50°. Размеры выходного отверстия не менее 800 мм» [29].

Требуемый геометрический объем бункера находим по формуле (5):

$$V_{\text{геом}} = \frac{\Pi \cdot n}{\eta} \quad (5)$$

где Π - расход материала, м³ /ч;

n - 2 — запас материала;

η - — коэффициент заполнения, принимаем равным 0,85–0,9.

Определим требуемый геометрический объем бункера:

Расход материала определяем по формуле (6):

$$P_M = \frac{P}{\rho} \quad (6)$$

где P – производительность технологической линии, кг/ч; $P=835$ кг/ч (на эту производительность рассчитан материальный баланс);

ρ – плотность материала, кг/м³, плотность стекла принимаем 2600 кг/м³

Рассчитаем расход материала:

$$P_M = \frac{835}{2600} = 0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$$
$$V_{\text{геом}} = \frac{0,3 \cdot 2}{0,85} = 0,7 \text{ м}^3$$

Следовательно, согласно расчетам, выбираем бункер объемом 0,7 м³.

Количество материала, поступающего на ленточный конвейер (транспортер), равно 835 кг/ч, что соответствует определенной производительности, по которой можно выбрать марку конвейера.

3.2 Магнитный сепаратор

«Помимо оксидов в стеклосое любой группы содержатся загрязняющие вещества (загрязнения), к которым относят свободные магнитные или немагнитные металлы, как правило, не окисляемые в рамках процесса стекловарения и, следовательно, нерастворимые» (таблица 6) [7].

«Для отбора цветных металлов предназначены вихретоковые магнитные сепараторы, но их установка в данной технологической схеме нерентабельна, так как процент отбора цветных металлов не велик» [7]. При помощи магнитного сепаратора производится удаление черных металлов.

Таблица 6 - Требования к соотношению групп стеклобоя с содержанием в нем металлов

Тип загрязняющего вещества	Группы стеклобоя		
	I	II	III
-	Рабочая область значений		
-	От 0 до 5% в партии сырья	От 5 до 15% в партии сырья	Более 15% в партии сырья
-	Массовая доля, %	Массовая доля, %	Массовая доля, %
Магнитные металлы	<0,3	<0,2	<0,1
Немагнитные металлы	<0,01	<0,005	<0,005

Принцип работы железоотделителей, вне зависимости от их конструктивных или других отличий, заключается в применении сил магнитного поля, и выделении из массы инертных материалов соединений, которые имеют в своем составе металлы.

В рабочей зоне железоотделяющего устройства создается магнитное поле, при помощи которого металлические фракции моментально освобождаются из общей массы ТКО, строительного мусора, пластиковых отходов, стеклобоя и т.д.

«Сепаратор выполнен в виде короткого ленточного конвейера с постоянным магнитом, закрепленным на подвесах. Сепаратор расположен над конвейером ленточным сортировочным перпендикулярно его оси и предназначен для отбора и удаления магнитных фракций ТКО. Принцип действия сепаратора заключается в притягивании чёрных металлов постоянным магнитным полем к движущейся транспортной ленте с последующим сбросом их в месте сбора» [14].

Подвесные магнитные сепараторы с автоматической очисткой устанавливаются над ленточным конвейером, на расстоянии 200-500 мм от ленты. Необходимая модель подвешенного магнитного сепаратора выбирается исходя из ширины конвейерной ленты, ширины распределения материала по ленте и высоты насыпи материала. «При традиционном способе установки подвешенного сепаратора (перпендикулярно направлению движения ленты) длина магнитной системы сепаратора (рисунок 5) должна быть достаточной для

перекрытия транспортируемого потока материала и обеспечения возможности автоматического сброса примесей за конвейерную ленту» [17].

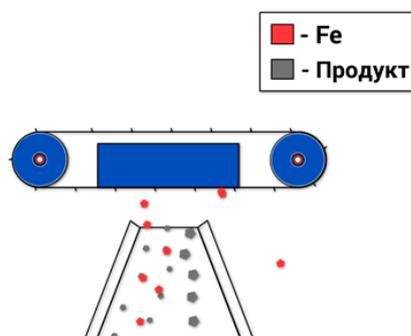


Рисунок 5 – Подвесной магнитный сепаратор

Для обеспечения максимальной эффективности сепаратора СМПА необходимо также определить оптимальное место для его установки (рисунок 6). «Большая эффективность сепарации может быть достигнута установкой его над приводным барабаном, в месте схода материала с конвейера, где материал находится в состоянии свободного падения. Установка подвешенного сепаратора на месте схода материала с ленты также желательна при сепарации крупнофракционного материала» [15].

