

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

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

(код и наименование направления подготовки)

«Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов»

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация технологии удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТФ на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье»

Обучающийся

Ю.И. Линд

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Чариков

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

Тольятти 2023

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена оптимизации технологии удаления компонентов этикеток с отходов ПЭТФ.

Выпускная квалификационная работа изложена на 52 страницах, состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной и расчетной частей, включает 19 рисунков, 11 таблиц, 30 источников используемой литературы из них 9 иностранных источников.

Объектом исследования в данной выпускной квалификационной работе является процесс очистки ПЭТФ от компонентов этикетки.

Целью выпускной квалификационной работы является оптимизация процесса очистки ПЭТФ от компонентов этикетки.

Задачи работы: провести теоретический анализ состава ПЭТФ, провести эксперименты по изучению влияния ПАВ на процесс очистки ПЭТФ от компонентов этикеток, исходя из опытов, проведенных в лаборатории, рассчитать материальный и тепловой баланс, а также произвести конструктивный расчёт аппарата.

Abstract

The final qualifying work is devoted to optimizing the technology of removing label components from PET waste.

The final qualifying work is presented on 52 pages, consists of an introduction, a literary review, experimental and computational parts, and includes 19 figures, 11 tables, 30 sources of the literature used, of which 9 are foreign sources.

The object of research in this final qualifying work is the process of cleaning PET from label components.

The purpose of the final qualification work is to optimize the process of cleaning PET from label components.

Tasks of the work: to conduct a theoretical analysis of the composition of PET, to conduct experiments to study the effect of surfactants on the process of cleaning PET from label components, based on experiments conducted in the laboratory, to calculate the material and thermal balance, as well as to make a constructive calculation of the apparatus.

Содержание

Введение.....	6
1 Литературный обзор	8
1.1 Анализ состава отходов ПЭТФ поступающих на переработку	8
1.2 Влияние компонентов этикетки на качество продуктов переработки ПЭТФ.....	13
1.3 Обзор технологии удаления компонентов этикеток из вторичного сырья ПЭТФ.....	15
2 Экспериментальная часть.....	20
2.1 Анализ применяемой технологии отделения этикетки от вторичного ПЭТ сырья на примере ООО «ЭкоРесурсПоволжье»	20
2.2 Экспериментальное обоснование оптимизации технологии.....	24
2.3 Разработка оптимальной технологической схемы очистки ПЭТФ	29
3 Расчетная часть.....	35
3.1 Расчет материального баланса процесса	35
3.2 Тепловой баланс процесса	39
3.3 Расчет конструктивных параметров оборудования.....	42
Заключение	48
Список использованной литературы.....	49

Введение

Впервые полиэтилентерефталат (далее ПЭТ) был синтезирован в США в 1941 году химиками фирмы «DuPoint», которые искали полимеры для производства новых текстильных волокон.

ПЭТ получил широкое распространение в разнообразных областях, на мировом рынке благодаря своим ценным свойствам. Он используется в изготовлении мебели, автомобилей, тканей, волокнистых материалов, одежды и обуви, но наибольшая часть производимого ПЭТ используется в изготовлении различных контейнеров и упаковок.

Из-за возросшей популярности ПЭТ на мировом рынке увеличилось и количество отходов. На данный момент отходы ПЭТ занимают 30% от всех отходов, состоящих из пластика, 80% которых перерабатываются.

«Отходы полиэтилентерефталата имеют код федерального классификационного каталога отходов 43499121725 который введен (настоящая редакция актуальна на 2021 г.) и относится к V классу опасности для окружающей среды (Практически неопасные отходы)» [7].

Вторичная переработка отходов полиэтилентерефталата – это один из наиболее успешных и широко распространенных примеров вторичной переработки полимеров. Поводом для развития и повышения объемов данного вида переработки ПЭТ является его широкое применение, в частности, в производстве тары для напитков. Это делает ПЭТ основным источником сырья для вторичной переработки пластмасс. Относительно постоянный объем поступления и свободная доступность использованных ПЭТ-бутылок после сортировки, а также то, что ПЭТ в общем объеме вторсырья занимает второе место после алюминия, делают его вторичную переработку рентабельной.

Оптимизация процесса удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТ является актуальной проблемой в современном мире.

Увеличение объема производства ПЭТ-бутылок и упаковки приводит к увеличению количества отходов ПЭТ, а наличие этикеток на поверхности ПЭТ-бутылок и упаковки затрудняет процесс их переработки и может приводить к низкому качеству перерабатываемого материала.

