

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)

18.04.01 Химическая технология  
(код и наименование направления подготовки)

Рациональное использование природных и сырьевых ресурсов в химической технологии и нефтехимии  
(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Совершенствование технологии получения ПЭТФ-флекс как вторичного сырья для химических предприятий

Обучающийся

М.М. Коршунов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. пед. наук, доцент М.В. Кравцова

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

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Литературный обзор в области переработки ПЭТ отходов.....	7
1.1 Характеристика объекта исследования .....	7
1.2 Анализ способов переработки ПЭТ отходов .....	9
1.2.1 Механический способ переработки ПЭТ-отходов .....	11
1.2.2 Технологический процесс механической переработки ПЭТ на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье».....	23
1.2.3 Переработка ПЭТ-отходов в сырье для производства первичной продукции .....	29
Глава 2 Совершенствование технологии получения ПЭТФ-флекса как вторичного сырья для химических предприятий .....	32
2.1 Экспериментальное исследование основных характеристик ПЭТФ-флекса ООО «ЭкоРесурсПоволжье» как сырья для химических предприятий.....	32
2.2 Анализ оптических сепараторов и определение требований их эффективности .....	39
2.3 Выбор математической модели для конструктивных расчетов фотосепаратора .....	49
2.4 Проведение конструктивных расчетов фотосепаратора.....	63
2.5 Предложение технологического решения .....	67
2.6 Расчет материального баланса предлагаемого решения.....	71
2.7 Технико-экономическое обоснование предлагаемого решения .....	75
Заключение .....	79
Список используемой литературы и используемых источников.....	80

## Введение

### **Актуальность и научная значимость настоящего исследования**

Наиболее значительным применением полимеров за последние два десятилетия является полиэтилентерефталат (ПЭТ), который обладает превосходными химическими и физическими свойствами для многих вторичных применений, например, характеристикой газонепроницаемости, низкой диффузионной способностью, отличными механическими и термомеханическими свойствами, высокой инертностью материала. С другой стороны, отходы ПЭТ уже представляют опасность для человека и окружающей среды. Глобальное количество пластиковых отходов, образовавшихся с 1950 по 2023 год, составило примерно 6,3 млрд тонн. Каждый год, согласно прогнозу, около миллиона метрических тонн отходов ПЭТ попадает в океан и на свалки. В настоящее время методы переработки пластика включают захоронение, сжигание и рекуперацию энергии, а также переработку пластика. Речь шла об обычных методах захоронения и сжигания, поскольку пластиковый компонент может выбрасываться в окружающую среду во время переработки. Методы захоронения и сжигания имеют опасные вещества, выбрасываемые в окружающую среду.

Для сокращения отходов ПЭТ до 2040 года можно применить несколько стратегий. Подход к нулевому загрязнению пластиком подразделяется на четыре основных типа мероприятий: сокращение, замена, переработка и утилизация.

Процесс переработки ПЭТ может осуществляться с использованием механических и химических процессов. Основной целью переработки ПЭТ является преобразование полимера ПЭТ в экономически пригодные для повторного использования формы.

Основная цель переработки ПЭТ заключается в модификации полимера ПЭТ в экономически пригодные для повторного использования формы; более того, критический момент переработки ПЭТ заключается не только в снижении стоимости технологического процесса, но и в поддержании экологического баланса, необходимого для устойчивого развития нашей планеты. Стоимость химической переработки ПЭТ выше, чем стоимость механической переработки ПЭТ. По этой

причине необходимы инновации в технологии механической переработки ПЭТ с целью повышения качества выпускаемой продукции и применения ее в более инновационных технологических процессах.

**Объект исследования:** технологический процесс получения вторичного полиэтилентерефталата (ПЭТФ-флекс).

**Предмет исследования:** вторичный полиэтилентерефталат (ПЭТФ-флекс).

**Цель исследования:** получение качественного ПЭТФ-флекс как сырья для химических предприятий.

**Гипотеза исследования** обеспечение увеличения объемов переработки вторичного полиэтилентерефталата (ПЭТ) с минимальным количеством примесей в готовой продукции за счет совершенствования технологического процесса механической переработки ПЭТФ-флекс.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- провести литературный обзор в области требований к качеству сырья для производства полимерной продукции и способов его получения;
- провести экспериментальное исследование качественной характеристики ПЭТФ-флекс;
- оптимизировать технологию получения вторичного сырья для производства полимерной продукции на базе существующего комплекса по сортировке и переработке ТКО ООО «ЭкоРесурсПоволжье»;
- выбрать математическую модель для расчета основных параметров предлагаемого решения по оптимизации;
- провести технико-экономическую оценку предлагаемой технологии.

**Проблема исследования:** высокая степень загрязнения вторичного полиэтилентерефталата, поступающего на переработку, не позволяет получить вторичный продукт требуемого качества в условиях повышенной потребности к готовому продукту из него и, как следствие, увеличиваются объемы размещения ПЭТ на полигонах.

**Теоретико-методологическую основу** исследования составили научные труды отечественных и зарубежных ученых: Тищенко А.И., Тухватулиной Р.Ф.,

Абржина Л.Л., Митрофанова Р.Ю., Стрельцова Е.В; прикладные исследования специалистов ООО «ЭкоРесурсПоволжье».

**Базовыми для настоящего исследования явились также работы** Дорожкина В.П., Руденко А.А., ТУ 20.16.40-021-39989731-2021, технологический процесс №6 – «Переработка ПЭТ-бутылок».

**Методы исследования:** аналитический обзор литературных источников, экспериментальные исследование определения влияния содержания примесей в ПЭТ на качество конечного продукта, использовались расчетные методики для определения количества получаемого продукта.

**Опытно-экспериментальная база исследования:** исследования проводились в лабораториях кафедры «Химическая технология и ресурсосбережение» Тольяттинского государственного университета и на базе ООО «ЭкоРесурсПоволжье».

**Научная новизна исследования** заключается в разработке математической модели для расчета параметров оптического сепаратора на стадии механической переработки ПЭТФ-флекс, обеспечивающей уменьшение количества примесей в переработанном материале и увеличения качества готового продукта для применения его как сырья для химических предприятий.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в детализированном анализе и расчете технологического процесса по получению вторичного полиэтилентерефталата с минимальным количеством примесей, применяемого в производстве первичной продукции.

**Практическая значимость исследования** заключается в реализации предложенного решения по совершенствованию технологии по переработке ПЭТ на базе ООО «ЭкоРесурсПоволжье» и обоснования на практике увеличения объемов переработки для обеспечения требуемого качества продукта.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обоснована экспериментальными исследованиями, расчетными данными и внедрением предлагаемых решений на предприятии.

**Личное участие автора** заключается в предложении совершенствования технологического процесса механической переработки ПЭТФ-флекс на базе

ООО «ЭкоРесурсПоволжье» для снижения количества примесей в готовом продукте, проведение экспериментальных исследований по определению характеристической вязкости ПЭТФ-флекс, реализации экспериментальной части исследования и в проведение расчетов, подтверждающих предполагаемую гипотезу по возможности осуществления процесса и его технико-экономических показателей.

Апробация и внедрение результатов работы проводились на XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени выдающихся химиков Л.П. Кулева и Н.М. Кижнера, проходивший в период с 16 мая 2022 года по 19 мая 2022 года с докладом «Совершенствование технологии получения ПЭТФ-флекс как вторичного сырья для химических предприятий». На Международном научно-практическом семинаре «Экобиотехнологии утилизации отходов и ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде (НВОС)», проходившим 10 февраля 2022 года с докладом «Совершенствование технологии получения ПЭТФ-флекс как вторичного сырья для химических предприятий».

**На защиту выносятся:**

- математическая модель для расчета и выбора оптического сепаратора на стадии механической переработки ПЭТФ-флекс, обеспечивающей уменьшение количества примесей в переработанном материале и увеличения качества готового продукта для применения ее как сырья для химических предприятий;

- предложение по оптимизации технологии получения ПЭТФ-флекс с минимальным количеством примесей как вторичного сырья для химических предприятий.

**Структура магистерской диссертации.** Работа состоит из введения, двух глав, заключения, содержит 24 рисунка, 21 таблицу, список использованной литературы (45 источников). Основной текст работы изложен на 85 страницах.

# Глава 1 Литературный обзор в области переработки ПЭТ отходов

## 1.1 Характеристика объекта исследования

Согласно Федеральному закону от 29.12.2014 № 458-ФК (в редакции от 28.11.2015г. твердыми коммунальными отходами (ТКО) являются остатки веществ, материалов, предметов, изделий, товаров (продукции или изделий), частично или полностью утративших свои первоначальные потребительские свойства для использования по прямому или косвенному назначению в результате физического или морального износа в процессах общественного или личного потребления (жизнедеятельности), использования или эксплуатации.

Общий перечень отходов, попадающих под классификацию ТКО, указан в федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО), согласно которому большая часть групп ТКО относится к IV или V классу опасности отходов. К таким видам отходов, к примеру, относится полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ).

«Полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ) (3) ( $C_{10}H_8O_4$ )<sub>n</sub> —термопластичный полимер, типичный представитель класса полиэфиров, представляющий собой продукт поликонденсации (рисунок 1) этиленгликоля (1) с терефталевой кислотой (2) (или её эфирами) с молекулярной массой  $20\cdot 10^3$ – $50\cdot 10^3$  кг/кмоль. По агрегатному состоянию это твёрдое, прозрачное, бесцветное вещество» [1]. При нагревании до температуры стеклования ПЭТФ способен переходить в прозрачное состояние и может оставаться в нём при резком понижении температуры, что в свою очередь ведет к быстрой кристаллизации полимера. Еще одной важной характеристикой ПЭТ является - характеристическая вязкость, определяющаяся длиной макромолекулы полимера. По мере увеличения длины цепочки скорость кристаллизации как правило снижается. Полиэтилентерефталат относится к полимерам с высокой механической прочностью, износостойкостью, является хорошим диэлектриком. В совокупности все эти положительные качества делают данный продукт очень устойчивым к разложению в естественных природных условиях.

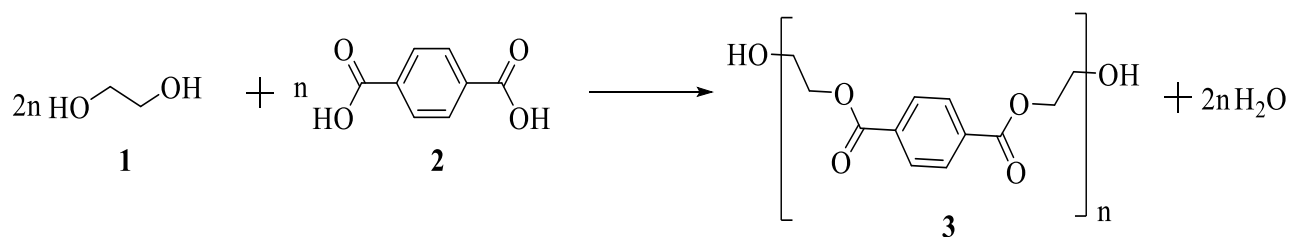


Рисунок 1 – Получение полиэтилентерефталата

Основные характеристики получаемых полимеров ПЭТФ приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Основные химические и физические свойства полиэтилентерефталата

Наименование показателя		Значение
1		2
Коэффициент теплового расширения при плавлении полимера		$6,57 \times 10^{-4}$
Сжимаемость (расплав), МПа		$7,03 \times 10^6$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	Аморфное состояние	1,336
	Кристаллическое состояние	1,424
Температура стеклования, °С	Аморфное состояние	66
	Кристаллическое состояние	82
Показатель преломления (линия Na)	Аморфное состояние	1,575
	Кристаллическое состояние	1,645
Диэлектрическая постоянная, 1 кГц при 23 °С		3,26
Точка плавления, °С		250-265
Температура разложения, °С		350
Предел прочности при растяжении, МПа		172
Модуль удлинения при разрыве, %		15-55
Модуль упругости при растяжении, МПа		$1,41 \times 10^4$
Влагоемкость ПЭТ		0,3%
Допустимая остаточная влага ПЭТ		0,02%
Морозостойкость, до		-50°С

Из литературных источников известно, что процесс биоразложения или биodeградации полиэтилентерефталата может занимать до 500 лет. Биodeградация — это так называемый процесс, при котором наблюдается разрушение сложные органических вещества под действием живых организмов (земляных червей или бактерий). На практике микроорганизмы и черви преобразуют органические соединения в другие полезные и пригодные для повышения плодородности почвы соединения. Полиэтилентерефталат - не токсичен. Однако при его производстве, для улучшения эксплуатационных свойств готовой продукции, в зависимости от назначения, могут добавлять фталаты, моно и дикарбоновые кислоты, спирты и



другие химические реагенты. При этом ряд последних исследований показывают, что из ПЭТ-бутылок в их содержимое могут выделяться различного рода вредные вещества, такие как: бисфенол А, эстрадиол, дибутилфталат. Это в свою очередь может приводить к причинению тяжкого вреда здоровью, так как эти соединения обладают кумулятивным (накопительным) эффектом.

## **1.2 Анализ способов переработки ПЭТ отходов**

«Существует несколько способов переработки ПЭТ отходов, которые можно разделить по способам воздействия: механический, химический, термический (таблица 2)» [10].

Если проводить сравнение указанных в таблице методов, то механическая переработка отходов ПЭТ является наиболее доступной, может работать с любыми объемами поступающего сырья, а также не оказывает негативного воздействия на окружающую среду» [1].

«Механическая переработка имеет свои ограничения и трудности:

- наличие наклеек на бутылках и клеев приводят к тому, что изменяется цвет и прозрачность ПЭТФ-флекс;
- влажный материал легко деструктируется при переработке;
- необходимо производить тщательную сортировку ПЭТФ-флекс от посторонних примесей.

Для того, чтобы получить ПЭТФ-флекс высокого качества после переработки необходимо выполнение следующих требований:

- минимизация засорения полимерных и не полимерных примесей;
- качество и однородность ПЭТФ-флекс должны быть стабильным;
- вязкость должна быть близкой к первоначально поступающему сырью» [8].

Таблица 2 – Способы переработки ПЭТ-отходов

Способ переработки ПЭТ отходов	Описание способа	Степень загрязнения поступающих отходов	Эффективность переработки от общего объема поступающих отходов, %	Возможное применение получаемого продукты	Недостатки
Механический	«Сортировка, измельчение, обработка с помощью температурного воздействия, сушка» [4].	«Низкая, частично средняя» [34].	«70 – 75» [35].	«Упаковка, сырье для производства волокон, используемых для изготовления напольных покрытий, искусственных тканей, сырье для производства первичной продукции» [15].	«Незначительные количества примесей и влаги могут вызвать существенную потерю качества вторичного ПЭТФ» [17].
Химический	«Пиролиз – термическое разложение в присутствии кислорода» [6].	«Средняя, сильная» [38].	«5» [44].	«Полиэфиры для клеев, покрытий, производство ПЭТ Возможность получения: масло (23,1%), воск (15,9%), кокс (12,8%), H <sub>2</sub> (0,06%), этилен (1,27%), пропилен (1,6%), CO <sub>2</sub> (24,3%) и CO (21,5%). Возможность использования в качестве топлива, сырья для нефтехимической промышленности» [18,41].	«Затраты на оборудование слишком высоки, для обеспечения рентабельности производства необходим большой товарооборот. Выделение вредных веществ при переработке» [5,44].
Термический	«ПЭТ отходы сжигают в специально оборудованных печах различной конфигурации» [4].	«Сильная» [39].	«20 – 21» [41].	«Сжигание с целью получения тепловой энергии, пиролиз для получения газообразных и жидких топлив. Теплотворная способность 2 т. пластиковых отходов упаковки эквивалентна теплотворной способности 1 т. нефти (теплотворная способность нефти 46600 кДж/кг, ПЭТФ - 22700 кДж/кг)» [6].	«Фильтры, очищающие вредные газы, сложны в производстве и использовании и не всегда обеспечивают необходимую степень очистки» [19].

Сравнение методов переработки ПЭТ-отходов показывает, что механический способ является наиболее выгодным, так как материал на выходе можно использовать как сырье в различных промышленных и химических производствах.

### **1.2.1 Механический способ переработки ПЭТ-отходов**

«Вторичная переработка бутылок из полиэтилентерефталата разделяется на этапы: подготовка поступающих бутылок и измельчение ПЭТ бутылок в ПЭТФ-флекс» [12].

Рассмотрим основные этапы переработки ПЭТ-отходов в ПЭТФ-флекс:

- сбор отходов и их сортировка;
- прессование отходов;
- измельчение;
- флотационное разделение ПЭТФ-флекс от крышечек и этикеток других видов пластика;
- мойка ПЭТФ-флекс;
- центрифугирование ПЭТФ-флекс (отжим и отделение мелкой фракции);
- сушка горячим воздухом;
- упаковка ПЭТФ-флекс;
- экспресс-проверка качества.

На рисунке 2 приставлена схема механического процесса переработки ПЭТ-отходов.

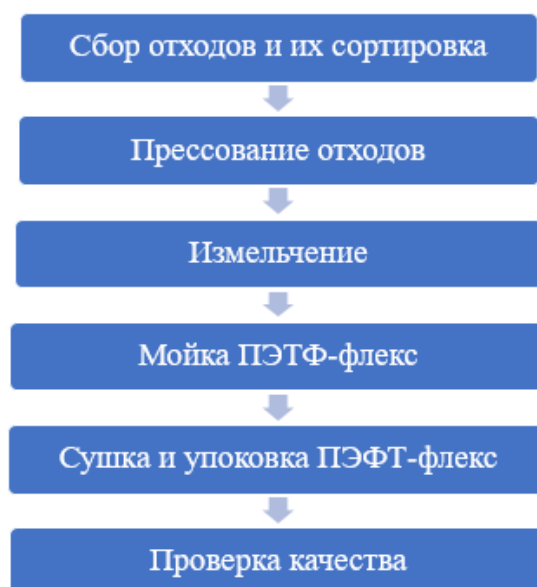


Рисунок 2 – Блок-схема механического процесса переработки ПЭТ-отходов

Переработка в волокно и ткань.

Полиэфирное волокно является наиболее часто используемым материалом для текстильной промышленности. Востребованность материала обусловлена: гибкостью, легким весом и устойчивостью к нагрузке. Важными характеристиками ПЭТ-волокна являются: устойчивость к растяжению и усадке, отсутствие складок, быстрое высыхание, устойчивость к истиранию и т.д.