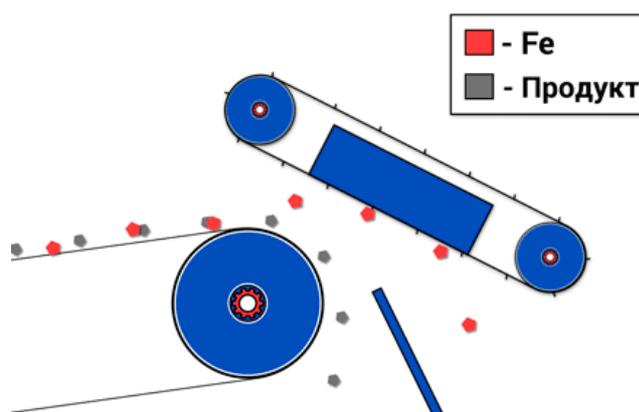


Рисунок 6 - Установка магнитного сепаратора под наклоном

Данная серия магнитных сепараторов специально спроектирована для работы в сложных условиях. Во время движения по конвейеру, материал

попадает в зону действия магнитного поля, где начинается его сепарация. Под действием мощного магнитного поля ферромагнитные частицы притягиваются к поверхности (транспортной ленте) сепаратора и удерживается на нем до момента его автоматической очистки.

С учетом условий эксплуатации (высота слоя продукта на ленте, скорость конвейера) подбирается модель сепаратора, способного улавливать необходимые размеры.

При выборе магнитного сепаратора необходимо также учитывать свойства, состав сепарируемого продукта и условия эксплуатации.

Требования к выбору сепаратора представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Требования к выбору сепаратора

Наименование показателя	Требование
Крупность продукта	Под крупность продукта подбирается тип сепаратора и его габаритные характеристики. Максимальный размер продукта может достигать 400 мм, минимальный размер 20-10 мкм. Для переработки крупнокускового материала подбираются сепараторы с повышенным запасом прочности (ЭРГА КБСМ, ЭРГА СМБМ), для сухой сепарации мелкодисперсных продуктов разработаны специальные герметичные конструкции, снижающие залипание на рабочих поверхностях, а также потери и унос немагнитного материала (ЭРГА СМВА, ЭРГА СМБМ-2)
Температура продукта	В зависимости от температуры материала подбирается сплав магнитной системы. Постоянные редкоземельные магниты стандартного исполнения имеют рабочую температуру до 60 °С.
Влажность продукта	Для сухой магнитной сепарации важным фактором является влажность сепарируемого продукта. Данный показатель для крупности продукта менее 10 мм не должен превышать 5%, для крупности менее 1 мм - 0,5%, для крупности менее 0,1 мм - 0,1%.
Магнитная восприимчивость частиц	В зависимости от магнитной восприимчивости частиц подбирается индукция магнитного поля в рабочей зоне. Для ферромагнетиков устанавливаются сепараторы с низкой интенсивностью магнитного поля (до 0,32 Тл), для парамагнетиков в зависимости от задачи – сепараторы со средней (0,32-0,9 Тл) и высокой интенсивностью магнитного поля (0,9-1,5 Тл).

Принимая возможный процент металла (металлические крышки) в стеклобое не более 10% и учитывая требуемую производительность 835 кг/ч.

Соответственно определим массу извлекаемого металла.

$$M = \frac{P}{10} = \frac{835}{10} = 83,5 \text{ кг}$$

Исходя из анализа выбираем: автоматический подвесной магнитный железоотделитель ЭРГА СМПА с характеристиками, представленными в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики выбранного магнитного сепаратора ЭРГА СМПА

Показатель	Единица измерения
Увеличенная длина магнитной системы на основе постоянных магнитов	-
Глубина извлечения	До 350 мм
Масса извлекаемого металла	До 100 кг
Трёхслойная лента с армированной вставкой	-
Низкая интенсивность магнитного поля	до 0,32 Тл
Мощность	До 2,2 кВт

3.3 Подбор дробильного оборудования

Для всех групп стеклобоя размер частиц согласно ГОСТ 17139-2000 Стекловолокно. Ровинги. должен быть следующим: 100 % менее 6,4 мм и не более 15 % менее 0,076 мм.