Отсутствие оптимизации процесса удаления этикеток может привести к увеличению времени и затрат на переработку отходов ПЭТ, что не только увеличивает экологическую нагрузку на окружающую среду, но и уменьшает экономическую эффективность данного процесса [13].

Оптимизация процесса удаления этикеток позволяет повысить качество переработанного материала, что способствует его повторному использованию в производстве новых изделий и снижает потребность в первичном сырье.

Целью выпускной квалификационной работы является повышение эффективности удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТФ.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести теоретический анализ состава ПЭТФ, поступающих на переработку;
- провести анализ влияния компонентов этикетки на качество продуктов переработки ПЭТФ;
- провести анализ существующей технологии удаления компонентов этикеток из вторичного сырья ПЭТФ;
- экспериментально обосновать предложенную оптимизацию технологии;
- разработать оптимальную технологическую схему;
- провести расчёт материального баланса процесса и конструктивных параметров оборудования.

1 Литературный обзор

1.1 Анализ состава отходов ПЭТФ поступающих на переработку

«В последнее время заметно увеличиваются объемы производства бутылочной ПЭТФ-тары для пищевой промышленности, а также для парфюмерной и химической индустрии. Мировое производство пластмасс возрастает на 5 – 6% ежегодно, именно с эти связана актуальность проблемы утилизации ПЭТФ – тары. Целевое использование этой номенклатуры изделий кратковременно. Увеличение объёма потребления полимерных материалов ведет к накоплению неразлагающегося мусора (более 50 лет), на полигонах, что в итоге приводит к загрязнению воздуха, почвы, грунтовых вод продуктами неполного разложения» [6].

«Полиэтилентерефталат (ПЭТФ, ПЭТ) – является термопластиком, который так же именуется как полиэфир, лавсан и является продуктом поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой (Или ее диметилловым эфиром) – это твердое, бесцветное, прозрачное вещество в аморфном состоянии белое, непрозрачное в кристаллическом состоянии. При нагреве до температуры стеклования переходит в прозрачное состояние и остается в нем при резком охлаждении и быстром проходе через так называемую «зону кристаллизации» [1].

«Исходным сырьем для получения полиэтилентерефталата является диметилтерефталат (ДМТ) или терефталевая кислота (ТФК) и этиленгликоль (ЭГ). Процесс получения ПЭТ включает две стадии: переэтерификацию ДМТ (рисунок 1).

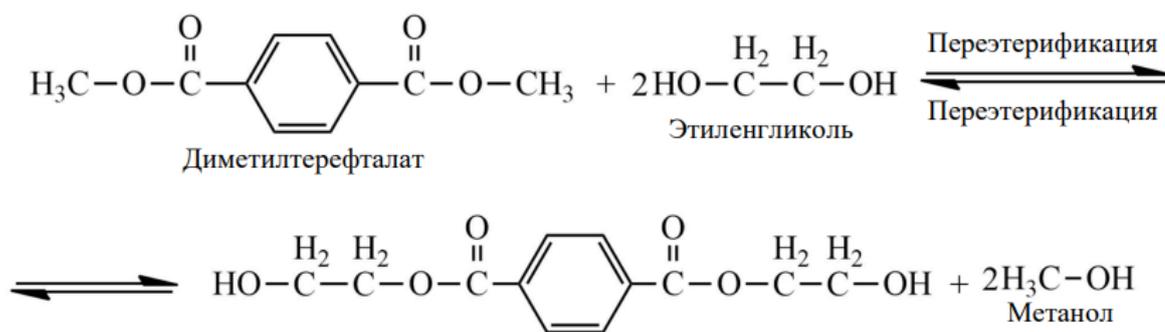


Рисунок 1 – Схема реакции перезэтерификации для получения дигликолевого эфира терефталевой кислоты (ДГТ)

Или этерификацию ТФК с образованием дигликолевого эфира терефталевой кислоты (ДГТ) (рисунок 2).