Полиэфирные волокна получают способом прядения из расплава, в котором гранулы ПЭТ расплавляются и экструдированы через фильеру, при этом расплав полимера проходит через дозирующий насос для контроля и фильтрации потока. Нити экструдата охлаждаются воздухом, и полученные пучки непрерывных нитей связывают жгутом. При дальнейшей обработке жгута: волочением, опрессовкой, обработкой методом центрифугирования – жгуты нарезаются на фиксированные длины – полиэфирные штапельные волокна (PSF) (рисунок 3). Далее следует принудительное вытягивание жгутов для дальнейшей обработки. Обжим помогает в повышении адгезии между волокнами, что приводит к увеличению сил сцепления между ними. Вращательная отделочная технология обеспечивает плавное функционирование волокон в процессе прядения.



Рисунок 3 – Изображение нити штапельного волокна

Цвет исходного ПЭТ-волокна слегка беловатый или полупрозрачный (в зависимости от того, кристаллический он или аморфный по своей природе). Полимерная система является кристаллической по природе с 65% – 85% кристаллических областей и 35% – 15% аморфных областей. Материал обладает большей частью физических и химических свойств благодаря этой микроструктуре. Важные физико-химические свойства ПЭТ-волокон приведены в таблице 3. Диаметр PSF (полиэстеровое стабильное волокно) обычно варьируется в зависимости от конечного применения, даже если общий диаметр составляет от 12 до 25 мкм, а соотношение сторон (отношение длины волокна к ширине) превышает 2000:1. PSF вращаются с образованием пряжи. Данная пряжа используется в текстиле, покрывалах, наволочках, спортивной одежде, спортивной обуви и т. д.

Таблица 3 – Физические и химические свойства ПЭТ волокна

Физические свойства	Химические свойства
Высокая прочность	Химически стойкий
Высокая кристалличность	Устойчив к кислотам
Гигроскопическая природа	Устойчив к основанию
Плохая теплопроводность	Солнечно- и погодостойкий

Отработанные ПЭТ-бутылки собираются и сортируются вручную или автоматически, далее бутылки тщательно очищаются с удалением этикеток, крышек и колец и разделяются в соответствии с их цветом. Разделение необходимо по причине того, что бесцветные бутылки дают белесую пряжу, тогда как цветные бутылки дают

цветную пряжу. После очистки бутылки измельчают в ПЭТ-хлопья. Затем хлопья снова промывают в стерилизующей ванне. Светлые хлопья отбеливают для получения бесцветной пряжи, а хлопья из темных бутылок окрашивают в темный цвет. Затем, как и в случае с первичными ПЭТ-гранулами, ПЭТ-хлопья экструдированы из расплава и образуют нити. Затем нити направляются на горячие металлические ролики, чтобы растянуть и перестроить молекулы ПЭТ. Такое технологическое решение приносит кристалличность в волокна ПЭТ и разрезается на переработанные полиэстеровые стабильные волокна. Затем они направляются в намоточную машину, где пряжа сматывается. В дальнейшем эта пряжа готова для изготовления в ПЭТ ткани.

Все процессы аналогичны таковым для первичных гранул ПЭТ, за исключением дополнительных процедур очистки, принятых для хлопьев ПЭТ. На рисунке 4 показана процедура получения волокон из ПЭТ-бутылок. Помимо полиэстеровых стабильных волокон, существует много других категорий, через которые проходят переработанные волокна. Заполнение волокном представляет собой применение, при котором короткие волокна используются в качестве наполнителя подушки, одеяла и т.д. Частично ориентированные пряжи используются для изготовления ткани. Волокна ПЭТ используются в геотекстиле, являющийся проницаемой тканью, которая при использовании с почвой обладает способностью фильтровать, укреплять, осушать и защищать почву, используемую при строительстве дорог. Для любого производства тканей из переработанных ПЭТ волокон основным критерием является то, что свойства должны соответствовать первичным ПЭТ волокнам. Таким образом, предметы одежды, произведенные из переработанных ПЭТ, могут быть снова переработаны и использованы повторно, и, таким образом, они попадают в замкнутую систему.

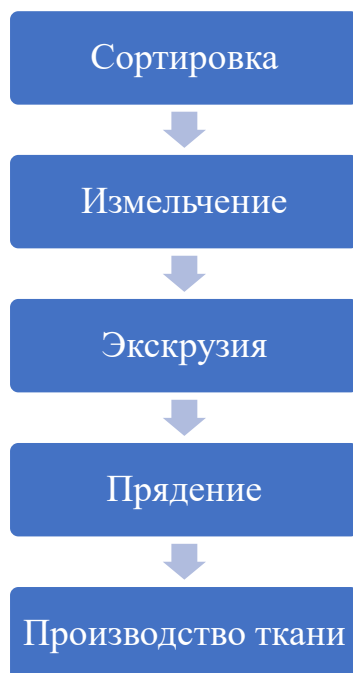


Рисунок 4 – Блок-схема переработки ПЭТ-бутылок в ткани

В настоящее время ведущие текстильные компании расширили свои технологии в области разработки волокон из переработанных материалов с целью получения экологически чистых тканей. Использование отходов, которые обычно идут на захоронение или сжигание, помогает снизить их степень негативного воздействия на окружающую среду. «Perreve» представляет собой бренд, который использует переработанное волокно, производимое «Unifi», которое изготовлено из вторичного ПЭТ, в том числе из постпотребительских бутылок и постиндустриальных отходов. Волокно используется во многих брендах, включая «Quicksilver», «Haggar clothing», «Adidas» и т. д., например, с 2010 года «Nike» используют выброшенные ПЭТ-бутылки из мест захоронения отходов в Японии и на Тайване для производства волокна из вторичного ПЭТ для изготовления трикотажных изделий для национальной футбольной команды Бразилии, Нидерландов, Португалии, Сербии и т. д. «Hanes Ecosmart» использовали волокно из вторичного ПЭТ, для изготовления своих тканей. В 2012 году «Levis» представили новую марку джинсовых отходов Waste Less, в которой каждая пара джинсов имеет волокно из вторичного ПЭТ и содержит в среднем от 8 до 12 бутылок ПЭТ. С 2014 года «Cone Denim» вместе с

«Unifi» начали использовать волокна r-PET в своих джинсах Cone Touch с использованием в среднем восьми бутылок из ПЭТ.

Такая коммерциализация волокон из вторичного ПЭТ помогает легко распространять технологии и помогает создать устойчивую среду. Это также побуждает людей исследовать возможности переработки различных полимеров в различные области с преодолением всех существующих ограничений технологий переработки. Кроме того, технологии должны быть открыты, чтобы предприниматели могли привлекаться к переработке и помогать решать проблему, связанную с отходами ПЭТ-бутылок.

Переработка в смолы для покрытий и применение в полимерных композитах.

Химические процессы рециркуляции такие как: гликолиз, аминализ, аммонолиз, гидролиз, метанолиз и комбинации химических процессов – открывают большие возможности для переработки отходов ПЭТ. Олигомеры с гидроксильными и аминными концевыми группами и полиолы – являются продуктами этих химических процессов. Переработанные олигомерные продукты дополнительно подвергают взаимодействию с подходящими «сшивателями» и отвердителями для синтеза смол для покрытий и композитов. Рисунки 5 и 6 показывают процесс преобразования ПЭТ-бутылок в смолы для производства покрытий и рециркулированных полимерных композитов, добавляются дополнительные пигменты и другие необходимые добавки для придания желаемого свойства покрытия и композиционного материала.



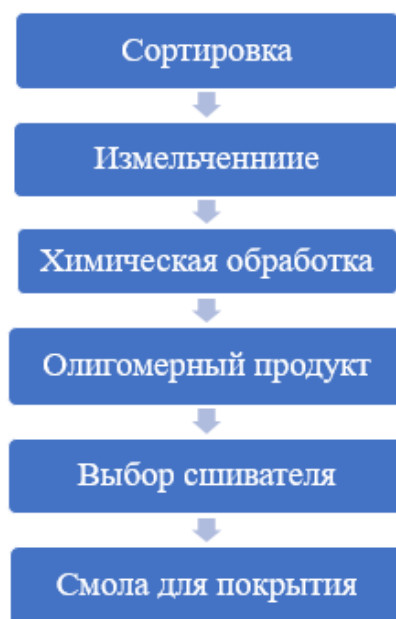


Рисунок 5 – Блок-схема переработки ПЭТ-бутылок в смолы

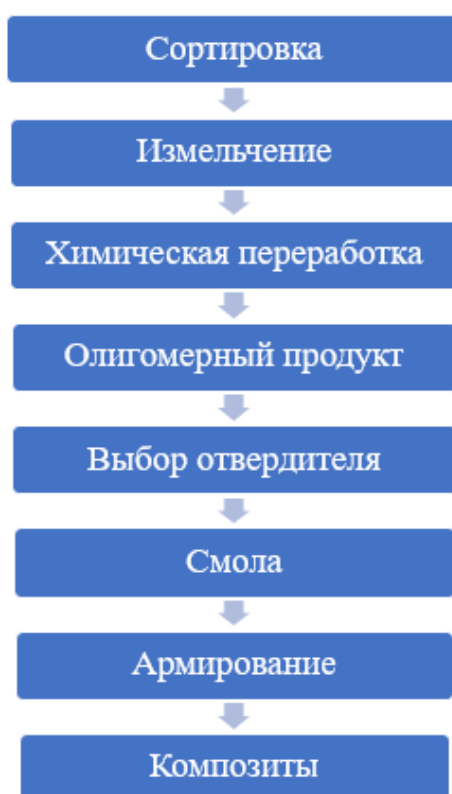


Рисунок 6 – Блок-схема переработки ПЭТ-бутылок в полимерные композиты

Вторичная переработка ПЭТ может осуществляться либо физическими методами (механическими методами), либо химическими методами. Физически переработанный ПЭТ, как правило, используется для изготовления смесей с другими

полимерами. В то время как химически переработанный ПЭТ вводится в качестве исходного реагента для синтеза многих других полимеров.

Одним из основных преимуществ физической переработки является то, что основной полимер не изменяется во время процесса. По сравнению с методами химической переработки физическая переработка ПЭТ демонстрирует следующие преимущества, такие как: простота, гибкость подачи сырья, низкий отрицательный экологический эффект и отсутствие необходимости в сложном оборудовании. Основными недостатками физической переработки являются снижение свойств продукта с каждым циклом и снижение вязкости расплава или уменьшение молекулярной массы, вызванное термическим и гидролитическим разложением. Также при переработке ПЭТ в расплаве образуются циклические и линейные олигомеры, которые негативно влияют на такие свойства, как пригодность для печати и окрашиваемость конечного продукта. Гетерогенность твердых отходов является еще одним вопросом, который возникает при механической переработке, так как механическая утилизация становится затруднительной. Во время термической обработки кислотные компоненты, находящиеся в качестве загрязняющих веществ, катализируют гидролиз сложноэфирных связей ПЭТФ.

Одним из применений отходов ПЭТ-бутылок, переработанных в гранулы, является использование их в качестве заполнителя при производстве конструкционного легкого бетона. Для эксперимента подготовили образцы строительного раствора с использованием только ПЭТ агрегатов и системы ПЭТ-песок в качестве агрегата. Растворы, содержащие ПЭТ и песок, показали лучшие свойства, чем растворы только с ПЭТ заполнителями. С использованием отработанных ПЭТ-заполнителей, гранулированного доменного шлака и летучей золы приготовлен легкий весовой строительный раствор. Для усовершенствования технологии предложено использовать непромытые отходы ПЭТ-бутылок как мелкие агрегаты в производстве бетона. Так же ПЭТ используют как заполнители в асфальтобетоне. В этом случае использованы гранулы ПЭТ диаметром 3 мм, с целью уменьшения экологической проблемы утилизации ПЭТ.

При химической переработке ПЭТ подвергается либо полной деполимеризации, либо частичной деполимеризации. Продуктами являются мономеры и олигомеры соответственно. Химическая переработка ПЭТ может быть осуществлена путем гидролиза, метанолиза, гликолиза, аминализа, аммонолиза и т.д. При химической переработке полимерные цепи подвергаются превращению и разлагаются в мономерные звенья. Изделия из химически переработанного ПЭТ можно использовать для производства полиуретановой и ненасыщенной полиэфирной смолы. Обнаружено, что полиуретан имеет множество применений в изоляции, материалах для сидения и искусственной коже.

Полиэфирные полиолы, полученные из гликолиза ПЭТ и алифатических дикислот, могут быть использованы в качестве исходного материала для синтеза полиуретана. Например, алкидные смолы синтезированы из отходов ПЭТ-бутылок через процесс гликолиза с использованием триметилпропана и триметилэтана в присутствии тетрабутилтитанатного катализатора. Продукт гидролиза, полученный из отходов бутылок ПЭТ, далее применяется в производстве алкидных смол. После этого могут быть приготовлены нанокompозиты с использованием алкидных смол и частиц диоксида кремния, модифицированных метакрилом. Полученные нанокompозитные покрытия показали хорошие механические и антикоррозионные свойства.

Разработан процесс производства полимерных композитов на основе ПЭТ и древесной муки. Смолу, полученную после частичного гликолиза, переработанного ПЭТ, используют для получения полимерных композитов с древесной мукой. Затем полученные в результате древесно-наполненные композиты прессуют для изготовления досок, панелей, лотков и листов. Гликолиз ПЭТ-хлопьев может быть осуществлен с использованием этиленгликоля (EG), пропиленгликоля (PG), диэтиленгликоля (DEG) и триэтиленгликоля в присутствии катализатора: ацетата цинка. Продукт гликолиза ПЭТ, малеиновый ангидрид и пропиленгликоля взаимодействует вместе, образуя ненасыщенные полиэфирные смолы, которые дополнительно армируются порошковыми и волокнистыми наполнителями для изготовления композиционных материалов. Композиты могут быть изготовлены с

применением рисовой шелухи и ненасыщенные полиэфирные смолы, полученной в результате гликолиза отходов ПЭТФ. Гликолиз ПЭТ демонстрирует такие преимущества, как: простота, гибкость, низкие капитальные затраты и удобство использования на традиционных заводах по производству ПЭТ. Но это также показывает ограничение, что нет возможности производить чистый первичный ПЭТ. Из мраморных отходов и стирольного полиэфира, где полиэфир является продуктом гликолиза ПЭТ-бутылок, может быть изготовлен полимербетон.

Метанолиз ПЭТ-бутылок дает диметилтерефталат (ДМТ) и этиленгликоль. По сравнению с процессом гликолиза, при метанолизе также приемлемы исходные материалы ПЭТФ с более низким качеством. В продуктах метанолиза, этиленгликоль и метанол легко перерабатываются и восстанавливаются. Несмотря на то, что метанолиз имеет высокие технологические затраты, относительно низкие затраты на сырье это компенсируют.

Основным недостатком гидролиза является необходимость высоких температур, высокого давления и длительного времени, необходимого для полной деполимеризации. Предложен кислотный гидролиз для переработки ПЭТ с использованием концентрированной серной кислоты, чтобы избежать высоких температур и условий давления, используемых при гидролизе. Но он также имеет некоторые недостатки, заключающиеся в высокой стоимости этого процесса, поскольку ему необходимо перерабатывать большие количества концентрированной  $H_2SO_4$ , а также очищать этиленгликоль от кислоты.

В другом исследовании использовали продукт аминализа, полученный из ПЭТ-бутылок из отходов, для формирования антикоррозийных красок для защиты стальных конструкций. Сообщено об использовании аминализа и продукта аминогликолиза отработанного ПЭТ в качестве отвердителя в жидкой эпоксидной смоле, которые могут найти применение в клеях, покрытиях и области изоляции. Аминализ отходов ПЭТ может быть проведен с использованием этаноламина. Продукт, полученный в результате аминализа, бис(2-гидроксиэтил) терефталамид обладает потенциалом подвергаться дальнейшим реакциям с образованием вторичного продукта с добавленной стоимостью, такого как ненасыщенные

полиэфирные смолы, полиуретаны, отвердители эпоксидных смол и неионные полимерные поверхностно-активные вещества.

Бутылки из переработанного ПЭТ можно использовать для изготовления композитных панелей, которые могут найти применение в строительной сфере. Также переработанные отходы ПЭТ-бутылок используются в качестве объемного наполнителя в композитных панелях. В этих случаях материал переработанного ПЭТ добавляется в раздробленном состоянии. Рециркулированные отходы ПЭТ-бутылок также нашли применение в изготовлении асфальта, в качестве добавки в композиты, ПЭТ-частицы в пенополиуретане и в качестве полимербетона. Композитные панели изготавливают из ПЭТ, используя целую бутылку из ПЭТ (включая крышки), не влияя на ее физические свойства.

Подготовленные композитные панели способны уменьшить количество отходов ПЭТ-бутылок и снизить загрязнение воздуха. Это также помогает снизить стоимость энергии, используемой для отопления и охлаждения зданий. Благодаря использованию этих композитных панелей становится возможной теплоизоляция зданий, а также уменьшается импорт дорогих изоляционных материалов и их транспортировка. ПЭТ-бутылки также используются в качестве объемных наполнителей в композитах.

Среди других используемых изоляционных материалов наполнителя, таких как фенольная пена, жесткий полиуретан, минеральное волокно, жесткий полиизоцианурат, экструдированный полистирол и вспененный полистирол, бутылки из ПЭТ обеспечивают отличную теплоизоляцию из-за захваченного воздуха в пустых бутылках из ПЭТ. Представлен особый вид блока, изготовленный из переработанного ПЭТ материала, который нашел применение в качестве посадочного материала. Вторичная переработка ПЭТ-бутылок в этом случае осуществлялась различными способами. Из переработанного материала ПЭТ-блок был изготовлен в технике выдувного формования. Готовые ПЭТ-блоки демонстрируют возможность блокировки, которая уменьшает или исключает использование связующего материала для блоков. Данные блоки используются для изготовления посадочных мест, как показано на рисунке 7.