Выбор типа и мощности дробилок зависит от физических свойств перерабатываемого материала, требуемой степени дробления и производительности.

Размеры стеклобоя.

«Часть стекла попадает на первичную переработку в виде боя и смеси сортов. При этом куски стекла могут сильно различаться по размеру. Так в исследовании показаны результаты распределения кусков боя стекла по линейным размерам. Объектом исследования является стеклобой, выделенный из городских ТКО» [18]. Результаты показаны на рисунке 7. Из приведенных

данных следует, что почти четвертая часть отходов стекла представляет собой куски менее 5 мм.

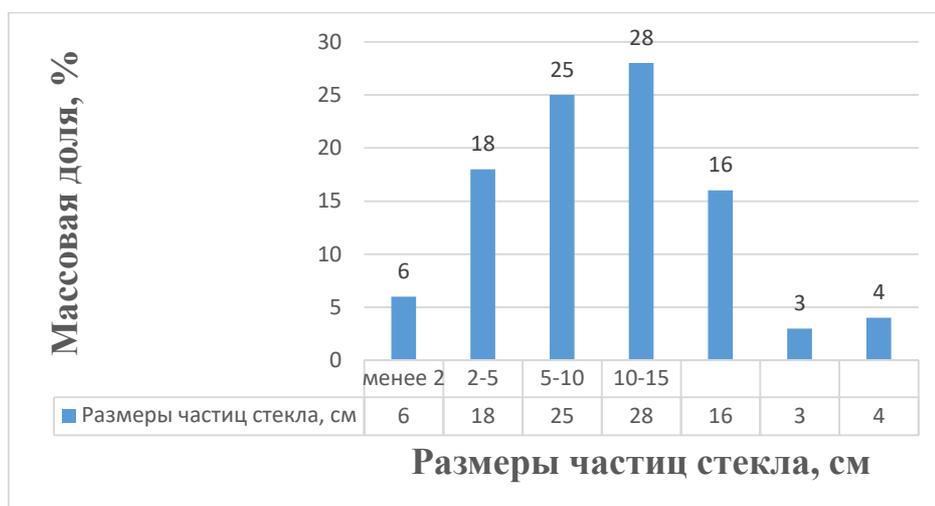


Рисунок 7 - Фракционный состав стеклобоя по данным Трухина Ю.М. [18]

Существует два основных типа дробильного оборудования, применяемого в процессах рециклинга стекла.

Первый тип – молотковые дробилки – применяются для измельчения стеклобоя в стеклянную пыль и используются при необходимости вторичного плавления стекла. Второй тип – роторно-дисковые измельчители – предназначены для получения стеклянной фракции определенного размера (в основном до 50 мм в диаметре).

Преимущества роторных дробилок по сравнению с молотковыми:

- КПД выше на 40%;
- простота ремонта;
- небольшой вес упрощает доставку, а наличие колесиков позволяет без усилий передвигать установку по цеху, складу;
- требуют меньше затрат электроэнергии;
- не издаются вибрации, поэтому не требуют жесткого крепления к полу.

Принцип работы роторно-дискового измельчителя представлен на рисунке

8.