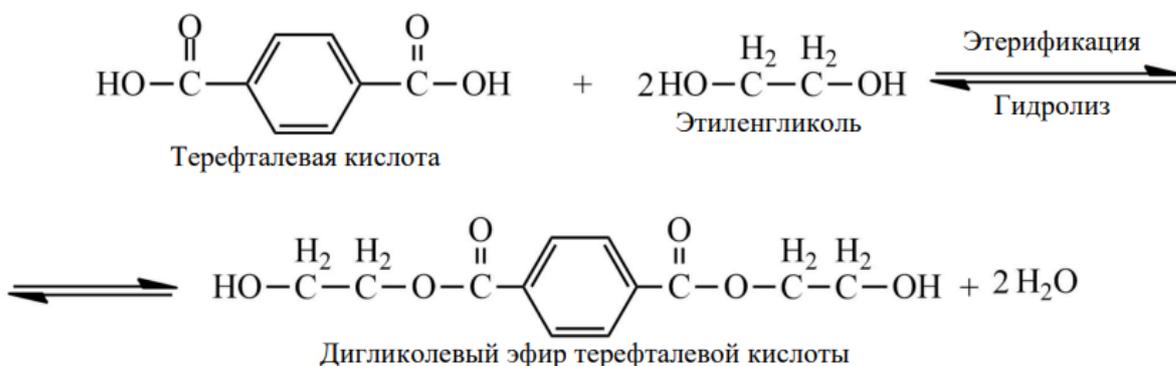


Рисунок 2 – Схема реакции этерификации терефталевой кислоты с образованием дигликолевого эфира терефталевой кислоты

И линейную гомополиконденсацию дигликолевого эфира терефталевой кислоты (рисунок 3)» [9].

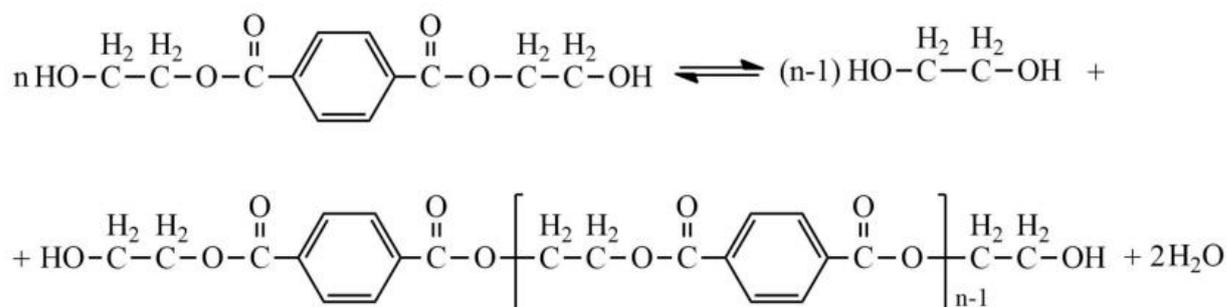


Рисунок 3 – Схема реакции линейной гомополиконденсации дигликолевого эфира терефталевой кислоты

«Зачастую полиэтилентерефталат получают в ходе реакции поликонденсации терефталевой кислоты или её диэтилового эфира с этиленгликолем по периодической или непрерывной схеме в две стадии, которая включает в себя переэтерификацию ДМТ или этерификацию ТФК с образованием дигликолевого эфира терефталевой кислоты и линейную гомополиконденсацию дигликолевого эфира терефталевой кислоты.» [10].

«Синтез ПЭТ идет с выделением этиленгликоля» [2] по схеме, представленной на рисунке 4:

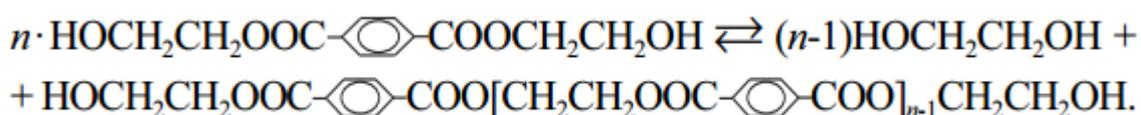


Рисунок 4 – Схема синтеза ПЭТ с выделением этиленгликоля

Структурная формула ПЭТ представлена на рисунке 5. Достигнутая регулярность строения полимерной цепи повышает способность к кристаллизации, которая в значительной степени определяет механические свойства.