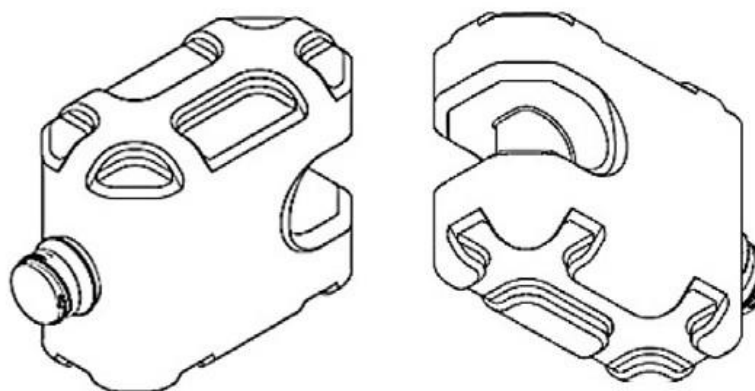


Рисунок 7 – Переработка ПЭТ-бутылок в ПЭТ-блоки

Подготовленный полимербетон производят из бутылок r-PET. Этот полимербетон можно использовать вместо обычного цемента. Смола UP, полученная в результате гликолиза отходов r-PET, использовалась в качестве связующего соединения для получения полимербетона. Другая группа использовала ПЭТ-уголь, полученный в результате пиролиза отходов ПЭТ, для получения эпоксидного композита. В эту систему возможно добавление до 50 мас. % полукокса. Механические, электрические и твердостные испытания этих композитов с различным весовым процентом полукокса при различных температурах показывают хорошие значения.

Газ и жидкости, образующиеся во время пиролиза, используются в качестве топлива и химического сырья, а оставшийся полукокс используется для производства композитного материала, что, таким образом, снижает загрязнение почвы, не осажая полукокс в землю. Для органического окисления красителей изготовлены ПЭТ композиты. Приготовленный композит пригоден для окисления

метиленового синего красителя. Для исследования приготовили композит с различным весовым процентом порошка ПЭТ, таким как 10, 15 и 20 вес.%. Композит с 15 масс. % демонстрирует наибольшее удаление метиленового синего, поскольку он содержит наибольшее количество восстанавливаемых ионов железа. Углерод из ПЭТ части восстанавливает ионы железа. Такое комбинированное изготовление красного шлама и порошка ПЭТ уменьшает проблемы утилизации твердых отходов и решает проблемы с жидкими отходами.

Изготовлены композиционные материалы с использованием частиц, полученных из отходов ПЭТ-бутылок и мраморной пыли. Полученный композит демонстрирует синергетический эффект как от мраморной пыли, так и от ПЭТ. Свойства композитов становятся выше, чем у чистых отходов ПЭТ. Мрамор хорошо взаимодействует с частицами ПЭТ. Взаимодействие между мраморной пылью и ПЭТ приводит к получению строительного материала с хорошим качеством и низкой стоимостью.

### **1.2.2 Технологический процесс механической переработки ПЭТ на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье»**

«Переработка ПЭТ на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье» относится к категории механического рециклинга, которая предусматривает переработку не только чистых, но и загрязненных отходов.

Получаемый после переработки материал (ПЭТФ-флекс) в дальнейшем может быть использован в качестве вторсырья.

Технологический процесс переработки поступающего сырья состоит нескольких этапов (рисунок 8)» [26].

«Поступившее на переработку сырье (ПЭТ) сортируется ручным способом. Далее проходит через моющий отделитель этикеток, где отбивается сильное загрязнение сырья и отделяются этикетки. Далее проходит металлосепарация и материал загружается в дробилку №1, где происходит измельчение на сетке диаметром 20 мм для получения крупной фракции.

Данная операция проводится с постоянной подачей воды для удаления загрязнений. Далее получившийся материал перемещается в 1-ую горизонтальную ванну, где в водной среде происходит дополнительное отмывание грязи и песка» [6].

«Следующим этапом является флотационное отделение этикеток от измельченных фракций ПЭТ в 1-ой двухшнековой флотационной ванне. Затем перерабатываемый материал помещается в «горячие» мойки, где под действием высокой температуры в среде едкого натра происходит тщательного удаление клея и загрязнений от материала.

После «горячих» моек происходит промывка сгустков клея и грязи во 2-ой горизонтальной ванне путем подачи технологической воды с последующим ее отводом на очистку.

Следующий этап очищения крупной фракции ПЭТФ-флекс от этикеток производится во 2-ой двухшнековой флотационной ванне. После материал перемещается в дробилку №2 для измельчения на сетке диаметром 10 мм (мелкая фракция)» [3].



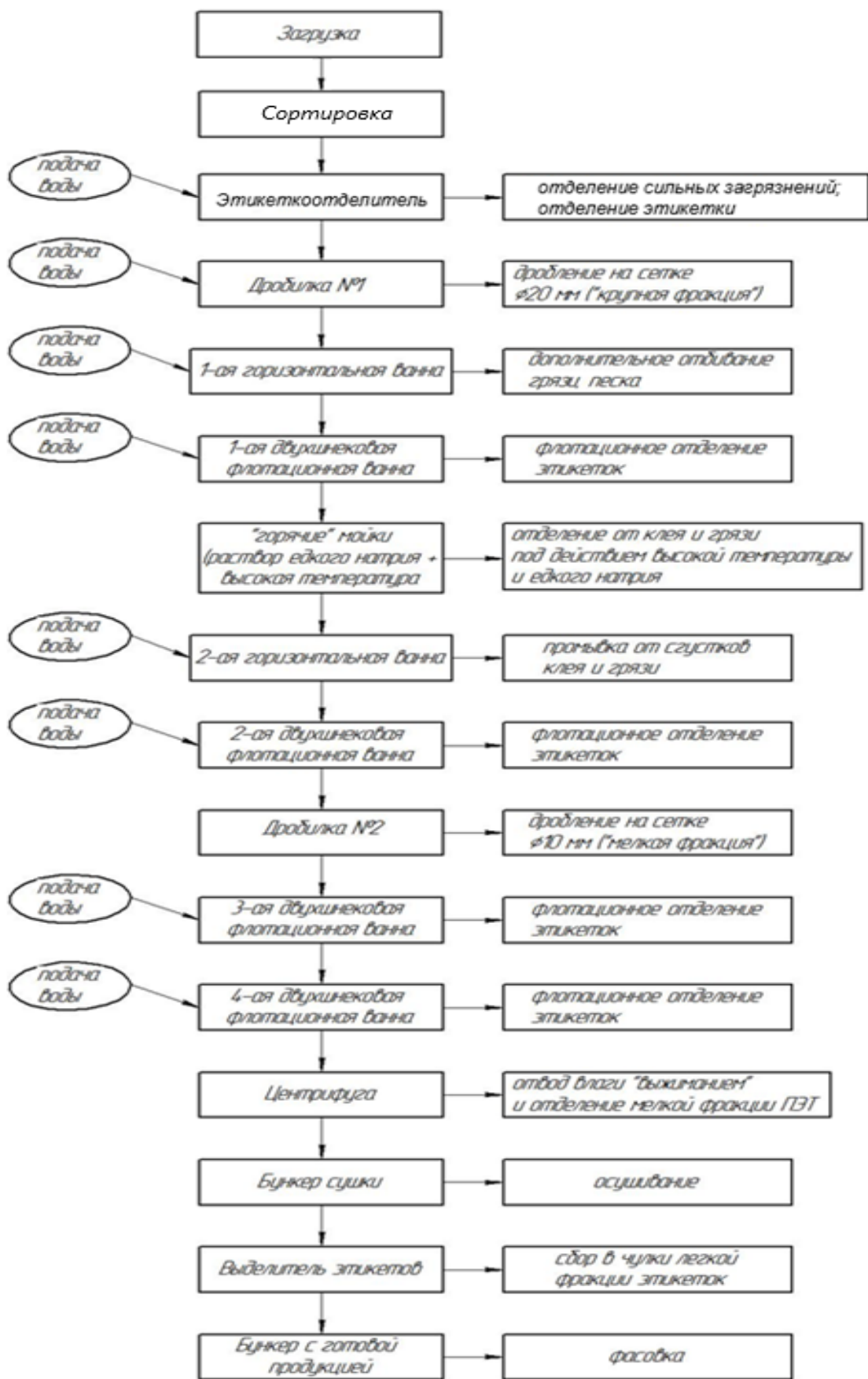


Рисунок 8 – Алгоритм технологических операций выполнения механической переработки ПЭТ-отходов в ПЭТФ

«Последующими этапами является флотация мелкой фракции ПЭТФ-флексы в 3-ей и 4-ой двухшнековых флотационных ваннах. При флотации осуществляется подача чистой воды.

Влажная ПЭТФ-флекс загружается в центрифугу для отвода влаги «выжиманием» и удаления мелкой фракции от 0 до 3 миллиметров, которая подходит для дальнейшего вторичного применения, но уже в «агломерате-линия» в производстве полимерпесчаных изделий.

Далее производится сушка ПЭТФ-флекс в бункере при 110°-120°С» [4].

На окончательном этапе материал попадает в выделитель этикеток, где при помощи воздуха происходит отделение легкой фракции ПВХ этикеток от достаточно тяжелой фракции ПЭТФ-флекс.

Полученная ПЭТФ-флекса, перемещается в бункер с готовой продукцией для хранения и фасовки.

ПЭТФ-флекс фасуется в биг-бэги, материал уплотняется при помощи вибростола.

В таблице 4 представлены требования к поступающему на переработку сырью.

Таблица 4 – Требования, предъявляемые к перерабатываемым ПЭТ

Наименование показателя	ПЭТ бутылка светлая V до 5л	ПЭТ бутылка темная V до 5л
1	2	3
ПЭТ бутылка	прозрачная, голубая, микс светлый не менее 96%	коричневая, зеленая, микс темный (включая светлую), не менее 97%
	прочие цвета не более 2%	белая, матовая
ПЭТ бутылка с жидкостью внутри	не допускается	
ПЭТ масло	не допускается	
Бутылки из-под бытовой химии, масел, растворителей	не допускается	
Металл (кроме обвязочной проволоки)	не допускается	

Продолжение таблицы 4

1	2	3
Степень загрязнения		
1 категория	не значительные загрязнения	
2 категория	масса грязи, налипшей на бутылку более 10 %	
3 категория	масса грязи, налипшей на бутылку более 25 %	

В таблице 5 приведены сведения получаемой на выходе ПЭТФ-флекс и различных примесей.

«Чем больше инородных примесей по окончанию технологического процесса в полученном продукте, тем меньше данный материал ценится» [36].

Таблица 5 – Характеристика флексы и инородных примесей по окончании технологического процесса

Наименование показателя	1 сорт	2 сорт	Брак
Размеры хлопьев:			
от 0 до 2 мм	не более 5 %		более 5%
от 2 до 12 мм	не менее 93 %		менее 93 %
от 15 мм и более	не допускается		наличие
Инородные примеси, %			
бумага, металл, песок, резина и другие	не более 0,15 %		более 0,15 %
полимерная этикетка	не более 0,03 %		более 0,03%
полиэтилен (крышка)	не более 0,02 %		более 0,02%
ПВХ	не более 0,02 %		более 0,02%
прочее ЛПП	не допускается		наличие
Влажность	не более 2 %		более 2 %

Так как сырье, а именно ПЭТ-бутылки не имеют при производстве одного единого ГОСТа, производители используют различное полимерное сырье, которое по

физико-химическим характеристикам приближены к полиэтилентерефталату. Поэтому при механической переработке уже используемых ПЭТ-бутылок возникает проблема разделения различных пластиков.

Поэтому целесообразно в конце технологической линии механической переработки ПЭТ-отходов применять сепараторы с оптическими датчиками, которые способны разделить различные пластики.

«При переработке ПЭТ-отходов возникают проблемы, такие как чувствительность к нагреву, влияние скорости сдвига на изменение вязкости материала, обязательная просушка, наличие примесей. Необходимо учитывать, что при переработке ПЭТ во вторичные материалы нужно непрерывно отслеживать степень просушки флекс, так как при использовании вторичного сырья с повышенным содержанием влаги ухудшает качество и свойства получаемых материалов.

Процесс переработки и сушки вторичного ПЭТ оказывает влияние на вязкость (потеря). Это обусловлено воздействием температуры, деформирующими действиями и наличием загрязняющих компонентов. Из-за воздействия данных факторов снижается молекулярная масса полимерного материала» [5].

«Одним из факторов, снижающих качество получаемой ПЭТ флексы является наличие загрязнителей. Для определения степени загрязнения поступающих на переработку ПЭТ разработана Методика определения степени загрязнения входящего сырья (МИ 202-08-2017). Согласно данной методики ПЭТ можно разделить на следующие степени загрязнения:

- низкая – через ПЭТ-бутылку полностью просматриваются предметы, на поверхности имеются незначительные загрязнения;
- средняя – через ПЭТ-бутылку предметы просматриваются с трудом, на поверхности множественные следы загрязнений;
- сильная – через ПЭТ-бутылку невозможно рассмотреть предметы, на поверхности значительные загрязнения.

В зависимости от степени загрязнения определяется длительности промывки ПЭТ. Для того, чтобы была возможность дальнейшего применения ПЭТ отходов, необходимо внедрять технологию, позволяющую промывать, очищать от

посторонних примесей и измельчать поступающие ПЭТ во флексу, отвечающую требованиям нормативной документации» [6].

«При механической переработке ПЭТ - отходов сталкиваются с проблемой выделения примесей, физико-механические и аэродинамические свойства которых схожи с годным продуктом. При этом зачастую трудноотделимые примеси отличаются от годного продукта по оптическим признакам: цвету, текстуре или на просвет, что позволяет эффективно применять фотосепаратор» [45].

### **1.2.3 Переработка ПЭТ-отходов в сырье для производства первичной продукции**

«ООО «Сибур» на предприятии ООО «Полиэф» в Благовещенске (Республика Башкортостан, входит в СИБУР Холдинг) 2 сентября 2020 года приступил к реализации проекта по выпуску «зеленой» ПЭТ-гранулы (полиэтилентерефталата, ПЭТФ) для которой при производстве планируется использовать около 34 тыс. тонн вторичного сырья ежегодно» [9].

«Производство ПЭТФ с содержанием вторичных ресурсов — важная часть стратегии ООО «Сибур» в области устойчивого развития до 2025 года. ООО «Сибур» ведет постоянную работу по повышению эффективности производственных процессов, совершенствованию марочного ассортимента в целях улучшения свойств продукции, а также разработке новых продуктов. Вовлечение вторичного сырья позволит не только следовать принципам экономики замкнутого цикла в бизнес-модели, но и снизить удельные выбросы парниковых газов на тонну готовой продукции.

Для обеспечения проекта сырьём поставки ПЭТФ-флекс будут осуществляться из различных регионов страны. При реализации проекта будут использоваться полуфабрикаты переработанных бутылок (отмывка и подготовка полуфабрикатов будет производиться поставщиками на собственных предприятиях). Обязательно будет проводиться входной контроль качества поступающего сырья на соответствие установленным требованиям» [7].

Предприятие ООО «ЭкоРесурсПоволжье» заинтересованно в заключении договора на поставку компании ООО «Сибур» ПЭТФ-флекс собственного

производства. Для этого нужно модернизировать существующую линию, с целью улучшения качества ПЭТФ-флекса, для соответствия характеристик входного контроля.

В таблице 6 представлено сравнение характеристик ПЭТФ-флекса.

Таблица 6 – Сравнение характеристик ПЭТФ-флекса

Параметр:	ПЭТФ-флекс необходимый для производства компании «Сибур»	ПЭТФ-флекс, производимый на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье»
Цвет и внешний вид хлопьев	прозрачные, бесцветные и светло-голубые, без видимых загрязнений, без запаха	прозрачные, бесцветные и светло-голубые, без видимых загрязнений, без запаха
Характеристическая вязкость	0.73 - 0.84 гл/г	-
Содержание светло-голубых хлопьев	40% +/- 10%	40% +/- 10%
Остаточная влажность	≤ 1%	≤ 1%
Насыпная плотность	250-400 г/л	250-400 г/л
Фракционный состав ПЭТ хлопьев:		
> 12 мм	≤ 4%	≤ 2%
0,5мм < X < 2мм	≤ 1%	≤ 1%
<0,5мм	≤ 0,5%	≤ 5%
рН водной вытяжки	7,5-8	7,5-8
- полиолефины (ПЭ, ПП)	0,005%	0,02%
- крышка	--	
- ПВХ	0,005%	0,01%
- полиамид	0,001%	-
- клей	0,015%	0,015%
- цветные хлопья	0,005%	≤ 5%
- металлы	0,0025%	0,15%

Для дальнейшего пути решения поставленных проблем нужно провести исследование основной характеристики ПЭТФ-флекса ООО «ЭкоРесурсПоволжье», а именно исследовать показатель характеристической вязкости.

Выводы по первой главе:

- отходы полиэтилентерефталата (в частности ПЭТ-бутылки) устойчивы к разложению в естественных условиях, это обуславливает необходимость сбора и переработки ПЭТ-отходов;

- анализ способов переработки ПЭТ-отходов показал, что наиболее целесообразной и экологически безопасной является механическая переработка ПЭТ-отходов, так как полученный материал может использоваться как сырье в промышленных или химических производствах;

- по всему миру для разделения сыпучих материалов сельскохозяйственные и перерабатывающие предприятия в настоящее время используют оптические сортировщики;

- к оптическим сортировщикам относится, фотосепаратор – это оборудование нового поколения, в нем применяются высокотехнологические принципы работы в таких областях, как оптика, электроника совместно с программированием. Его применение способствует высочайшей чистоты продукта. Активных рабочих органов в фотосепараторе нет, поэтому данный вид сепаратора не травмирует обрабатываемый материал. Данный вид оборудования имеет широкое и успешное применение в механической переработке отходов;

- для дальнейшего пути решения поставленных задач нужно провести исследование основной характеристики ПЭТФ-флекс ООО «ЭкоРесурсПоволжье», а именно исследовать показатель характеристической вязкости.

## Глава 2 Совершенствование технологии получения ПЭТФ-флекс как вторичного сырья для химических предприятий

### 2.1 Экспериментальное исследование основных характеристик ПЭТФ-флекс ООО «ЭкоРесурсПоволжье» как сырья для химических предприятий

Данное экспериментальное исследование проводилось согласно методике испытаний по ТУ 20.16.40-021-39989731-2021.

Метод основан на растворении навески в смеси (фенол:тетрахлорметаном), измерении кинематической вязкости раствора и растворителя в стеклянном капиллярном вискозиметре «Уббелоде» с последующим расчетом характеристической вязкости.

Характеристическая вязкость  $X$ , в  $\text{см}^3/\text{г}$  ( $X$ , в  $\text{дл}/\text{г}$ ) рассчитывают с помощью уравнения Биллмейра (уравнение 1):

$$X = 0,25 \cdot \frac{\left[\left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right) - 1 + 3 \cdot \ln\left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)\right]}{C} \quad (1)$$

где  $\nu_1$  – кинематическая вязкость раствора полимера,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;

$\nu_2$  – кинематическая вязкость растворителя,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;

$C$  – концентрация раствора,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Кинематическую вязкость  $\nu$ , в  $\text{мм}^2/\text{с}$  рассчитывают по следующей формуле 2:

$$\nu = \frac{g}{9,807} \cdot K \cdot T \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести в месте измерения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$K$  – постоянная вискозиметра,  $\text{мм}^2/\text{с}^2$ ;

$T$  – время истечения жидкости в секунду.