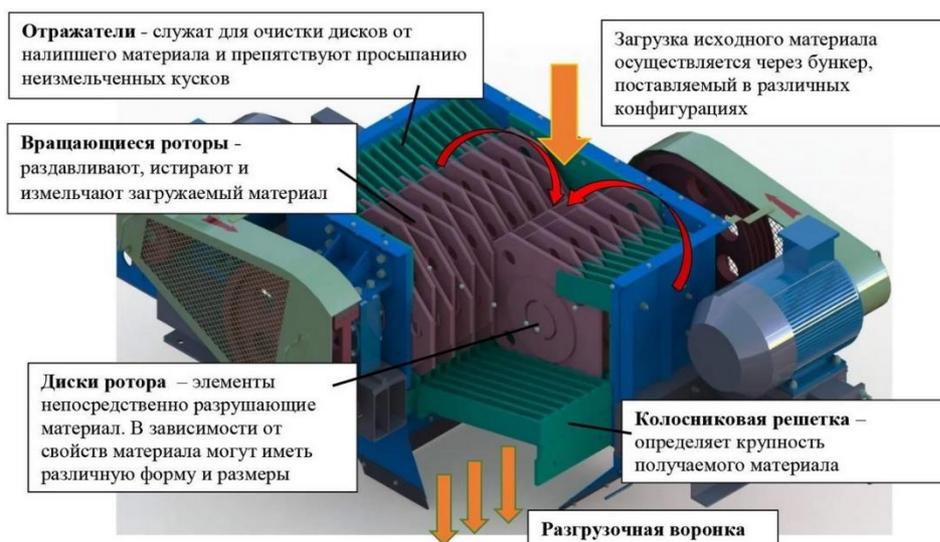


Рисунок 8 – Устройство роторно-дискового измельчителя

Стекло достаточно хрупкий материал. Основной характеристикой процесса измельчения является степень измельчения, которая определяется соотношением средневзвешенных размеров частиц материала до и после измельчения:

$$i = d_n/d_k$$

Степень измельчения отражает технологию и отражает параметры измельчителей.

1 Расчет производительности измельчителя

Определим расчетную производительность измельчителя по формуле:

$$П = a \cdot N \cdot b \cdot w \cdot \rho, \tag{7}$$

где a – количество ножей на роторе (принимаем, $a=8$);

$N=12$ – частота вращения, об/с;

$b=0,15$ – максимальный размер стекла, м;

w – скорость подачи материала, м/с;

$\rho = 2500$ – поверхностная плотность стекла, г/м².

$$П = 8 \cdot 12 \cdot 0,15 \cdot 0,003 \cdot 2500 = 108 \frac{\text{Г}}{\text{С}} = 389 \text{ кг/ч}$$

Учитывая, что подбор оборудования производим исходя из подсчитанного объема поступающего на дробилку перерабатываемого сырья $G_6=312,98\text{кг/ч}$, считаем, что расчетные данные выбраны верно.

3.4 Электростатический сепаратор

«Электростатический сепаратор предназначен для удаления из стеклобоя алюминиевых включений. Принцип его действия основан на методе электростатического осаждения частиц обрабатываемого материала на поверхности медленно вращающегося заземленного барабана. Известные в области обогащения горнорудных материалов методы электростатической сортировки не позволяют разделять частицы крупнее 1 мм» [16].

3.5 Сортировщик стеклобоя по цвету частиц

Стадия сортировки по цвету и размеры. Отходы сортируются по цвету: белое, с голубоватым оттенком, зеленое и коричневое. Каждому оттенку соответствует конкретный химический состав. Сортировка стекла в промышленных объемах производится на специальных сепараторах - фотосепараторах. «Существующее оборудование позволяет сортировать поток стеклобоя на три части в зависимости от трех основных цветов стеклобоя. Нетрудно подсчитать, что даже при невысокой производительности такого сепаратора всего в тонну в час, если размер частиц стекла становится менее 5 мм, то количество операций распознавания в секунду становится более тысячи» [31]. «В этом случае компьютерная часть задачи по анализу цветности и распознаванию типа стекла может быть решена без особых проблем, но механическая составляющая, заключающаяся в отделении распознанной частицы в нужный поток, находится практически на пределе быстродействия

существующего оборудования» [27]. «Кроме того, возникает серьезный вопрос об экономической целесообразности такого разделения. Поэтому в любом бытовом и промышленном стеклобое всегда есть определенная доля материала, разделение которого по сортам невозможно и нецелесообразно вследствие малого размера фракции» [31]. На рисунке 9 представлена схема оптического сепаратора.