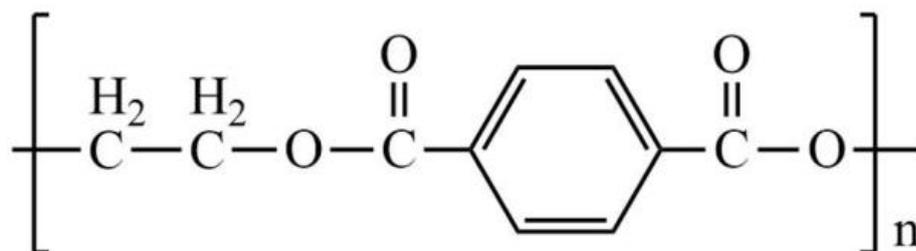


Рисунок 5 – Структурная формула ПЭТ

«Жесткость скелета, повышение температуры стеклования и температуры плавления определяет наличие фениленовой группы в основной цепи. Пэт может существовать в аморфном или кристаллическом состояниях, причем степень кристалличности определяется термической предысторией

материала. Волокна и тонкие пленки из ПЭТ изготавливают методом экструзии с охлаждением при комнатной температуре. Степень кристалличности может быть отрегулирована, непосредственно, отжигом при некоторой температуре между температурами стеклования T_g и плавления T_m максимальная скорость кристаллизации достигается при 170 °С. Термическая деструкция ПЭТ происходит статистически вдоль цепи полимера; основными летучими продуктами является терефталевая кислота, уксусный альдегид и монооксид углерода. При 900 °С образуется большое количество разнообразных углеводородов; в основном газообразные продукты состоят из диоксида углерода, монооксида углерода и метана. Во избежание окисления ПЭТ во время переработки можно использовать широкий ряд антиоксидантов [14]».

Физико-механические свойства ПЭТ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства ПЭТ

Свойство	Показатель
Коэффициент теплового расширения (расплав), K^{-1}	$6,55 \times 10^{-4}$
Сжимаемость (расплав), МПа	$6,99 \times 10^6$
Плотность, $г/м^3$	
- аморфный	1,335
- кристаллический	1,420
Диэлектрическая постоянная, 23 ⁰ С, 1 кГц	3,25
Относительное удлинение при разрыве, %	12-55
Температура стеклования, ⁰ С	
- аморфный	67
- кристаллический	81
Температура плавления, ⁰ С	250-265
Показатель преломления (линия Na)	
- аморфный	1,576
- кристаллический	1,640
Предел прочности при растяжении, МПа	172
Модуль упругости при растяжении, МПа	$1,41 \times 10^4$

«При изучении ПЭТ, полученного из обычных пластиковых бутылок, были получены следующие данные: обнаружена связь между скоростью проникновения диоксида углерода и толщиной боковой стенки и между

толщиной боковой стенки и величиной молекулярного веса (или степенью полимеризации) ПЭТ, для производства бутылок необходимо достичь подходящей степени полимеризации. Относительно высокая молекулярная масса, необходимая для тары с безалкогольными напитками, при непрерывной полимеризации в расплаве экономически невыгодна, потому что более длительное время пребывания в расплавленном состоянии вызывает экстенсивную деструкцию полимера» [22].

«Вместо этого действия используется вторичный процесс, известный как «процесс в твердом состоянии» (т.е. поликонденсация в твердом состоянии), который включает обработку гранул ПЭТ при высокой температуре в течение длительного времени нахождения в сухой бескислородной среде, что стимулирует дальнейшую линейную поликонденсацию и дает материал с более высоким молекулярным весом. Кроме того, поликонденсация в твердом состоянии также удаляет газообразные продукты реакции и другие летучие вещества (например, ацетальдегид)» [15].

«Среднестатистическая молекулярная масса позволяет получить полную картину о свойствах и качестве получаемого полимера. Данный показатель материала чаще всего оценивается по характеристической вязкости (ГОСТ 18249-72), которая определяется по вязкости разбавленного раствора (в смеси растворителей фенол-тетрахлорэтан) в единицах дл/г» [3].

Характеристическая вязкость – это тот показатель, который определяется при входном контроле гранулята или хлопьев полиэтилентерефталата. Данный показатель важен, так как от значения молекулярной массы зависит назначение полученного сырья. Сырье с высокой характеристической вязкостью (выше 0,65 дл/г) может применяться в производстве волокна [16].

Отходы ПЭТ (полиэтилентерефталат) – это материалы, полученные в результате использования бутылок, контейнеров и других изделий из этого

полимера. ПЭТ-отходы относятся к пластмассовым отходам и могут быть подвергнуты переработке для получения новых продуктов [18].

Отходы ПЭТ (полиэтилентерефталат) могут быть различных форм, таких как бутылки, контейнеры, упаковочные материалы и т.д.

При переработке отходов ПЭТ они сортируются на основе цвета, формы и размера.

Основным составом отходов ПЭТ является сам полимер, а также следующие элементы:

- крышки и кольца от бутылок и контейнеров;
- этикетки и наклейки с информацией о продукте;
- небольшие остатки напитков или других продуктов, которые ранее были в упаковке;
- клей и адгезивы, используемые при производстве упаковки;

После сортировки и очистки отходов ПЭТ они подвергаются переработке, которая включает в себя измельчение, очистку и дальнейшую переработку в новые продукты, такие как бутылки, контейнеры, волокна и т.д.