### Подготовка пробы ПЭТФ-флекс

С помощью пробоотборником из биг-бэга отобрали пробу ПЭТФ-флексы и взвесили на весах. Каждую пробу привели к одинаковому значению массой 300 г. При помощи сита с ячейкой 1 миллиметр просеяли пробу и получили ПЭТФ-флекс фракцией до 1 миллиметра.

### Приготовление растворителя

Растворитель приготовили смешиванием в весовом соотношении 50:50. К фенолу 100 грамм, расплавленного на водяной бане при температуре 50°C, добавили 100 грамм тетрахлорметана. Полученный растворитель хранили в закрытой колбе.

Приготовленный растворитель представлен на рисунке 9.

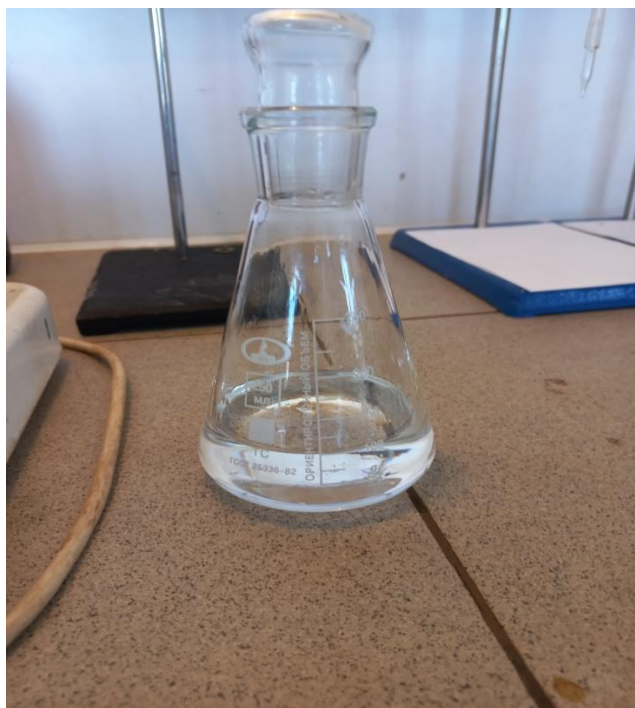


Рисунок 9 – Приготовленный растворитель

### Приготовление раствора с ПЭТФ-флексой

Взвесили и добавили во флакон 0,25 грамм приготовленную навеску с ПЭТФ-флекс (рисунок 10), к навеске добавили 49,75 грамм растворителя. Флакон с

приготовленным раствором (рисунок 11) закрыли крышкой. Перемешивали флакон на водяной бане при 60°C в течении 1 часа до полного растворения.

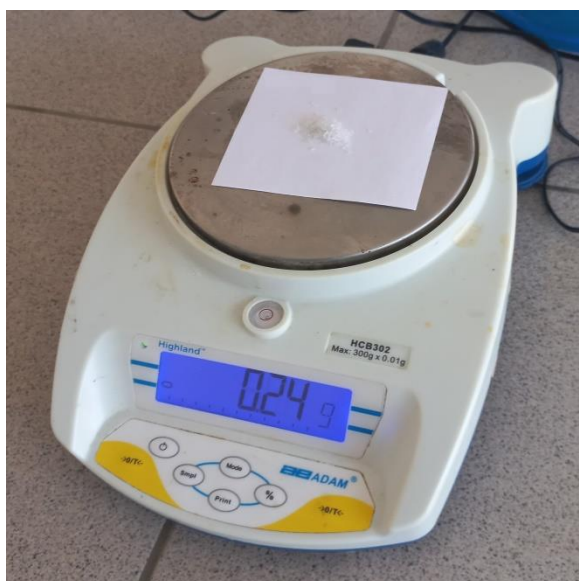


Рисунок 10 – Навеска с ПЭТФ-флексой



Рисунок 11 – Приготовленный раствор с ПЭТФ-флексой

## Выполнение измерений

Измерение кинематической вязкости растворителя и кинематической вязкости раствора с ПЭТФ-флекс проводили при 40°C. Для этого использовали капиллярный вискозиметр ВПЖ-2 Ø – 0,99.

На рисунке 12 представлено измерение кинематической вязкости.



Рисунок 12 – Измерение кинематической вязкости

Для исследования использовали 4 навески с разных партий ПЭТФ-флекс. В таблице 7 приведены данные о пробах.

Таблица 7 – Данные о пробах для исследования

№	Дата отбора	Цвет ПЭТФ-флекс	Размер частиц
1	12.03.2022	прозрачный	до 3 мм
2	15.03.2022	прозрачный	до 3 мм
3	02.04.2022	прозрачный	до 3 мм
4	06.04.2022	МІХ-темный	до 3 мм

## Расчет характеристической вязкости

### Проба №1

В таблице 8 представлено время истечения растворителя и раствора пробы 1.

Таблица 8 – Время истечения раствора и растворителя пробы №1

Раствор	Растворитель
25,12	16,82
25,09	16,95
25,00	16,88
25,08	16,92
Среднее: 25,08	Среднее: 16,89

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость растворителя пробы №1:

$$\nu = \frac{9,81}{9.807} \cdot 0,1179 \cdot 16,89 = 1,9919 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость раствора пробы №1:

$$\nu = \frac{9,81}{9.807} \cdot 0,1179 \cdot 25,08 = 2,9578 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 1 наши значения и получим характеристическую вязкость пробы №1:

$$X = 0,25 \cdot \frac{\left[ \left( \frac{2,9578}{1,9919} \right) - 1 + 3 \cdot \ln \left( \frac{2,9578}{1,9919} \right) \right]}{0,5} = 0,8355 \text{ см}^3/\text{г}$$

Проба №2

В таблице 9 представлено время истечения растворителя и раствора пробы 2.

Таблица 9 – Время истечения раствора и растворителя пробы №2

Раствор	Растворитель
25,09	16,80
25,08	16,79
25,11	16,83
25,06	16,86
Среднее: 25,085	Среднее: 16,82

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость растворителя пробы №2:

$$\nu = \frac{9,81}{9.807} \cdot 0,1179 \cdot 16,82 = 1,9837 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость раствора пробы №2:

$$\nu = \frac{9,81}{9.807} \cdot 0,1179 \cdot 25,085 = 2,9584 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 1 наши значения и получим характеристическую вязкость пробы №2:

$$X = 0,25 \cdot \frac{\left[ \left( \frac{2,9584}{1,9837} \right) - 1 + 3 \cdot \ln \left( \frac{2,9584}{1,9837} \right) \right]}{0,5} = 0,8359 \text{ см}^3/\text{г}$$

Проба №3

В таблице 10 представлено время истечения растворителя и раствора пробы 3.

Таблица 10 – Время истечения раствора и растворителя пробы №3

Раствор	Растворитель
25,05	16,81
24,99	16,92
25,01	16,89
24,88	16,90
Среднее: 24,98	Среднее: 16,88

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость растворителя пробы №3:

$$\nu = \frac{9,81}{9,807} \cdot 0,1179 \cdot 16,88 = 1,9907 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость раствора пробы №3:

$$\nu = \frac{9,81}{9,807} \cdot 0,1179 \cdot 24,98 = 2,946 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 1 наши значения и получим характеристическую вязкость пробы №3:

$$X = 0,25 \cdot \frac{\left[\left(\frac{2,946}{1,9907}\right) - 1 + 3 \cdot \ln\left(\frac{2,946}{1,9907}\right)\right]}{0,5} = 0,8278 \text{ см}^3/\text{г}$$

Проба №4

В таблице 11 представлено время истечения растворителя и раствора пробы 4.

Таблица 11 – Время истечения раствора и растворителя пробы №4

Раствор	Растворитель
23,27	16,81
23,42	16,90
23,01	16,87
23,05	16,54
Среднее: 23,1875	Среднее: 16,78

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость растворителя пробы №4:

$$\nu = \frac{9,81}{9,807} \cdot 0,1179 \cdot 16,78 = 1,9789 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 2 наши значения и получим кинематическую вязкость раствора пробы №4:

$$\nu = \frac{9,81}{9,807} \cdot 0,1179 \cdot 23,1875 = 2,7346 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Поставим в формулу 1 наши значения и получим характеристическую вязкость пробы №4:

$$X = 0,25 \cdot \frac{\left[ \left( \frac{2,7346}{1,9789} \right) - 1 + 3 \cdot \ln \left( \frac{2,7346}{1,9789} \right) \right]}{0,5} = 0,6761 \text{ см}^3/\text{Г}$$

Результаты исследования представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты исследования

№ пробы	Цвет ПЭТФ-флекс	Показатель характеристической вязкости	Вывод о пригодности в производстве	Среднее значение показателя
1	Прозрачный-голубой	0,8355 см <sup>3</sup> /Г	первичного гранулята и преформ	0,8331 см <sup>3</sup> /Г
2	Прозрачный-голубой	0,8359 см <sup>3</sup> /Г	первичного гранулята и преформ	
3	Прозрачный-голубой	0,8278 см <sup>3</sup> /Г	первичного гранулята и преформ	
4	МIX-темный	0,6761 см <sup>3</sup> /Г	волокна	-

Вывод по исследованиям: Прозрачная-голубая ПЭТФ-флекс, производимая на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье», имеет характеристическую вязкость в диапазоне 0,8275-0,8359 см<sup>3</sup>/Г, следовательно, данная ПЭТФ-флекс может использоваться как добавка при производстве первичного гранулята и преформ.

ПЭТФ-флекса MIX-темного цвета может использоваться в производстве полиэфирного волокна.

## 2.2 Анализ оптических сепараторов и определение требований их эффективности

По всему миру для разделения сыпучих материалов сельскохозяйственные и перерабатывающие предприятия в настоящее время используют оптические

сортировщики. К оптическим сепараторам относится фотосепаратор.

«Фотосепаратор предназначен для разделения компонентов любых сыпучих смесей по цвету, форме или размеру, и позволяет получать чистоту годного продукта на выходе до 99,99%. Применение метода цветового анализа и оценки плотности позволяет обеспечить высокую точность сортировки» [10].

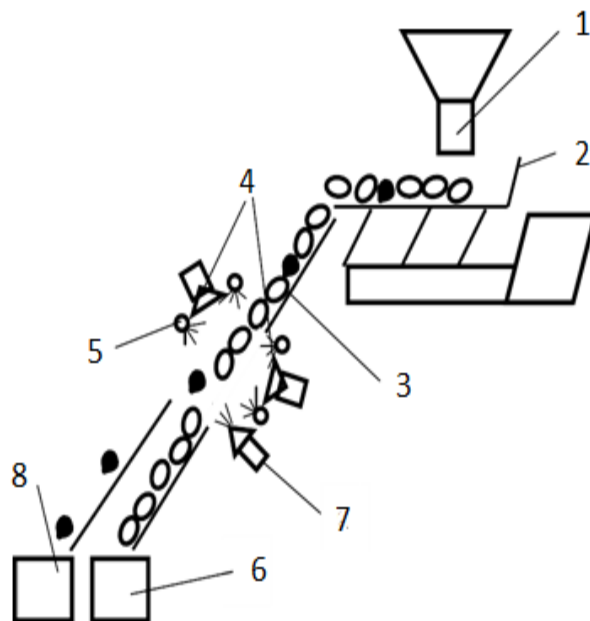
Фотосепараторы устанавливаются в конце технологического процесса переработки, так как все стадии переработки пройдены и осталось разделить примеси которые не разделились с материалом другими механическими способами.

«Тищенко А.И. в своей книге «Применение фотоэлектронных сепараторов для повышения качества сортировки сыпучих продуктов» говорит, что принцип фотоэлектронного сепарирования по цвету был разработан в середине прошлого века. Процесс фотосепарирования заключается в обнаружении ненужных компонентов в сыпучем материале, которые отличаются по различным оптическим признакам от эталона, и поштучном их удалении» [11].

«В 1947 году компанией Сортекс в Лондоне был установлен первый фотосепаратор. С того момента фотоэлектронная сепарация впитала различные новейшие и усовершенствованные достижения оптики, электроники и микропроцессорной техники. В современной жизни фотосепараторы имеют высший уровень автоматизации и минимальное физическое воздействие на годный продукт» [12].

«На сегодняшний день фотосепараторы разных производителей принципиально не отличаются по своей конструкции, поскольку используют один принцип работы, который показан на рисунке 13.





1 – приемный бункер; 2 – вибропитатель, 3 – скатный лоток, 4 – фотоэлемент; 5 – лампы подсветки; 6 – бункер для чистого материала; 7 – форсунка (эжектор); 8 – бункер для отходов

Рисунок 13 – Схема работы фотосепаратора

При работе фотосепаратора материал из бункера 1 попадает на вибропитатель 2, который равномерно распределяет материал по каналам лотка 3. Лоток – это металлическая планка с множеством параллельных дорожек каналов, по которым материал равномерно сыпается на рабочие органы фотосепаратора.

Затем, материал, продвигаясь по каналу попадает в поле зрения фотоэлемента 4 (либо CCD–камеры), где система определяет качество этого материала. Для повышения качества распознавания используются лампы подсветки 5.

Если материал соответствует заданному качеству, то оно продолжает двигаться дальше и падает в бункер 6 для чистого материала. Если же материал отличается от заданного параметра, то фотоэлемент передает сигнал системе, от чего форсунка 7 «выстреливает» струю воздуха, и этот материал перебрасывается в бункер для отходов 8.

В мировой практике производство и применение фотоэлектронных сепараторов расширяется, растёт количество фирм, выпускающих данное

прогрессивное ~~брусье~~ В настоящее время производство фотосепараторов организовано в России, Италии, Японии, Корее, Китае и других странах» [3].

«Завод «Воронежсельмаш» выпускал отечественные фотосепараторы серий Ф (Ф5.1, Ф10.1, Ф15.1 и Ф20.1) и СВ (СВ-1, СВ-2, СВ-3 и СВ-4). Производительность которых реализуется только при малом содержании примесей в обрабатываемом материале» [20].

«На фотосепараторах производства завода «Воронежсельмаш» применялись быстродействующие эжекторы, минимальное время открытия которых 1 мс. Ресурс эжекторов составляет 6 млрд. циклов. Видеокамеры с разрешением 2048 пикселей и частотой съёмки до 15000 кадров в секунду способны распознать до 16000 оттенков. Камеры могут распознать на частицах дефекты размером от 0,2 мм» [21].

«В случае высокой засорённости исходного продукта фотосепаратор может быть оборудован скатным лотком 2 для обработки возвратной фракции» [25]. Скатный лоток представлен на рисунке 14.



Рисунок 14 – Скатный лоток

«В этом случае для уменьшения потерь качественного продукта полученный при первом цикле очистки отход подаётся на ресортировочный лоток 2 для повторной его очистки» [8].

«Фотосепараторы серии СВ отличаются возможностью установки лазерного источника освещения. Данный сортировщик за счёт использования современных

оптоволоконных лазерных технологий позволяет сепарировать ПЭТФ-флексу не только по внешним параметрам, таким как цвет, текстура, элементы формы, размера, но и по скрытым внутренним признакам» [2], что способствует повешению качества очистки.

«Оптическая система фотосепараторов герметизирована при помощи стекла. При этом предусмотрен механизм очистки стёкол, состоящий из магнитного бесштокового цилиндра и стеклоочистителя. Механизм очистки стёкол смотрового отсека включается автоматически» [3].

«Использование преимуществ фотосепараторов и достижение высоких показателей очистки возможны лишь при правильной установке и эксплуатации фотосепараторов в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя» [3].

«Итальянская фирма SEA выпускает фотосепараторы PIXEL NEXT, CHROME и другие. Фотосепараторам серии NEXT характерна интеллектуальная и гибконастраиваемая система автокоррекции чувствительности, которая позволяет автоматически адаптировать чувствительность каждого пикселя CCD камеры к освещённости продукта. Освещение продукта происходит посредством светодиодной LED системы, срок службы которой более 100 000 часов» [3].

«Данные серийные сепараторы имеют возможность сортировки материала по нескольким параметрам одновременно. Бункер загрузочный можно оснастить емкостным датчиком уровня продукта, с помощью которого возможен контроль подачи материала вибропитателем. Данный вид аппарата может иметь блочно-модульную конструкцию, а это значительно упростит обслуживание и ремонт аппарата.

Наиболее производительным RGB сортировщиком на рынке является фотоэлектронный сепаратор SEA CHROME. Будучи оснащённым многоцветными RGB камерами с разрешением 4096 пикселей и LED освещением, они позволяют различать дефекты размером от 0,1 мм. Этот сортировщик используют, устанавливая от 1 до 7 лотков, обеспечивая при этом производительность 0,5... 50 т/ч. В моделях с несколькими лотками доступны опции ресортировки.

Предприятия Кореи выпускают фотосепараторы моделей ROYAL, NANTA

PUBU King, NANTA 9000T, NANTA ACE, SPARK и др. Данные фотосепараторы снабжены светодиодной подсветкой и CCD камерами» [3].

«Сортировщики SATAKE серии REZS оснащены самыми современными полноцветными японскими камерами, которые распознают цвета подобно человеческому глазу, что позволяет выявлять самые незначительные различия оттенков. Данные машины имеют предустановленное программное обеспечение, которое автоматически анализирует цвета годного продукта и примесей и производит настройку световой чувствительности оборудования. LED-осветители оптических сортировщиков создают оптимальную продукцию и имеют длительный срок службы, что позволяет сократить эксплуатационные расходы машины. Сопла пневмоэжекторов фотосепараторов серии REZS размещены с шагом 5 мм, что повышает точность сортировки и снижает потери годного продукта в сравнении с соплами большего размера.

Большинство современных фотосепараторов, производимых в мире, имеют возможность сортировки в ближнем инфракрасном диапазоне световых волн, невидимых для человека. Это позволяет разделять компоненты не только по цвету, но и по их текстуре, что расширяет список сортируемых продуктов и повышает качество фотосепарирования» [4].

«Практически все современные фотосепараторы имеют возможность удалённого доступа к ним, настройки и исправления неисправностей через интернет. Это позволяет сократить время простоя машины и обучения персонала, а также выявить ошибки эксплуатации.