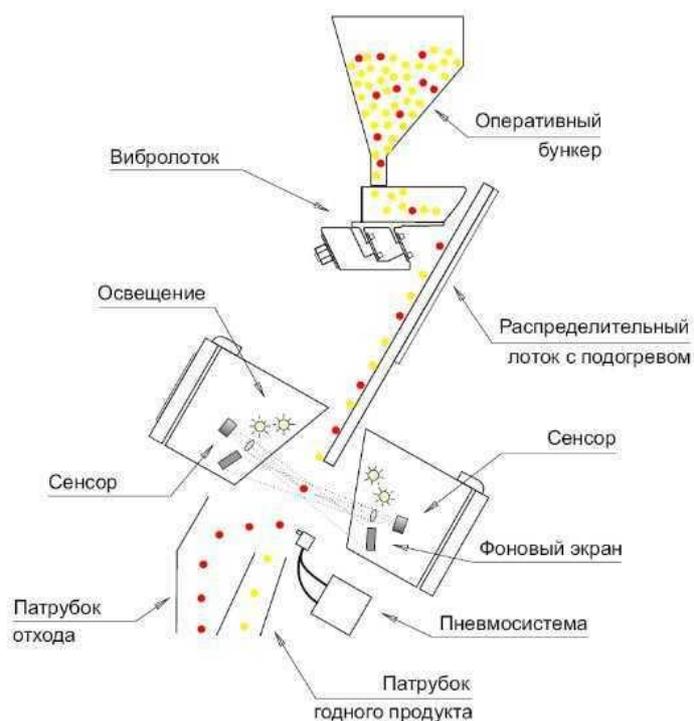


Рисунок 9–Схема оптического сепаратора

«Процесс сканирования включает в себя два этапа: разделение по цвету и разделение по светоотражающей способности (плотности) стекла. В таком случае бой стекла одного сорта подаётся в строго определённый лоток» [30]. «После прохождения процесса первичного сепарирования частицы подаются ко второму сканеру, который выполняет разделение стекла одного сорта на фрагменты примерно одинаковых размеров в плане. Все сканеры этого уровня оснащаются встроенным инфракрасным источником, а также снабжаются осветительными приборами на базе экономичных LED-светильников. Это

позволяет своевременно определять посторонние частицы (металл, пластик и пр.) которые по каким-либо причинам попали в сканирующее устройство» [31].

«При использовании цветных сканеров необходимости в этом нет, поскольку разные величины оптической плотности позволяют отсоединить посторонние материалы от стекла ещё на первой стадии разделения. Характерная особенность сканеров фотосепараторов – большое количество рабочих каналов (до 64), благодаря чему точность сканирования и сепарации не зависит от того, в каком месте бункера находится отделяемый фрагмент материала. Неидентифицированные частицы стеклобоя по транспортёрам отправляются на повторное сепарирование, после которого эффект отделения составляет уже 99,9%. В дальнейшем через эжекторную насадку, которая расположена в нижней части фотосепаратора, отсортированные частицы перемещаются в приёмную камеру» [27].

«Недостатком фотосепараторов является необходимость в их тщательном регламентном обслуживании и частая очистка оптических поверхностей сканеров: при их загрязнении процент брака резко увеличивается» [12]. «Давление воздуха, необходимое для надёжного срабатывания пневматических клапанов, принимается от 0,6 кПа» [12].

Технические характеристики современных моделей фотосепараторов:

«Выбор фотосепаратора, подходящего для конкретных условий применения, зависит от следующих факторов:

- от чувствительности CCD-матрицы: современные модели оснащаются ПЗС-камерами, рассчитанными на разрешение в 2048 пикселей. Это позволяет различать фрагменты стекла с размерами от 1,5 мм;

- от скорости сканирования, которая определяет производительность фотосепаратора. Для работы со стеклобоем практические значения скорости составляют от 0,15мм/с;

- от мощности воздушного потока, которые выполняет механическое отделение частиц стекла от иного материала. Модельный ряд фотосепараторов рассчитан на расход воздуха в пределах 600...2400 л/мин;

– от мощности привода агрегатов, которая для промышленно выпускаемых моделей колеблется в диапазоне 0,6...3,5 кВт (может варьироваться в зависимости от условий сепарации)» [12], [26].

При выборе фотосепаратора основные критерии:

- количество лотков (по количеству цвета стекла);
- тип материала;
- производительность.

В нашем случае выбираем:

- два лотка;
- тип материала стекло - стекло;
- производительность $P = 400$ кг/ч.

Выбираем оптические сепараторы фирмы «Unisort».