Таким образом, становится ясно, что фотосепаратор – это высокотехнологичное оборудование нового поколения, в котором применяются новейшие разработки в области оптики, электроники и программирования. Данные машины позволяют достигать очень высоких результатов очистки (до 99,99% чистоты). При этом фотосепараторы не имеют рабочих органов, травмирующих обрабатываемый материал. Поэтому целесообразность применения фотосепаратора при механической переработки ПЭТ отходов не вызывает сомнений» [5].

«Фотосепарация является очень эффективным способом очистки и сортировки

ПЭТФ-флекс» [2,3]. Благодаря этому значительно уменьшается воздействие на материал.

«Важно помнить, что фотосепараторы необходимо размещать в конце технологической линии, после того как минеральные, металломагнитные и прочие примеси максимально выделены из обрабатываемого материала. В таком случае эффективность фотосепаратора будет наибольшей. Поэтому, как правило, оптические сортировщики устанавливаются в конце технологической линии. В этом случае необходимо учитывать, что возможные вибрации конструкции, вызванные другими единицами оборудования технологической линии, могут отрицательно влиять на качество фотосепарации. Это необходимо учитывать при разработке современных технологических линий. В таблице 13 представлены сравнительные характеристики фотосепараторов» [6].

Таблица 13 – Сравнительные характеристики сепараторов

Название	Тип освещения	Тип подачи/расположение зоны анализа	Особенности модели
1	2	3	4
BLIZ ZARD	«Импульсное светодиодное освещение в ИК и видимом диапазоне» [20].	«Наклонный лоток анализ в падении» [22].	«Сортировка по размеру, форме, цвету, выделение дефектов, определение биологических характеристик и посторонних предметов» [24].
FELIX	Освещение при помощи светодиода	Анализ происходит на ленте	«Разрешение до 3 мм. Отсечка за счет пневматических пластин. Сортировка по цвету, составу, отсечка посторонних предметов» [25].
GENIUS	ИК и УФ лампы излучения	Транспортная лента анализ на ленте или в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 4 т/ч до 16 т/ч. Разделение натри фракции, по тонким цветовым оттенкам, размеру/форме, влажности. Выделение микротоксинов, отсечка посторонних предметов» [32]

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
NFM	Светодиодное освещение в ИК и видимом диапазоне	Сепаратор без системы доставки/ анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 29000 кг/ч до 34000 кг/ч. Полевой сепаратор для работы с грязным запыленным материалом, в сложных условиях эксплуатации. Разделение по цвету, размеру, дефектам. Отсечка посторонних предметов» [40]
NFM	Светодиодное освещение в ИК и видимом диапазоне	Сепаратор без системы доставки/ анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 29000 кг/ч до 34000 кг/ч. Полевой сепаратор для работы с грязным запыленным материалом, в сложных условиях эксплуатации. Разделение по цвету, размеру, дефектам. Отсечка посторонних предметов» [42].
NIMBUS	Двухстороннее лазерное освещение	Наклонный лоток/ анализ в падении	«Максимальная производительность, в зависимости от ширины зоны анализа – от 6000 кг/ч до 12000 кг/ч. Возможность установки гиперспектральной камеры. Широкий ассортимент продуктов (сухофрукты, овощи, моллюски, мясо). Разделение на три класса по тонким цветовым оттенкам, размеру/форме, дефектам, влажности, биологическим особенностям. Выделение микро токсинов, отсечка посторонних предметов» [23].
OPUS	Лазерное освещение	Наклонный вибралоток/ анализ в падении	«Анализ на просвет. Разделение на три класса по тонким цветовым оттенкам цвету, размеру/форме, дефектам, влажности, биологическим особенностям. Выделение микро токсинов, отсечка посторонних предметов» [37].
PRIMUS	Лазерное освещение	Транспортная лента с каналами, в которых располагается продукт/ анализ на транспортной ленте	«Максимальная производительность – 3,6 т/ч. Эффективность отсека не качественных ягод – 90 % [16]. Объекты выбиваются пневмоотсекателями вверх, где расположены транспортеры для «негодного» продукта. Разделение по цвету. Определение поврежденных продуктов, отсечка посторонних предметов» [27].

Продолжение таблицы 13

SEN TINE II	Светодиодное освещение в импульсном режиме	Транспортная лента/двусторонний анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 40 до 200 т/ч. Разделение на три класса по тонким цветовым оттенкам, размеру/форме, дефектам. Отсечка посторонних предметов» [43].
TITAN II	Светодиодное освещение в видимом и ИК диапазоне	Транспортная лента/двусторонний анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 10000 кг/ч до 34000 кг/ч. Разделение на три класса по цвету, размеру/форме, дефектам. Отсечка посторонних предметов» [42].
HALO	Светодиодное освещение в видимом и ИК диапазоне	Транспортная лента/двусторонний анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 4000 кг/ч до 60000 кг/ч. Разрешение до 1 мм. Разделение на три фракции, по тонким цветовым оттенкам, размеру/форме, поврежденным участкам. Выделение микро токсинов, отсечка посторонних предметов» [25].
HELIUS	«12 лазеров различной длины волны, освещение в УФ и/или ИК диапазоне» [31].	Транспортная лента/двусторонний анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 3000 кг/ч до 10000 кг/ч. Эффективность сортировки изюма, при производительности 3,2 т/ч – 93 %, после повторной сортировки – 100% [13]. Скорость транспортной ленты – 3 м/с [14]. Разделение по тонким цветовым оттенкам, влажности, содержанию хлорофилла, поврежденным участкам и пятнам. Выделение микротоксинов, отсечка посторонних предметов» [42].
IRIS II	«Комбинация светодиодного освещения в видимом и ближнем ИК диапазонах» [33].	Транспортная лента/двусторонний анализ в падении	«Максимальная производительность в зависимости от ширины зоны анализа – от 22000 кг/ч до 34000 кг/ч. Размер частиц – 10-25 мм. Разделение по цветовым дефектам. Отсечка посторонних предметов» [21].

«Анализ представленных данных показывает, что в большинстве сепараторов, кроме отдельных случаев, используется светодиодная подсветка. Ламповое освещение менее экономично. Лазерное облучение ориентировано на один тип признаков, видимых только в определенной области спектра, что снижает универсальность сортировщика. Однако в случае сортировщика HELIUS использование 12 лазеров позволяет охватить более широкий спектральный

диапазон» [8].

Внешний вид типового фотосепаратора для сепарирования пластика производства Steinert представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Сепаратор UniSort Flake американской компании Steinert

«Производитель позиционирует сепаратор как аппарат для разделения мелкозернистых минеральных образцов. Их анализ осуществляется после схода с транспортной ленты на скорости от 3,5 до 4 м/с. Сепаратор, в зависимости от задач сортировки, может быть оснащен ИК датчиком для анализа в диапазоне 780-2500 нм или цветной линейной камерой, поэтому его также можно использовать для разделения пластика» [5].

«Облучение зоны осуществляется линейными светодиодными источниками видимого или инфракрасного диапазона. Следует отметить, что при таком подходе разнообразных энергетических воздействий анализируемые материалы могут менять свои оптические признаки, т.е. приобретать вторичные. Данные процессы непосредственно увеличивают возможности разделения пластиков» [6].

«Производительность данного сепаратора составляет 0,4-2 т/ч. Размер объектов для цветового анализа – 3-30 мм, в то время как для ИК сортировки минимальный размер начинается от 5 мм. Имеется информация о том, что определение объектов при цветовой сортировке происходит на 3 мс быстрее, чем при ИК» [8].

Чистота конечного продукта может достигать 99,99%, соответственно



эффективность разделения может достигать отметки в 85% и выше.

На основании проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

- в ходе анализа обнаружены неоднозначные рекомендации по комплектованию и настройке фотосепаратора для очистки сыпучего материала;

- фотосепаратор – это оборудование нового поколения, в нем применяются высокотехнологические принципы работы в таких областях, как оптика, электроника совместно с программированием. Его применение способствует высочайшей чистоты продукта. Активных рабочих органов в фотосепараторе нет, поэтому данный вид сепаратора не травмирует обрабатываемый материал. Данный вид оборудования имеет широкое и успешное применение в механической переработке отходов.

### **2.3 Выбор математической модели для конструктивных расчетов фотосепаратора**

«Анализ объекта – это формирование на матрице анализа точек изображения. Следовательно, чем больше разрешение матричного программного обеспечения, тем больше можно исследовать детализацию объекта. Выбор программного обеспечения с небольшим разрешением имеют ограничения быстродействия. Поэтому нужно определить минимально необходимое количество пикселей для матрицы, которое способно решить поставленные задачи разделения.

Для распознавания какой-либо детализации объекта необходимо минимум 9 пикселей. Исходя из того, что 9 пикселей - это минимальный предел, можно взять некое количество пикселей на объект» [25].

Сигнал от объекта изображен на рисунке 16.

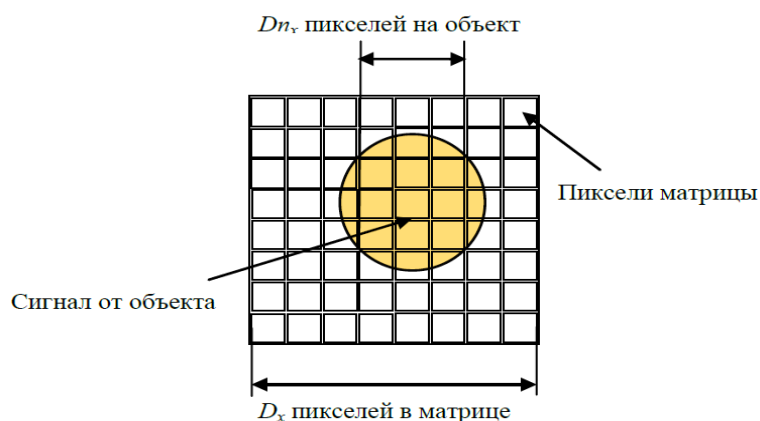


Рисунок 16 – Сигнал от объекта на матрице программного обеспечения

«В фотосепараторе чаще всего используется линейное программное обеспечение, которое накапливает матричные строки. Поэтому важно определить количество пикселей зоны анализа  $D_x$ » [26]. Количество пикселей зоны анализа можно определить по формуле 3:

$$D_x = D_{n_x} \cdot \frac{C_x}{d_{\min}} \quad (3)$$

где  $D_x$  – количество пикселей зоны анализа;

$D_{n_x}$  – количество пикселей на объект;

$C_x$  – ширина скатного лотка, мм;

$d_{\min}$  – минимальный размер анализируемого объекта, мм.

Вычисление по формуле 3 дает первый критерий выбора программного обеспечения для матрицы.

Линейное увеличение объектива зависит от ширины скатного лотка и размеру выбранной камеры по ширине. Линейное увеличение объектива можно определить по формуле 4:

$$\Gamma = \frac{L_x}{C_x} \quad (4)$$

где  $\Gamma$  – линейное увеличение объектива;

$L_x$  – размер выбранной камеры по ширине, мм;

$C_x$  – ширина скатного лотка, мм.

Размер зоны анализа вдоль вектора движения анализируемых образцов рассчитывается по формуле 5:

$$C_y = \frac{L_y}{\Gamma} \quad (5)$$

где  $C_y$  – размер зоны анализа, мм;

$L_y$  – размер выбранной камеры по высоте, мм;

$\Gamma$  – линейное увеличение объектива.

В программном обеспечении матрицы время экспозиции является регулируемым параметром. Формула 6 позволяет определить минимальное требование к быстродействию анализа объектов.

$$t_{\text{э}} = \frac{C_y}{v} \quad (6)$$

где  $t_{\text{э}}$  – время экспозиции, сек;

$C_y$  – размер зоны анализа, мм;

$v$  – скорость движения частиц, м/с.

У объективов есть два вида поле зрения. «Угловое поле зрения в пространстве объектов –  $2\omega_{\text{пр}}$  и угловое поле зрения в пространстве изображений –  $2\omega_{\text{из}}$ » [27]. Определение углового поля зрения объектива изображено на рисунке 17.

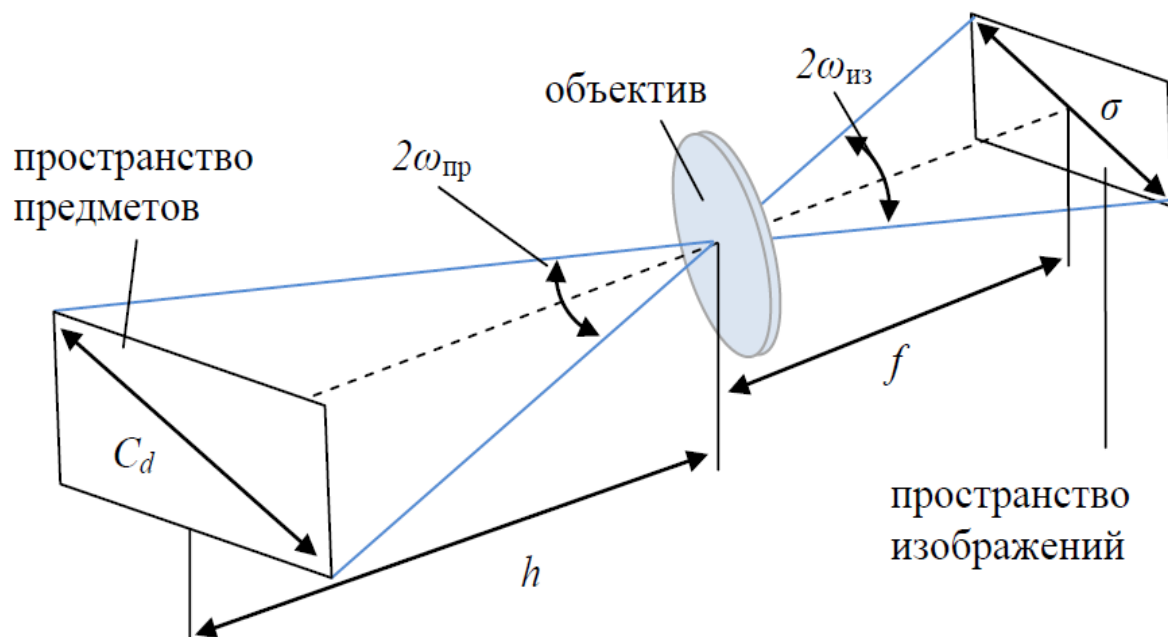


Рисунок 17 – Определение углового поля зрения объектива

«Для определения углового поля зрения объектива следует определить диагональ зоны анализа» [28]. Диагональ зоны анализа определяется по формуле 7.

$$Cd = \sqrt{Cx^2 + Cy^2} \quad (7)$$

где  $C_d$  – диагональ зоны анализа, мм;

$C_x$  – ширина скатного лотка, мм;

$C_y$  – размер зоны анализа, мм.

Угловое поле зрения объектива находится по формуле 8.

$$2\omega = 2 \cdot \arctg \frac{Cd}{2h} \quad (8)$$

где  $\omega$  – угловое поле зрения;

$C_d$  – диагональ зоны анализа, мм;

$h$  – расстояние от плоскости входного зрачка объектива до плоскости предметов, мм.

Далее выражаем параметр фокусного состояния. Фокусное состояние находится по формуле 9.

$$f = \frac{\sigma}{2tg(\omega)} \quad (9)$$

где  $\sigma$  – диагональ программного обеспечения матрицы, мм;

$f$  – фокусное расстояние объектива, мм;

$\omega$  – угловое поле зрения.

При помощи полученных параметров выбирается подходящий объектив. Отметим, что правильное расположение регистрационного блока относительно зоны анализа напрямую влияет эффективность сортировки сыпучих образцов.

На рисунке 18 изображена важность правильного расположения блока регистрации относительно зоны анализа.

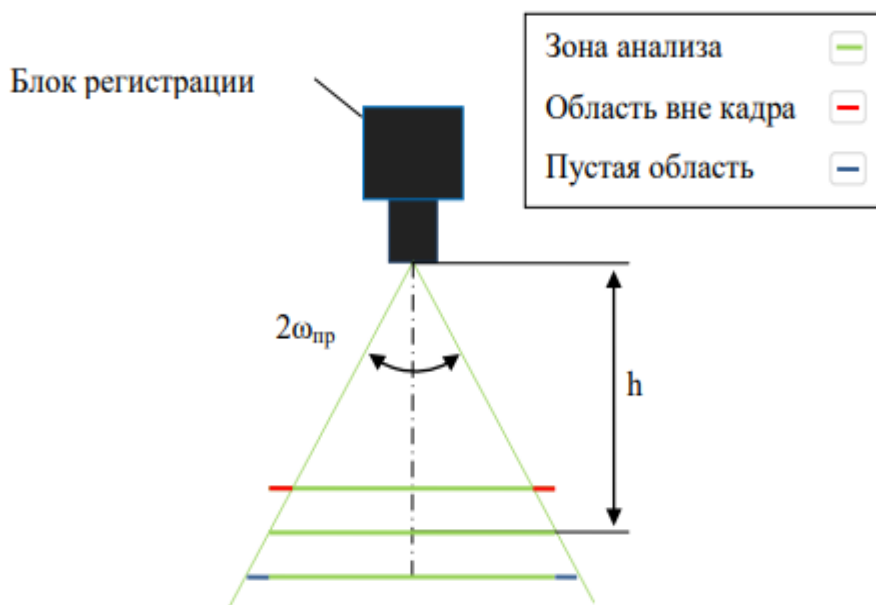


Рисунок 18 – Важность правильного расположения блока регистрации

Если сфокусирован объектив блока регистрации на объект, то его изображение будет резким. «Однако глубина резкости является допуском, который определяет диапазон расстояний от объектива до объекта в предметном пространстве, в рамках

которого изменение положения объекта вдоль анализируемой оси объектива не ведет к ухудшению качества изображения» [30].

Это расстояние рассчитывается по формулам 10, 11, 12.

$$L_{\text{пер}} = \frac{h \cdot f^2}{f^2 + F_x(h - f) \cdot w} \quad (10)$$

$$L_{\text{зад}} = \frac{h \cdot f^2}{f^2 - F_x(h - f) \cdot w} \quad (11)$$

$$\Delta L_{\text{зад}} = L_{\text{зад}} - L_{\text{пер}} \quad (12)$$

где  $L_{\text{пер}}$  и  $L_{\text{зад}}$  – расстояние от передней главной плоскости оптической системы до передней и задней границ глубины резкости, мм;

$h$  – расстояние до плоскости фокусировки, мм;

$f$  – фокусное расстояние объектива, мм;

$F_x$  – диафрагменное число;

$w$  – диаметр кружка нерезкости на матрице программного обеспечения.

Глубина резкости обосновывает возможные отклонения траектории движения объекта от расчетной. Данное требование изображено на рисунке 19.

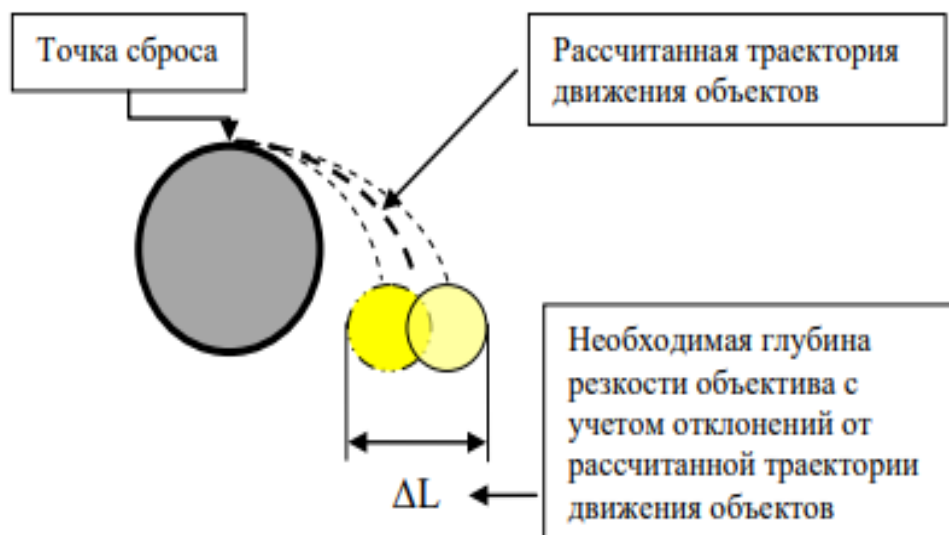


Рисунок 19 – Требование к глубине резкости объектива с учетом отклонений

Далее необходимо найти угол между осью объектива и направлением на сортируемый объект. Для расчета воспользуемся формулой 13.

$$\beta = \arctg \left( \frac{\left( \frac{C_x}{2} \right) - d_{min}}{h} \right) \quad (13)$$

где  $\beta$  – угол между осью объектива и направлением на сортируемый объект;

$C_x$  – ширина скатного лотка, мм;

$d_{min}$  – минимальный размер анализируемого объекта, мм.

Далее следует рассчитать силу света одного источника. Для этого воспользуемся формулой 14.

$$I = \frac{E_{min} \cdot 2 \cdot (1 + \Gamma)^2 \cdot (x_1)^2 \cdot t_{\varepsilon}}{\tau_{x1} \cdot \tau_0 \cdot p_{min} \cdot k_{\beta}(x_{kmax}) \cdot \cos^4(\omega) \cdot \cos(\alpha) \cdot \left( \frac{1}{F_x} \right)^2} \quad (14)$$

где  $I$  – сила света источника, кд;

$p_{min}$  – коэффициент отражения магнетита, выбранный в качестве одного из материалов.

Размер источника излучения должно быть сопоставим с размерами зоны анализа. Яркость источника излучения находится по формуле 15.

$$B = \frac{I}{S_{ист} \cdot \cos(\psi)} \quad (15)$$

где  $B$  – яркость источника излучения;

$S_{ист}$  – площадь излучения, мм<sup>2</sup>;

$I$  – сила света источника, кд;

$\psi$  – угол освещения.

На основании выше перечисленного, предложена математическая модель для расчета основных конструктивных показателей фотосепаратора для сыпучих материалов (рисунок 20).

Данная модель предназначена для расчета конструктивных особенностей фотосепаратора для сыпучего материала, который имеет различные размерные показатели. Она способна рассчитать основные узлы для сепарации материала до 30 мм.

Эффективность процесса фотосепарирования зависит от однородности материала, который поступает на сортировку. В нашем случае материал неоднороден, по фракционному составу имеет большую разность. А данная модель способна подобрать основные узлы конструкции фотосепаратора, которые обеспечат стабильную и качественную сортировку неоднородного материала.



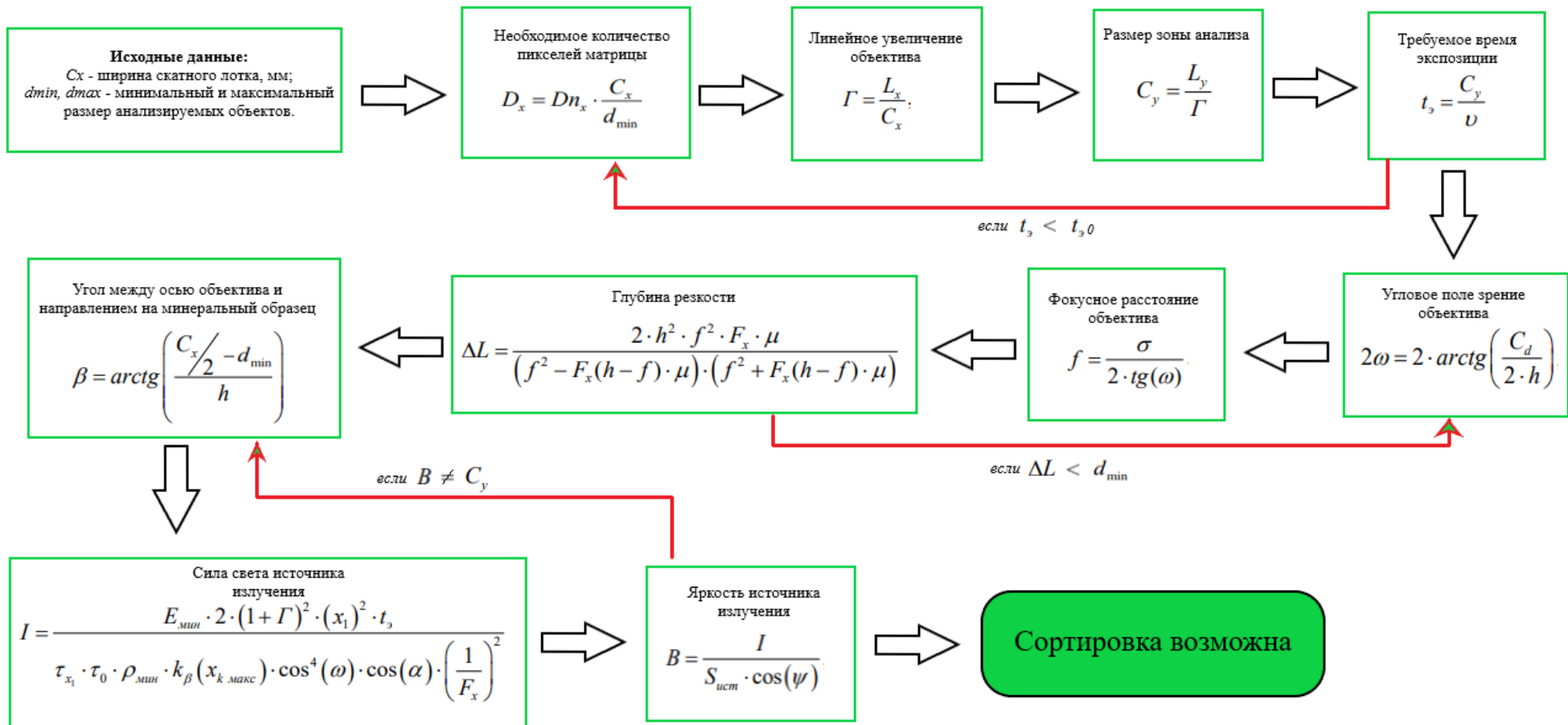


Рисунок 20 – Математическая модель для конструктивных расчетов фотосепаратора

Суть предлагаемой модели заключается в следующем: имеется минимальный и максимальный размер анализируемых объектов. Задается, ширина скатного лотка.

Рассчитывается требуемое количество пикселей матрицы. В том случае, если по рассчитанным значениям не удалось сделать выбор камеры с необходимыми характеристиками, осуществляется возврат к этапу корректировки исходных данных.

Если камера выбрана, по ее характеристикам выполняется расчет линейного увеличения объектива, размер зоны анализа и требуемое время экспозиции. Если данная камера не способна обеспечить минимальное значение экспозиции, осуществляется возврат на стадию выбора камеры.

Далее рассчитываются угловое поле зрения объектива, фокусное расстояние объектива, выбирается значение диафрагменного числа из доступных для выбранного объектива и рассчитывается глубина резкости. В том случае, если при выбранном расстоянии от объектива до объекта глубина резкости меньше минимального размера анализируемого объекта, осуществляется возврат к корректировке расстояния до объекта или на более ранние стадии.

После этого рассчитывается угол между осью объектива и направлением на анализируемый образец, выбирается источник излучения. Рассчитываются показатели силы света источника излучения и его яркость. Если яркость несопоставима с размером зоны анализа следует выбрать другой источник излучения.

Если все условия соблюдены выбранное конструктивное обеспечение способно осуществить сортировку заданных образцов.

Проверка адекватности предложенной математической модели

На основании предложенной модели расчета, выбраны следующие основные параметры системы подачи:

- ширина скатного лотка,  $C_x = 300$  мм;
- размер анализируемых объектов:  $d$  – от 1 до 15 мм.

Также на основании математической модели для расчета количества

пикселей матрицы было выбран предел в 30 пикселей ( $Dn_x$ ) на минимальный размер объекта 1 мм ( $d_{min}$ ). Далее по формуле (3) находится минимально необходимое количество пикселей матрицы» [8].

$$D_x = 30 \cdot \frac{300}{1} = 9000 \text{ пикселей}$$

В качестве матричного программного обеспечения была выбрана камера Basler Sprint spl2048-39кc со следующими характеристиками:

- размер пикселя:  $\mu = 0,01$  мм;
- размер матрицы:  $L_x = 20,48$  мм,  $L_y = 0,08$  мм;
- количество пикселей:  $D_x = 9000$ ,  $D_y = 20$ ;
- минимальное время экспозиции:  $t_{\theta 0} = 26$  мкс.

«Особенностью данного программного обеспечения является то, что в режиме цветной съемки происходит программное объединение сигнала с четырех соседних пикселей матрицы в одну точку на изображении, соответственно, разрешение становится равным 1024x1 [12].

Требуемое линейное увеличение объектива находится по формуле 4:

$$\Gamma = \frac{20,48}{300} = 0,068$$

Размер зоны анализа  $C_y$  вдоль вектора движения минеральных образцов рассчитывается по формуле 5:

$$C_y = \frac{0,08}{0,068} = 1,176[\text{мм}]$$

Тогда из формулы 6 можно найти требуемое время экспозиции:

$$t_{\theta} = \frac{1,176 \cdot 10^{-3}}{1,5} = 784 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Таким образом, выбранная модель удовлетворяет условию минимальной экспозиции и, соответственно, может быть использована для дальнейших расчетов. Пороговая освещенность матрицы при  $t_s = 784$  мкс:  $E_{min} \approx 0,8$  лк [40].

Далее согласно математической модели выбрано расстояние между объектом анализа и центром объектива, равное 370 мм.

Для нахождения углового поля зрения объектива следует определить диагональ зоны анализа, которая будет равна (формула 7):

$$Cd = \sqrt{300^2 + 1,176^2} = 300 \text{ мм}$$

Угловое поле зрения объектива находится по формуле 8 и составляет:

$$2\omega = 2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{300}{2 \cdot 370} = 44,07^\circ$$

Подставляя это значение в формулу 9 и выражая из него фокусное расстояние, получаем:

$$f = \frac{20,48}{2 \operatorname{tg}(22,07^\circ)} = 22,25 \text{ мм}$$

По полученным данным был выбран объектив Kowa LM50XC со следующими параметрами:

- фокусное расстояние  $f = 50$  мм;
- угловое поле зрения  $2\omega = 25^\circ$ ;
- интегральный коэффициент пропускания  $\tau_0 = 0,92$ ;
- диаметр диафрагмы (диафрагменное число)  $D_{ex} (F_x)$  – от 2,8 до 25 мм (от 2 до 22);

- коэффициент виньетирования на краю поля зрения  $k_\beta = 0,57$  [36].

Диаметр кружка нерезкости  $w$  соответствует минимальному размеру пикселя матрицы программного обеспечения. Так как при цветной съемке происходит программное объединение четырех соседних пикселей, размер сформированного элемента будет равен 20 мкм [14].

«Следующим шагом является выбор диафрагменного числа. Чем оно больше, тем меньше светосила объектива и, вместе с тем, больше глубина резкости, которая имеет значение по причине возможного отклонения реальных траекторий движения минеральных образцов от расчетной» [13].

Было выбрано значение  $F_x = 2$ .

После этого необходимо воспользоваться формулами 10 и 11:

$$L_{\text{пер}} = \frac{370 \cdot 50^2}{50^2 + 2(370 - 50) \cdot 0,02} = 368,1 \text{ мм}$$
$$L_{\text{зад}} = \frac{370 \cdot 50^2}{50^2 - 2(370 - 50) \cdot 0,02} = 371,9 \text{ мм}$$

И для нахождения глубины резкости  $\Delta L$  подставить полученные значения в формулу 12 и получим:

$$\Delta L = 371,9 - 368,1 = 3,8 \text{ мм}$$

Глубина резкости получилась больше минимальной крупности анализируемого объекта.

Схема предполагает использование двух источников излучения, расположенных симметрично относительно визирной оси блока регистрации.

Найдем угол  $\beta$ , учитывая что  $C_y \sim d_{\text{min}}$ , согласно формуле 13.

$$\beta = \arctg \left( \frac{\left( \frac{0,14}{2} \right)}{370} \right) = 0,01$$

«Далее, для расчета силы света одного источника, необходимо воспользоваться формулой 14:

$$I = \frac{0,8 \cdot 2 \cdot (1 + 0,14)^2 \cdot (753,3)^2}{1 \cdot 0,92 \cdot 0,2 \cdot 0,57 \cdot \cos(12,5^\circ) \cdot \cos(0,01^\circ) \cdot \left(\frac{1}{5}\right)^2} = 153,7$$

где  $\rho_0 = 0,2$  коэффициент отражения магнетита, выбранный в качестве одного из минералов с низким значением данного параметра» [12].

Размер источника излучения должен быть сопоставим с размерами зоны анализа. Тогда в соответствии с формулой 15 его яркость будет равна:

$$B = \frac{153,7}{0,15 \cdot 0,14 \cdot 10^{-3} \cos(15,1^\circ)} = 7,6 \cdot 10^6 \text{ кд/м}^2$$

Результаты расчета представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты расчета предложенной математической модели

Параметр	Обозначение	Показатель
1	2	3
Ширина скатного лотка	Cx	300 мм
Скорость движения	v	от 0,5 до 1,5 м/с
Размер анализируемых объектов	d	от 1 до 15 мм
Минимально необходимое количество пикселей матрицы	Dx	900
Линейное увеличение объектива	Г	0,14
Размер зоны анализа	Cy	0,14 мм
Требуемое время экспозиции	tэ	93 мкс
Пороговая освещенность матрицы	Emin	0,8 лк
Диагональ зоны анализа	Cd	150 мм
Угловое поле зрения объектива	2ω	44,7°
Глубина резкости	ΔL	3,8 мм
Силы света одного источника	I	153,7 кд
Яркость	B	7,6·10 <sup>6</sup>

Результаты расчета дают представление о минимальных конструктивных характеристиках фотосепаратора для сортировки ПЭТФ-флекс.

## **2.4 Проведение конструктивных расчетов фотосепаратора**

Фракцию меньше 5 см фотосепарируют в лотковых сепараторах. ПЭТФ-флекс ООО «ЭкоРесурсПоволжье» по фракционному составу не превышает 15мм, из этого следует что данный материал нужно фотосепарировать на лотковом фотосепараторе.

ПЭТФ-флекс ООО «ЭкоРесурсПоволжье» имеет засорность менее 1%. На основании этого показателя рассчитаем технических характеристики фотосепаратора для сортировки ПЭТФ-флекс в два прогона, т.к. материал имеет разность в фракционном составе (от 1 до 15 мм) и гарантированный показатель при таком фракционном составе составляет 0,5% в один прогон.

В таблице 15 представлена схема конструктивных расчетов фотосепаратора.

Таблица 15 – Схема конструктивных расчетов фотосепаратора для необходимой производительности

Схема конструктивных расчетов фотосепаратора для необходимой производительности					
Обозначение	СИ	Наименование	Обозначение	СИ	Наименование
X1	кг	производительность фотосепаратора первого прогона	X2	кг	производительность фотосепаратора второго прогона
P	кг	производительность одного лотка	G1	кг	выход годного продукта после выхода через фотосепаратор первого прогона
N	шт	количество лотков первого прогона	P	кг	производительность одного лотка
G1	кг	выход годного продукта после первого прогона	N2	шт	количество лотков второго прогона
R1	кг	выход удаленных примесей после первого прогона	G2	кг	выход годного продукта после выхода через фотосепаратор на втором прогоне
R1=R2 по количеству, кг			R2	кг	выход удаленных примесей после второго прогона
$X1=P \cdot N=G1+R1$			$X2=G1=P \cdot N2-R1=G2+R2$		

Необходимая производительность для линии по производству ПЭТФ-флекса ООО «ЭкоРесурсПоволжье» – 450 кг/ч.

На основании схемы проведем конструктивные расчеты фотосепаратора и его производительности.

Исходные данные:

- фракция (d) – от 1 до 15 мм;
- производительность на один лоток – 400 кг/ч, при сорности материала до 3%;
- 2 камеры на один лоток (RGB+NIR);
- 64 клапана на один лоток;
- максимальный расход воздуха на один лоток – 800 литров;
- засорность материала – 1%;



- количество прогонов – 2;
- $R1=R2$  по количеству до второго прогона.

С помощью формулы 16 произведем конструктивный расчет необходимой производительности фотосепаратора:

$$X1 = P \cdot N = G1 + R1 \quad (16)$$

где  $X1$  – производительность фотосепаратора одного прогона, кг;

$P$  – производительность одного лотка, кг;

$N$  – количество лотков первого прогона, шт;

$G1$  – выход годного продукта после первого прогона, кг (99,5%);

$R1$  – выход удаленных примесей после первого прогона, кг (0,5%).

Подставим в формулу 16 известные данные и получим:

$$800 = 400 \cdot 2 = 796 + 4$$

Из расчета данной модели получаем:

- производительность фотосепаратора первого прогона – 800 кг;
- количество лотков первого прогона для обеспечения данной производительности – 2 шт;
- выход годного продукта после первого прогона – 796 кг;
- выход удаленных примесей после первого прогона – 4 кг.