Выводы по третьему разделу

В представленной главе выполнен подбор основного оборудования предлагаемой технологии по подготовке стеклянного боя к производству стеклоровинга. Основными аппаратами технологической схемы стали роторно-дисковой измельчитель, позволяющий получать частицы стекла размером не более 10 мм; вибрационной сито для получения фракции стекла 0-6,5 мм; воздушный сепаратор для отделения частиц пыли и этикеток; оптический сортировщик. Предложено технологическое решение по оптимизации процесса оптической сепарации – установка двух, последовательно стоящих сепараторов. «Изменяя режимы работы технологической линии и задавая первому и второму оптическим сепараторам разные параметры, соответствующие разным партиям стеклобоя с преимущественным процентным содержанием коричневого, зеленого и бесцветного стеклобоя, можно оптимизировать процесс оптической сепарации и минимизировать расход сжатого воздуха за счет «отстреливания» частиц стекла того цвета, которого в каждой конкретной партии стеклобоя меньше» [6], [18].

4 Экологическая и экономическая оценка ущерба

4.1 Оценка экологической техногенной нагрузки, формируемой отходами стекла

«Для возможности оценки вреда, причиняемого окружающей среде отходами стекла в различных регионах и в конкретный промежуток времени, предполагается оценить удельную величину такого вреда на единицу массы отходов стекла. В нашем случае целесообразно рассчитать вред от размещения отходов стекла на тонну материала» [16], [37].

Расчет вреда, причиненного почвам отходами стекла, рассчитан в соответствии с «Методикой исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды», утвержденной Приказом Минприроды России от 08.07.2010 №238 (в ред. Приказа Минприроды России от 11.07.2018 № 316) по формуле (8):

$$УЩ = УЩ_{загр} + УЩ_{отх} \quad (8)$$

где УЩ - общий ущерб вреда, причиненного почвам;

УЩ_{загр} - размер вреда при загрязнении почв выщелачиваемыми компонентами;

УЩ_{отх} - размер вреда в результате порчи почв при их захламлении.

«При этом допускаем, что третье (УЩ_{перекр}), четвертое (УЩ_{сн}) и пятое (УЩ_{уничт}) слагаемые, присутствующее в «Методике», не имеют отношения к загрязнению почвы отходами стекла» [16].

Размера вреда при загрязнении почв выщелачиваемыми компонентами осуществляется по формуле (9):

$$УЩ_{загр} = СЗ \cdot S \cdot K_r \cdot K_{исп} \cdot T_x \quad (9)$$

где СЗ – безразмерная степень загрязнения;

S – площадь загрязненного участка, м²;

Kr – безразмерный показатель, характеризующий глубину загрязнения почв;

$Kисп$ – показатель, характеризующий категорию земель на которых располагают отходы стекла;

Tx - такса для исчисления размера вреда, руб./м².

Для расчета удельной величины ущерба $U_{загр}$ на тонну стекла определим численное значение вышеуказанных величин.

Безразмерная степень загрязнения почв $CЗ$ зависит от соотношения фактического содержания i -го загрязняющего вещества в почве к нормативу качества окружающей среды для почв, т.е.:

$$C = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Xi}{Xn} \right) \quad (10)$$

где Xi - фактическое содержание i -го загрязняющего вещества в почве, мг/кг;

Xn - норматив качества окружающей среды для почв, мг/кг.

Степени загрязнения $CЗ$ придают дискретные значения от 1,5 до 6,0 в зависимости от соотношения C . Для определения коэффициента C 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.

Отходы стекла в зависимости от качественной характеристики вымываемых компонентов можно подразделить на два основных типа: натрий-кальциевое стекло и свинецсодержащее стекло.

В формуле (2) площадь загрязненного участка одной тонной стекла S принимаем равным 1 м^2 , так как отходы стекла легко складироваться навалом, а плотность материала существенно зависит от фракционного состава стекла.

«Безразмерный показатель Kr , 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)» [23]. «При попадании растворенных соединений свинца (II) в почву происходит их интенсивная сорбция большинством видов почв» [21]. Поэтому считаем для выщелачиваемых соединений свинца (II) фактической глубиной загрязнения почв максимальную до 20 см, что соответствует Kr равное 1,0.

«Для вымываемых ионов Na^+ характерна высокая подвижность и низкая сорбируемость почвами, поэтому глубину загрязнения можно признать максимально допустимый Методикой уровень в 2,5 метра и соответственно Kr равное 2,5» [37].

«Безразмерный показатель $Kисп$, 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 $Kисп = 1,3$ » [20], [36].

Наконец, размер T_x , таксы для исчисления размера вреда принимаем равную 400 руб/м^2 для зона хвойно-широколиственных лесов, как наиболее характерную для средней полосы России.

Таким образом формула (9) для натрий-кальциевого стекла принимает численный вид:

$$УЩзагрNa = C3Na \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 1,3 \cdot 400 = C3Na \cdot 1300, \text{руб/т} \quad (11)$$

Для свинецсодержащего стекла:

$$УЩзагрPb = CЗPb \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 400 = CЗNa \cdot 500, \text{ руб/т} \quad (12)$$

где $CЗNa$ и $CЗPb$ должны быть определены экспериментально.

Определение вреда вследствие размещения отхода в окружающей среде
 $УЩотх$ производится в соответствии с формулой:

$$УЩотх = \sum_{i=1}^n (Mi \cdot Totx) \cdot Kисп \quad (13)$$

где $УЩотх$ – размер вреда (руб);

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

$Totx$ - такса для исчисления размера вреда, причиненного почвам в результате размещения отходов, тыс.руб./т;

$Kисп$ - 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 $Totx$ 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 $Totx=4000$ руб/т.

Учитывая, что выше было определено $Kисп = 1,3$, считаем:

$$УЩотх = 1 \cdot 1,3 \cdot 4000 = 5200 \text{ руб/т.}$$

«Таким образом, для расчета вреда, причиненного почвам отходами стекла может быть осуществлен в соответствии с [21]. 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» [21], [35].

4.2 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.

Расчет.

Оплата НВОС за захоронение:

$$П1 = V \cdot S1 \quad (14)$$

где V - объем стекла, поступаемого на предприятие ООО«ЭкоРесурсПоволжье»;

S

– плата за захоронение 1 тонны, руб.

Подставляем данные в формулу (14):

$$П1 = 1650 \cdot 71,21 = 117496,5 \text{ руб/год}$$

Затраты на транспортировку:

$$П2 = V \cdot S2 \quad (15)$$

где V - объем стекла, поступаемого на предприятие ЭкоРесурсПоволжье;

S1 – плата за транспортировку 1 тонны, руб.

Подставляем данные в формулу (15):

$$П2 = 1650 \cdot 3500 = 5775000 \text{ руб/год}$$

Суммарный экономический эффект составит

$$Э = П1 + П2$$

Таким образом,

$$Э = 11749665 + 5775000 = 5892496,5 \text{ руб/год} = 5,9 \text{ млн./год}$$

Выводы по четвертому разделу

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.

Заключение

В представленной работе исследовался вопрос переработки стеклянных отходов в сырье, пригодное для использования в производстве стеклоровинга. Используемая на предприятии технология, включающая в себя ручную сортировку стеклянной тары из ТКО (твердые коммунальные отходы) и бой стекла путем сброса в контейнер, не позволяет получить стекло заданного качества для производства стеклоровинга. В связи с чем была предложена технология, включающая дополнительные стадии дробления, очистки и разделения стеклобоя. Рассчитанный материальный баланс показал, что при входных данных: стекло 835 кг/ч, на выходе получаем 308,29 кг/ч подготовленного для стеклоровинга стеклобоя. В работе были решены следующие задачи:

- рассмотрены вопросы негативного воздействия стеклянных отходов на окружающую среду;
- предложена технология получения стеклобоя заданных параметров, в т.ч. размера, цвета, степени очистки;
- осуществлен патентный поиск по оптимизации технологии, результатом которого стало предложение установки двух оптических сепараторов.
- - рассчитан материальный баланс;
- осуществлен выбор основного оборудования;
- рассчитана производительность установки.

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 сырье заданного качества для производства стеклоровинга.