Производительность фотосепаратора второго прогона рассчитывается по формуле 17:

$$X2 = G1 = P \cdot N2 - R1 = G2 + R2 \quad (17)$$

где  $X2$  – производительность фотосепаратора второго прогона, кг;

$G1$  – выход годного продукта после выхода через фотосепаратор первого прогона, кг;

P – производительность одного лотка, шт;

N2 – количество лотков второго прогона, шт;

R1 – выход удаленных примесей после первого прогона, кг;

G2 – выход годного продукта после выхода через фотосепаратор на втором прогоне, кг;

R2 – выход удаленных примесей после второго прогона, кг.

Подставим в формулу 17 известные данные и получим:

$$796 = 796 = 400 \cdot 2 - 4 = 792 + 4$$

Из расчета данной схемы получаем:

- производительность фотосепаратора первого прогона – 796 кг;

- выход годного продукта после выхода через фотосепаратор на втором прогоне – 792 кг.

На основании полученных расчетов составим требования к комплектации лоткового фотосепаратора.

Требуемая комплектация фотосепаратора представлена в таблице 16.

Таблица 16 - Требуемая комплектация фотосепаратора

Показатель	Минимальное значение
Производительность (т/ч)	800 кг/ч
Количество камер (шт.)	8
Количество лотков (шт.)	4
Количество клапанов (шт.)	256

На основании расчета можно сделать вывод, что разработанная схема является адекватной и способна обеспечить правильный конструктивный расчет фотосепаратора.

## 2.5 Предложение технологического решения

На рисунке 21 представлен выбранный отечественный фотосепаратор для модернизации линии по переработки ПЭТ ООО «ЭкоРесурсПоволжье».

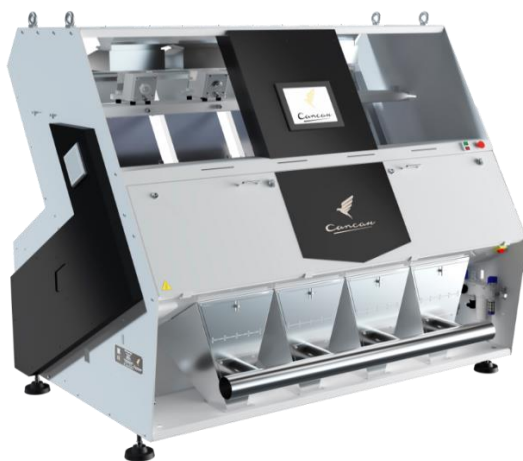


Рисунок 21 – Фотосепаратор «Сапсан S 216 RGB»

Технические характеристики предложенного для внедрения фотосепаратора «Сапсан S 216 RGB» представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Технические характеристики фотосепаратора «Сапсан S 216 RGB»

Модель	S 216 RGB
Производительность (т/ч)	1,6
Количество камер (шт.)	8
Количество лотков (шт.)	4
Количество клапанов (шт.)	256
Напряжение питания, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
ГОСТ ИЕС защита от поражения электрическим током	I
Давление воздуха, (Мпа)	0,2-0,8
Максимальный расход воздуха, (л/мин)	3200
Габаритные размеры ДхШхВ (мм)	1520x1840x1900
Вес (кг)	950

На рисунке 22 представлен вид фотосепаратора «Сапсан S 216 RGB» в зависимости от направления проецирования.

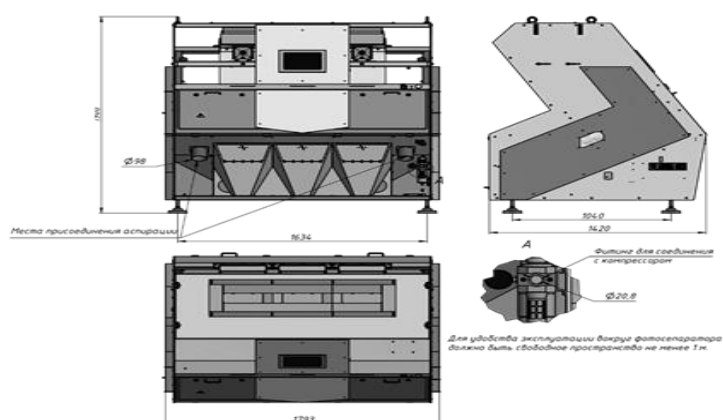


Рисунок 22 – Вид фотосепаратора «Сапсан S 216 RGB» в проекции

Требования к входящему материалу для качественной сортировки ПЭТФ-флекс:

- материал — полиэтилентерефталат (ПЭТФ-флекс);
- форма материала — дробленые ПЭТ-бутылки;
- фракция — до 15 мм;

внешний вид хлопьев: прозрачный микс (бесцветные, светло-голубые, коричневые, зеленые);

остаточная влажность, не более 1,5%.

Гранулометрический состав:

мм <math>d < 12</math> мм, не менее 94%;

мм, не более 4%;

мм, не более 1%;

5 мм, не более 0.5%.

- не допускается попадание в сепаратор инородных материалов способных вызвать повреждение основных органов сепаратора, такие как камни, металлические предметы размером выше 10 мм и др.

Требования оптимальных показателей для качественной сортировки ПЭТФ-флекс представлено в таблице 18.

Таблица 18 - Требования оптимальных показателей сырья для качественной сортировки ПЭТФ-флекс

Наименование входящей продукции в оптический сепаратор	RPET- хлопья (RPET-flakes)	
Внешний вид хлопьев, цвет	Прозрачные микс Цветной микс	Бесцветные, светло-голубые, прозрачные
Остаточная влажность, %	Не более 1.5	
Гранулометрический состав		
- 2 < d < 12 мм,%	Не менее 94	
- 12.5 < d < 15 мм,%	Не более 4	
- 0.5 < d < 2 мм,%	Не более 1.0	
- < 0.5 мм,%	Не более 0.5	
Содержание полиолефинов (ПЭ,ПП), ppm	Не более 1500	
Содержание ПВХ, ppm	Не более 1500	
Содержание металлов, ppm	Не более 500	
Прочие неорганические примеси бумаги, дерева, ppm	Не более 1500	
Содержание пожелтевших частиц, ppm	Не более 5000	
Цветные хлопья (другие цвета), %	Не более 1	Не более 1

Гарантированные показатели ПЭТФ-флекс после фотосепарирования с учетом соблюдения входного контроля ПЭТФ-флекс представлено в таблице 19.

Таблица 19 - Гарантированные показатели ПЭТФ-флекс после фотосепарирования

Наименование выходящей продукции из оптического сепаратора за два прогона	RPET- хлопья (RPET-flakes)	
Внешний вид хлопьев, цвет	Прозрачные микс Цветной микс	Бесцветные, светло-голубые, прозрачные
Содержание полиолефинов (ПЭ,ПП), ppm	Не более 130	
Содержание ПВХ, ppm	Не более 130	
Содержание металлов, ppm	Не более 25	
Прочие неорганические примеси бумаги, дерева, ppm	Не более 300	
Содержание пожелтевших частиц ppm	Не более 5000	
Цветные хлопья (другие цвета) ppm	Не более 300	Не более 300

Предлагаемое технологическое решение представлено на рисунке 23.

№	Наименование
1	Загрузочная площадка
2	Подающий транспортер №1
3	Отделитель этикетки
4	Подающий транспортер №2
5	Дробилка №1
6	Шнек №1
7	Горизонтальная мойка №1
8	Флотационная ванна №1
9	Шнек №2
10	Горячие мойки
11	Шнек №3
12	Горизонтальная мойка №2
13	Флотационная ванна №2
14	Шнек №4
15	Дробилка №2
16	Шнек №5
17	Флотационная ванна №3
18	Шнек №6
19	Флотационная ванна №4
20	Шнек №7
21	Центрифуга
22	Пневмотранспорт
23	Сушка
24	Пневмотранспорт
25	Выделитель этикетки
26	Пневмотранспорт
27	Фотосепаратор
28	Тара для отсортированных примесей
29	Пневмотранспорт
30	Накопительный бункер
31, 32, 33, 34	Переливные ёмкости

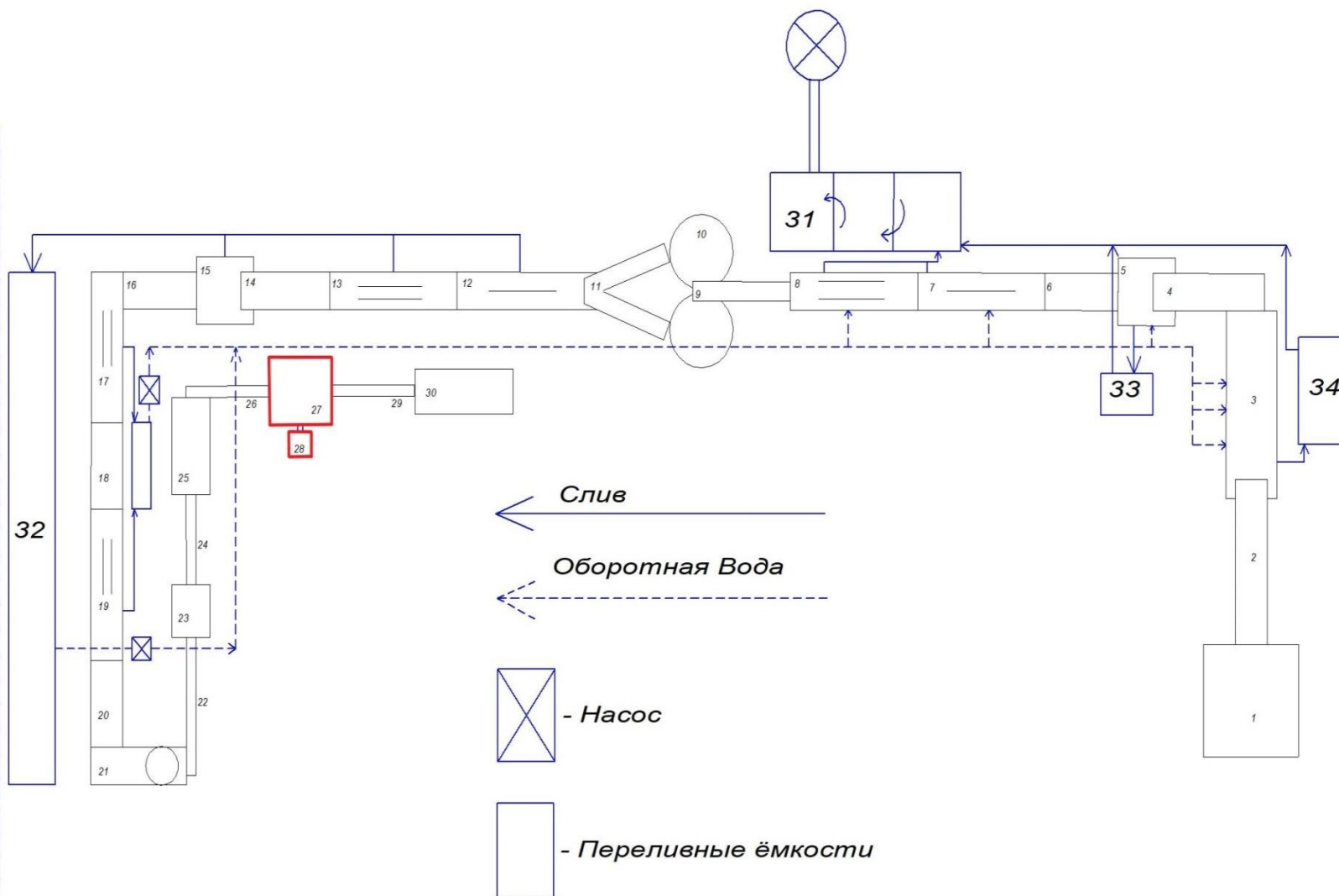


Рисунок 23 – Предлагаемое технологическое решение

По теоретическим показателям данный сепаратор способен обеспечить необходимое качество ПЭТФ-флекс на выходе. Однако для достоверности обеспечения качества сортировки ПЭТФ-флекс представителям ООО «ЭкоРесурсПоволжье» необходимо совместно с производителем провести испытания сортировки со своим материалом.

Для оптимизации условий стабильного получения качественного сырья (ПЭТФ-флекс) на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье» предлагается внедрение в конец технологической линии фотосепаратора «Сапсан S 216 RGB».

Оборудование предлагается монтировать между «выделителем этикетки» и «накопительным бункером». Так как после всех технологических стадий переработки на линии материал (ПЭТФ-флекс) готов к фотосепарации. Оборудование работает на RGB-диапазон 400-700 nm. Монохром - анализ продукта в одном цвете, позволяет решать самые простые задачи. Исходя из определения монохроматического излучения, изображение, содержащее свет одного цвета (длины волны), воспринимается, как один оттенок (в отличие от цветного изображения, содержащего различные цвета). RGB - трехцветовой анализ продукта тремя параллельными линейными сенсорами. Разрешение одного сенсора: 5400 пикселей. Общее разрешение: 16 тысяч пикселей. Частота сканирования: 10-30 тысяч кадров в секунду. Рекомендуемый режим для четкости изображения 10 тыс. кадров в секунду. Распознавание более 130 миллионов оттенков.

## **2.6 Расчет материального баланса предлагаемого решения**

Произведем расчет материального баланса переработки ПЭТ отходов во флексу для дальнейшего ее использования как сырья для химических предприятий.

«Расчет производится для того, чтобы получить информацию по объемам расхода поступающего на переработку материала и объемам получения конечного продукта.

Как известно из закона сохранения материи, масса веществ, поступающих в какую-либо систему, равна массе веществ, покидающих эту систему, независимо от того, какие физические или химические изменения они претерпевают» [45].

«При промывке и сушке отходов из полиэтилентерефталата происходит удаление грязи, клея, этикеток и мелкой фракции ПЭТ в пределах 27%, поэтому необходимо принять первоначальную массу поступающего на переработку материала за 100%, а получаемую флекс на выходе – 73%» [36].

Исходные данные по параметрам переработки ПЭТ отходов во флексу:

- масса ПЭТ отходов  $G_{\text{ПЭТ-отходы}} = 1000$  кг (100%);
- влажность материала  $\varphi = 10$  кг (1%);
- масса ПЭТФ-флексы = 730,1 кг (73,01%);
- масса загрязнителей (клей, грязь) = 57 кг (5,7%);
- масса мелкой фракции от 0 до 3 мм = 30 кг (3%);
- масса ПЭТ-стенда = 20 кг (2%);
- масса пробкосодержащей смеси = 150 (15%).

Уравнение материального баланса имеет вид (формула 18):

$$G_{\text{ПЭТ-отходы}} = G_{\text{ПЭТФ}} + G_{\text{грязь.клей}} + G_{\text{ПСС}} + G_{\text{мелкая фракция}} + G_{\text{ПЭТ-стенд}} + G_{\text{влаги}} + G_{\text{п.п.ф}} \quad (18)$$

где  $G_{\text{ПЭТ-отходы}}$  – масса поступивших на переработку ПЭТ отходов;

$G_{\text{ПЭТФ}}$  – масса получаемой ПЭТФ-флексы;

$G_{\text{грязь.клей}}$  – масса загрязнителей (клей, грязь);

$G_{\text{ПСС}}$  – масса пробкосодержащей смеси;

$G_{\text{мелкая фракция}}$  – масса мелкой фракции, идущей на агломерат;

$G_{\text{ПЭТ-стенд}}$  – масса получаемой ПЭТ флексы;

$G_{\text{влаги}}$  – масса влаги в готовой продукции;

$G_{\text{п.п.ф}}$  – масса примесей, отсортированная фотосепаратором.

Массу получаемой ПЭТФ-флексы находим по формуле 19:



$$G_{\text{ПЭТФ}} = G_{\text{ПЭТ-отходы}} - (G_{\text{грязь.клей}} + G_{\text{ПСС}} + G_{\text{мелкая фракция}} + G_{\text{ПЭТ-стенд}} + G_{\text{влага}} + G_{\text{п.п.ф}}) \quad (19)$$

где  $G_{\text{ПЭТ-отходы}}$  – масса поступивших на переработку ПЭТ отходов;

$G_{\text{ПЭТФ}}$  – масса получаемой ПЭТФ-флекссы;

$G_{\text{грязь.клей}}$  – масса загрязнителей (клей, грязь);

$G_{\text{ПСС}}$  – масса пробкосодержащей смеси;

$G_{\text{мелкая фракция}}$  – масса мелкой фракции, идущей на агломерат;

$G_{\text{ПЭТ-стенд}}$  – масса получаемой ПЭТ флекссы;

$G_{\text{влага}}$  – масса влаги в готовой продукции;

$G_{\text{п.п.ф}}$  – масса примесей, отсортированная фотосепаратором.

Согласно исходным данным производства ПЭТФ-флекссы найдем массу примесей, отсортированных фотосепарацией (формула 20).

$$G_{\text{п.п.ф.}} = G_{\text{ПЭТ-отходы}} - G_{\text{ПЭТФ}} + G_{\text{грязь.клей}} + G_{\text{ПСС}} + G_{\text{мелкая фракция}} + G_{\text{ПЭТ-стенд}} + G_{\text{влага}} \quad (20)$$

Получилось:

$$G_{\text{п.п.ф.}} = 1000 - (730,1 + 57 + 150 + 30 + 20 + 10) = 2,9 \text{ кг}(0,29\%)$$

На рисунке 24 показана схема материальных потоков при переработке ПЭТ отходов во флексу.

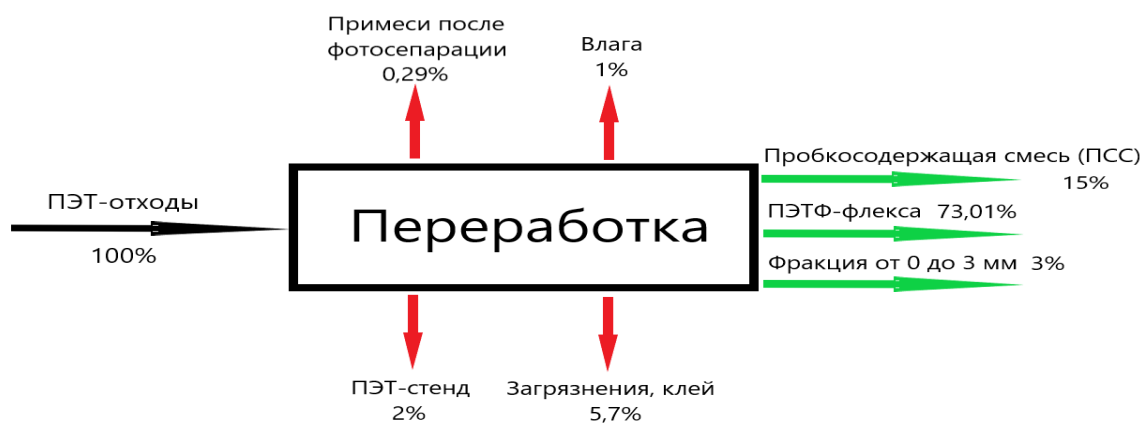


Рисунок 24 – Материальные потоки процесса переработки ПЭТ отходов в ПЭТФ-флекс

На основании проведенных расчет составим материальный баланс (таблица 20).