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. Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А., Гокова Е.Н. Эффективный материал для зеленого строительства на основе вторичного стекольного боя. В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства международная научнопрактическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2019. С. 111–116. 10.
3. Вайсман Я.И., Кетов А.А. Воздействие на окружающую среду перспективы переработки стеклобоя // Ресурсосбережение. 2011. С. 78-95.; Павлушкина Т.К., Киселенко Н.Г. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов // Стекло и керамика. 2021. №5. С. 27–34.
4. ГОСТ Р 56617-2015. Технические требования к стеклобою, предназначенному для использования в производстве стекловолокна. Дата введения 2019 г.
5. Денисова Д.В., Красногоров В.А. Высокопроизводительные комплексы RESOLINE для переработки стеклобоя // Стекло. Glass Russia - 2018 - №5 - С. 76-78.
6. Евдокимов С., Орлова А., Дубинина Г. Обеспечение экологической безопасности при переработке ТБО // Экология и промышленность России. 2021. - Т.19. - № 11. - С.36-40.
7. Ефременков В.В., Матвеев А.А. Разработка и изготовление оборудования для вторичной переработки стекла. - Glass Russia. - 2019. -№9.- С.30-37.

8. Ефременков В.В. Использование стекольного боя в производстве стеклотары //Стекло. Glass Russia - 2023 - №6 - С. 36-39.
9. Еременков В.В. Патент № RU 2755286. Технологическая линия переработки стеклобоя.
10. 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, 2015. - 129 с. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/673038> (дата обращения: 25.05.2023).
11. 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.
12. 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.
13. Кетов П.А., Фукалова Н. И. Переработка свинецсодержащих стекол в строительные материалы // Экология и промышленность России. -2022. -№4. - С. 24-27.
14. Лозин А.А., Кубай Л.В., Нитяговский В.В. Применение магнитных сепараторов в стекольной промышленности стеклобоя // Стекло. Glass Russia - 2018 - №8 - С. 34-40.
15. Мелконян Р.Г., Власова С.Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 100 с.
16. Мелконян Р.Г./Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учебное пособие / Р. Г. Мелконян, С. Г. Власова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 100 с.
17. Минько Н.И., Биналиев И.М. Роль сульфата натрия в технологии стекла // Стекло и керамика. - 2018. - No 11.- С. 3-8.

18. Минько Н.И., Калатоzi В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. -2018, №1.-с.82-88.
19. 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.
20. Мелконян Р. Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учебное пособие / Р. Г. Мелконян, С. Г. Власова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 100 с.
21. Методикой 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).
22. 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.
23. Павлушкина Т.К., Кисиленко Н.Г. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов // Стекло и керамика. - 2018. - №5. - С. 27-34.
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. Таймазова К.П., Оказова З.П. Российский рынок стеклобоя IV Междунар. Студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум», 15 февраля-31 марта 2021 г.

26. 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.

27. 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.

28. Трушин А.В. Факторы, оказывающие влияние на развитие российского рынка стеклобоя //Аллея науки. -2018.-№10.- с.348-351.

29. Трофимов Г.В. Профессиональные секреты переработки стеклобоя // Твердые бытовые отходы - 2018 - №10 - С. 22-26.

30. Управление отходами. Сбор, транспортирование, прессование, сортировка твердых бытовых отходов: монография / Я. И. Вайсман, В. Н. Коротаев, Н. Н. Слюсарь, В. Н. Григорьев. — Пермь: ПНИПУ, 2012. — 236 с. — ISBN 978-5-398-00799-2. — Текст: электронный// Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/160718> (дата обращения: 25.05.2023).

31. Федоренко И. Я. Моделирование вибрационных процессов и устройств АПК: лабораторный практикум для студентов и аспирантов вузов, осваивающих образовательные программы магистратуры по направлению подготовки «Агроинженерия» и аспирантуры по направлению подготовки «Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве» / И. Я. Федоренко. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020. – 147 с.

32. 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.

33. Patent EP1044171A4. A method of recycling mixed colored cullet into amber, green, of flint glass / Duane A Mosch, 2021.

34. Patent US 4826788, C03B19/08. Composition for producing foamed glass molded products. Heinz Dennert, Hans V. Dennert, Alois Seidl. Published 2.05.2018.

35. Doring E. Recycling of post-consumer special glass, present situation and possibilities // Recycling and Reuse of Waste Materials: Proceedings of the International Symposium 9-11 September 2019, Dundee UK. P. 791–800.

36. Patent US 4826788, C03B19/08. Composition for producing foamed glass molded products. Heinz Dennert, Hans V. Dennert, Alois Seidl. Published 2.05.2019.

37. 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.