Таблица 20 – Материальный баланс переработки ПЭТ

Приход			Расход		
Компонент	Масса, кг	Содержание, %	Компонент	Масса, кг	Содержание, %
ПЭТ отходы	1000	100	ПЭТФ-флекс	730,1	73,01
-	-	-	ПСС	150	15
-	-	-	Фракция от 0 до 3 мм	30	3
-	-	-	ПЭТ-стенд	20	2
-	-	-	Грязь, клей	57	5,7
-	-	-	Влага	10	1
-	-	-	Примеси после фотосепарации	2,9	0,29
Итого:	1000	100	Итого:	1000	100

Результаты расчета показали, что отсортированных примесей составит примерно 0,29% от общей массы сырья.

## 2.7 Технико-экономическое обоснование предлагаемого решения

Для определения целесообразности усовершенствования технологического процесса проведем расчет технико-экономического обоснования предлагаемого улучшения [29].

Исходные данные:

- стоимость фотосепаратора Сапсан S 216 RGB - 4 095 060 руб.;
- габариты фотосепаратора (ДхШхВ) – 1520мм x 1840мм x 1900мм;
- вес – 950 кг;
- производительность - 1 500 кг/час;
- процент удаления примесей - до 99,99%;
- стоимость пусконаладочных работ - 200 000 руб.;
- средняя цена ПЭТ-бутылок с НДС – 50 рублей за 1 кг;
- средняя цена ПЭТФ-флекс с НДС до внедрения – 90 рублей за 1 кг;
- средняя цена ПЭТФ-флекс с НДС после внедрения – 100 рублей за 1кг;
- заработная плата обслуживающего персонала – 204 000 руб.;
- отчисление заработной платы на социальное страхование – 51 000 руб.;
- расходы на электроэнергию – 54 475 руб.;
- амортизационные расходы – 64 252 руб.;
- накладные расходы – 122 671 руб.

Для определения капитальных затрат на внедрения нового оборудования составим формулу 21.

$$G_{з.н.п.} = G_{п.о.} + G_{п.р.} \quad (21)$$

где  $G_{з.н.п.}$  – затраты на покупку оборудования;

$G_{п.о.}$  – покупка оборудования;

$G_{п.р.}$  – пусконаладочные работы.

Подставим в формулу 21 исходные данные и получим:

$$G_{з.н.п.} = 4\,095\,060 + 200\,000 = 4\,295\,060 \text{ рублей}$$

Для определения ежемесячных эксплуатационных расходов составим формулу 22.

$$G_{е.э.р.} = G_{з.п.} + G_{с.с.} + G_{р.э.} + G_{а.о.} + G_{н.р.} \quad (22)$$

где  $G_{е.э.р.}$  – ежемесячные эксплуатационные затраты;

$G_{з.п.}$  – заработная плата операторам и наладчикам;

$G_{с.с.}$  – отчисления от заработной платы на социальное страхование;

$G_{р.э.}$  – расходы на электроэнергию;

$G_{а.о.}$  – амортизационные отчисления;

$G_{н.р.}$  – накладные расходы.

Подставим в формулу 22 исходные данные и получим:

$$G_{е.э.р.} = 204\,000 + 51\,000 + 54\,475 + 64\,252 + 122\,671 = 496\,398 \text{ рублей}$$

Экономического эффекта предлагаемого решения найдем по формуле 23.

$$G_{э.э.п.р.} = (G_{ц.п.п.} - G_{ц.п.д.}) \cdot G_{к.п.} - G_{к.э.} \quad (23)$$

где  $G_{э.э.п.р.}$  – экономический эффект в месяц, руб.;

$G_{ц.п.п.}$  – цена продукции после внедрения, руб.;

$G_{ц.п.д.}$  – цена продукции до внедрения, руб.;

$G_{к.п.}$  – количество выпускаемой продукции в месяц, кг;

$G_{е.э.р.}$  – ежемесячные эксплуатационные затраты, руб.

Подставим в формулу 23 исходные данные и получим:

$$G_{э.э.п.р.} = (100 - 90) \cdot 120\,000 - 496\,398 = 703\,602 \text{ рубля}$$

Технико-экономическое обоснование предлагаемого решения представлено в таблице 21.

Таблица 21 – Экономический эффект предлагаемого решения

Фотосепаратор Сапсан S 216 RGB		
Статьи затрат	Ед.изм.	Сумма, значение в руб.
Исходные данные:		
Оборудование		
Фотосепаратор Сапсан S 216 RGB	шт.	4 095 060,00
Габариты (ДхШхВ)	мм.	1520x1840x1900
Вес	кг	950,00
Производительность	кг/час	1 500,00
% удаления примесей	%	до 99,99%
Стоимость пусконаладочных работ	руб	200 000
Средняя цена ПЭТ сырья с НДС	руб./кг	50,00
Средняя цена ПЭТФ-флекс с НДС до внедрения	руб./кг	90,00
Средняя цены ПЭТФ-флекс с НДС после внедрения	руб./кг	100,00
Эксплуатационные расходы:		
Зарботная плата обслуживающего персонала	руб	496 398,00
Отчисления от зарботной платы на социальное страхование		
Расход электроэнергии		
Амортизационные отчисления		
Накладные расходы		
Всего расходов месяц	руб	496 398,00
Количество сырья	кг	164 000
ПЭТФ-флекс	кг	120 000
	руб	12 000 000,00
Итого экономический эффект в месяц		703 602,00
Срок окупаемости	мес	6,10

Проведенный расчет показывает, что несмотря на наличие дополнительных затрат на приобретение фотосепаратора, будет достигнут положительный экономический эффект в размере 1 200 000 рублей, а также повысится качество очистки ПЭТФ-флекса. Срок окупаемости предлагаемого внедрения 7 месяцев.

Выводы по главе:

Проведенный анализ существующей технологии переработки ПЭТ отходов на базе ООО «ЭкоРесурсПоволжье» позволил выявить необходимость в модернизации технологического процесса за счет внедрения нового оборудования – фотосепаратор. Его использование в конце технологической линии механической переработки ПЭТ-отходов позволит добиться получения «чистой» ПЭТ флексы, которая в дальнейшем может быть использована в качестве сырья для химических предприятий.

Изучен вопрос применения получаемой ПЭТ флексы в качестве сырья для химических предприятий. Экспериментальные исследования подтверждают возможность использования ПЭТ флексы как сырья, так как характеристическая вязкость соответствует требованиям.

Проведенные расчеты экономической эффективности установки фотосепаратора показывают, что данное внедрение позволит получать прямую выгоду для предприятия при получении чистой ПЭТ флексы в количестве 703 602 руб., срок окупаемости составит 7 месяцев, при этом образовавшееся ПЭТФ-флекса в дальнейшем можно использовать в качестве сырья для химических предприятий.

## Заключение

Анализ свойств полиэтилентерефталата показал, что данный материал устойчив к разложению в естественных условиях, это обуславливает необходимость сбора и переработки ПЭТ-отходов;

На основании анализа можно сделать вывод, что механический способ переработки ПЭТ-отходов является наиболее целесообразным и экологически безопасным. Так как полученный материал может использоваться как сырье в промышленных или химических производствах.

С целью повышения качества продукта на выходе по всему миру для разделения сыпучих материалов сельскохозяйственные и перерабатывающие предприятия в настоящее время используют оптические сортировщики.

Проведенный анализ существующей технологии переработки ПЭТ отходов на базе ООО «ЭкоРесурсПоволжье» позволил выявить необходимость модернизации технологического процесса за счет внедрения нового оборудования – фотосепаратор. Его использование на стадии механической переработки ПЭТ-отходов позволит добиться получения «чистой» ПЭТ флексы, которая в дальнейшем может быть использована в качестве сырья для химических предприятий.

Изучен вопрос применения получаемой ПЭТ флексы в качестве сырья для химических предприятий. Экспериментальные исследования подтверждают возможность использования ПЭТ флексы как сырья, так как характеристическая вязкость соответствует требованиям.

Проведенные расчеты экономической эффективности установки фотосепаратора показывают, что данное внедрение позволит получать прямую выгоду для предприятия при получении чистой ПЭТ флексы в количестве 703 602 руб., срок окупаемости составит 7 месяцев, при этом образовавшееся ПЭТФ-флекса в дальнейшем можно использовать в качестве сырья для химических предприятий.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Виды этикеток // Знай товар. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.znaytovar.ru/s/Vidy\\_etiketok.html](http://www.znaytovar.ru/s/Vidy_etiketok.html) (дата обращения: 22.12.2022).
2. Оптический разделитель PZO VR1000. [Электронный ресурс]. URL: <https://p-z-o.com/periferiya/vozdushnyj-razdelitel-pzo-vr1000> (дата обращения: 15.12.2022).
3. Джайлз Д., Брукс Д., Сабсай О.Ю. Производство упаковки из ПЭТ. - М. – Профессия, 2006г, 368 с.
4. Дорожкин В. П., Лим Л. А. Проект участка вторичной переработки полиэтилентерефталата // Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по естественным наукам. – Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2015. – с. 363–365.
5. Дорожкин В.П., Руденко А.А., Руденко А.А., Ярыгин Д.В. Использование полимерных отходов для создания сырья // Молодой ученый. – 2017. – № 2.1 (136.1). – С. 8-11. [Электронный ресурс]. – URL: <https://moluch.ru/archive/136/39050/> (дата обращения: 20.03.2021).
6. Митрофанов Р.Ю., Чистякова Ю.С., Севедин В.П. / Переработка отходов полиэтилентерефталата, ТБО №6, 2006.
7. Нефтяной материал НСТ // Eco First. [Электронный ресурс]. URL: <http://ecofirst.ru/range.NST.htm> (дата обращения: 02.05.2023).
8. Otto В. Using PET Scrap-Technology and Quality / Rieter PET Symposium. Nanau, Juny 2007.
9. Отделитель примесей. [Электронный ресурс]. URL: <https://polimech.ru/oborudovanie-dlya-pererabotki-plastika/otdeliteli-etiketok/otdelitel-etiketok-moyushhij-s-oem-pet/> (дата обращения: 15.12.2020).
10. Отделитель примесей фирмы Herbold. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.herbold.com/wp-content/uploads/pdf/information/57\\_information-ru.pdf](https://www.herbold.com/wp-content/uploads/pdf/information/57_information-ru.pdf) (дата обращения: 15.12.2020).



11. Патент DE 2091223 Способ разделения смеси полимерных частиц. Автор(ы): Инго Шталь, Аксель Холльштайн, Ульрих Кляйне-Клеффманн, Иринг Гайслер, Ульрих Найтцель. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/209/2091223.html> (дата обращения 16.07.2020).

12. Патент DE 2091224 Способ разделения смеси полимерных частиц. Автор(ы): Инго Шталь, Аксель Холльштайн, Ульрих Кляйне-Клеффманн, Иринг Гайслер, Ульрих Найтцель. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/209/2091224.html> (дата обращения 16.07.2020).

13. Патент DE 2101091 Способ разделения смеси полимерных частиц. Автор(ы): Инго Шталь, Аксель Холльштайн, Ульрих Кляйне-Клеффманн, Иринг Гайслер, Ульрих Найтцель. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/210/2101091.html> (дата обращения 16.07.2020).

14. Патент DE3035649A Электростатический сепн. гранулированных пластиков - трибоэлектрическим зарядом и конн. в свободном падении электростатического сепаратора. Автор(ы): Guenter Dipl Chem Dr Fricke, Иринг Дипл Хим Доктор Гайслер. [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.google.com/patent/DE3035649A1/en?q=DE-PS+3035649+> (дата обращения 16.07.2020).

15. Сартаева Р.С. Современное экологическое знание как новый уровень осмысления реальности // Вестник Казахстанско-Американского Свободного Университета. 2014.

16. Сахно Д.П., Тухватулина Р.Ф., Абржина Л.Л. Утилизация отходов из пластмассы. 2016. Р. 211–216.

17. Сорбент кремнеуглеродный ТШР // ГК РПС Росполимерстрой. [Электронный ресурс]. URL: <http://rpstroj.ru/catalog/sorbenti/sorbent-tshr/> (дата обращения: 23.12.2020).

18. Сорбент ПИРОСОРБ // ЭкоВторРесурс. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pirosorb.ru/product/sorbent-pirosorb> (дата обращения: 23.12.2020).

19. Стрельцов Е.В. Война миров в упаковке / Полимеры-деньги, №1, 2003г. <http://polymers-money.com/journal/posting>

20. Термоусадочные этикетки: материалы и технологии // New Chemistry. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=1750](http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=1750) (дата обращения: 21.12.2020).
21. Технологический процесс «Переработка ПЭТФ бутылок» ООО «ЭкоРесурсПоволжье», утвержденный 25.01.2020. – 15 с.
22. Устройство отдиранья этикетки LR-500 (сухое и моющее исполнение). [Электронный ресурс]. URL: <https://ok-standok.ru/shop/05735-otdiratel-etiketki> (дата обращения: 15.12.2020).
23. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов: учебное пособие / А.С. Клинков, П.С. Беляев, В.К. Скуратов, М.В. Соколов, В.Г. Однолько. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – 100 экз. – 100 с.
24. Утилизация отходов полимеров // Портал ОТХОДЫ.РУ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.waste.ru/modules/section/print.php?itemid=133> (дата обращения: 20.12.2020).
25. Файдюк И.С. Вторичная механическая переработка ПЭТ [Электронный ресурс]. URL: <https://engitime.ru/tehnologi/vtorichnaya-mexanicheskaya-pererabotka-pet.html> (дата обращения: 15.07.2020).
26. Чубыкин А.С. Российский рынок ПЭТ пленок / Флексо Плюс №5, 2004г 8. <http://e-plastic.ru/main/articles/r11/pr02>
27. Чухарева Н. В., Шишмина Л. В. Сравнение сорбционных свойств торфа верхового и низинного типов по отношению к товарной нефти и стабильному газовому конденсату // Химия растительного сырья. – 2012. – № 4. – с. 193–200.
28. Шайерс Дж. Рециклинг пластмасс: наука, технологии, практика. /Пер. с.англ. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. – 640 стр.
29. Brunnschweiler, D., in Polyester: 50 Years of Achievement, Brunnschweiler, D. and Hearle, J. W. S. (Eds), The Textile Institute, Manchester, UK, 1993, pp. 34–37

30. Cakić S.M. et al. Glycolyzed products from PET waste and their application in synthesis of polyurethane dispersions // *Prog. Org. Coatings*. 2012. Vol. 74, № 1. P. 115–124.
31. Clapp L.B. Polyesters and their applications (Bjorksten, Johan; Tovey, Henry; Harker, Betty; and Henning, James) // *J. Chem. Educ.* 1957. Vol. 34, № 1. P. 52.
32. Сорбент для нефтепродуктов «ПРОФСОРБ ЭКО БИО» с биоразложением // *Терра экология*. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.terra-ecology.ru/products/sorbents/absorbent\\_spill-sorb/sorbent\\_profsorb\\_eko\\_bio\\_s\\_biorazlozheniem/#online-buy](http://www.terra-ecology.ru/products/sorbents/absorbent_spill-sorb/sorbent_profsorb_eko_bio_s_biorazlozheniem/#online-buy) (дата обращения: 23.12.2020).
33. Сорбент нефтепродуктов Spill-Sorb с биоразложением // *Терра экология*. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.terra-ecology.ru/products/sorbents/absorbent\\_spill-sorb/absorbent\\_spill-sorb\\_4cf-20011/](http://www.terra-ecology.ru/products/sorbents/absorbent_spill-sorb/absorbent_spill-sorb_4cf-20011/) (дата обращения: 23.12.2020).
34. Diani J., Gall K. Finite Strain 3D Thermoviscoelastic Constitutive Model // *Society*. 2006.
35. Evstatiev M., Fakirov S. Microfibrillar reinforcement of polymer blends // *Polymer (Guildf)*. 1992. Vol. 33, № 4. P. 877–880.
36. Fakirov S. et al. Contribution of coalescence to microfibril formation in polymer blends during cold drawing // *J. Macromol. Sci. Part B Phys.* 2007. Vol. 46 B, № 1. P. 183–194.
37. Ikladious N.E. et al. Alkyd resins based on hyperbranched polyesters and PET waste for coating applications // *Prog. Org. Coatings*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 102. P. 217–224.
38. Jayanarayanan K., Thomas S., Joseph K. Morphology, static and dynamic mechanical properties of in situ microfibrillar composites based on polypropylene/poly (ethylene terephthalate) blends // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2008. Vol. 39, № 2. P. 164–175.
39. Kathalewar M. et al. Chemical recycling of PET using neopentyl glycol: Reaction kinetics and preparation of polyurethane coatings // *Prog. Org. Coatings*.

Elsevier B.V., 2013. Vol. 76, № 1. P. 147–156.

40. Kawamura C. et al. Coating resins synthesized from recycled PET // *Prog. Org. Coatings*. 2002. Vol. 45, № 2–3. P. 185–191.

41. Patel M.R., Patel J. V., Sinha V.K. Polymeric precursors from PET waste and their application in polyurethane coatings // *Polym. Degrad. Stab.* 2005. Vol. 90, № 1. P. 111–115.

42. SantosMiranda M.E. et al. I. The role of N-carboxymethylation of chitosan in the thermal stability and dynamic // *Polym Int.* 2006. Vol. 55, № December 2006. P. 961–969.

43. Torlakoğlu A., Güçlü G. Alkyd-amino resins based on waste PET for coating applications // *Waste Manag.* 2009. Vol. 29, № 1. P. 350–354.

44. Whinfield, J. R., *Nature*, 158, 930 (1946); Whinfield, J. R., *Text. Res. J.*, 23, 290 (1953)

45. Xu X. Bin et al. The role of the surface microstructure of the microfibrils in an electrically conductive microfibrillar carbon black/poly(ethylene terephthalate)/polyethylene composite // *Carbon N. Y.* 2005. Vol. 43, № 7. P. 1479–1487.