1.2 Влияние компонентов этикетки на качество продуктов переработки ПЭТФ

Предполагаемое использование вторично переработанного ПЭТ требует высокой степени чистоты. Засоренность в волокнах или бутылках не допускается из-за возникновения проблем с разрывом волокон и эстетических соображений.

Наличие этикеток может вызвать трудности при вторичной переработке ПЭТ, если она размельчается на мелкие частицы во время промывки и разделения. Из кусочков бумаги могут выделяться отдельные целлюлозные волокна, которые трудно удалить из перерабатываемого полимера.

«Этикетки, содержащие слои ультратонкой термоусадочной полиэтиленовой пленки без какого-нибудь адгезива, помогают процессу

сепарации, так как они могут быть удалены с помощью флотации. Однако насыщенная печать на поверхности этикетки может повысить их плотность и затруднить разделение» [8].

Сейчас водорастворимые клеи (изготовленные на основе декстрина, крахмала и казеина) не могут значительно облегчить процесс вторичной переработки ПЭТ, облегчая удаление бумажных наклеек с ПЭТ бутылок, так как не могут использоваться в этом случае из-за плохой адгезии к полимерам.

Существует три типа клеев для использования с не модифицированными бумажными наклейками.

Первый тип: синтетические клеи на водной основе – эмульсии – обычно на основе поливинилацетата (ПВА) или сополимера (этиленвинилацетата – ЭВА), пластифицированного дибутилфталатом. Клей до некоторой степени растворяется в воде, так что во время вторичной переработки бумага отделяется от тары. Некоторые клеи остаются на пластмассе и внедряются во вторичнопереработанный переработанный ПЭТ [21].

Второй тип – это термопластичные клеи на основе этиленвинилацетата (ЭВА), совершенно не изменяющиеся при водной промывке. Но их минус может быть в том, что из-за низкой температуры плавления они могут размягчаться во время механической обработки, такой как дробление, и облегчать удаление этикеток. При этом большая часть клея остается на ПЭТ.

Третий тип адгезива для этикеток – клей, растворимый в щелочных растворах, совершенно невосприимчивый к воде. Этот клей будет разлагать на составные части и легко отделяться от ПЭТ только в 3% растворе едкого натра.

Этикетки на продуктах переработки ПЭТ флексобы могут оказывать влияние на качество этих продуктов. Компоненты этикеток могут включать клей, красители, печатные краски и ламинаты [24].

Клей, используемый для крепления этикетки на ПЭТ, может содержать вредные химические вещества, которые могут перейти в продукт при переработке. Это может привести к ухудшению качества переработанного материала и повышению содержания вредных веществ в нем [24].

Красители и печатные краски, используемые для печати этикеток, также могут содержать вредные химические вещества, которые могут перейти в продукт при переработке. Это может привести к ухудшению качества переработанного материала и повышению содержания вредных веществ в нем [25].

«Ламинаты, используемые для защиты этикетки, могут содержать пластиковые полимеры, которые не поддаются переработке. Это может привести к тому, что продукты переработки будут содержать непереработанные частицы пластика, что ухудшит их качество» [23].

Таким образом, компоненты этикеток могут оказывать значительное влияние на качество продуктов переработки ПЭТ флексов. Для минимизации этого влияния необходимо использовать безопасные компоненты этикеток и проводить тщательную сортировку и очистку материала перед переработкой.

1.3 Обзор технологии удаления компонентов этикеток из вторичного сырья ПЭТФ

Разделение полимерных отходов является одним из главных факторов, ограничивающих эффективность рециклинга полимеров, поэтому важным является развитие технологий автоматического разделения.

«Для отделения полимеров от загрязнений используют различные методы: магнитную сепарацию для извлечения железосодержащих материалов; электростатический метод для отделения цветных металлов, главным образом алюминия; воздушную сепарацию; флотацию в резервуарах или гидроциклонах, разделяющих полимеры по плотности. Затем материалы подвергаются дроблению» [20].

Методы переработки полимерных материалов делят на: механический, химический и термический рециклинг.

В России для переработки ПЭТФ широко используется механический рециклинг, так как этот способ переработки не требует дорогого специального оборудования и может быть реализован в любом месте накопления отходов.

К вторичному ПЭТФ относят технологические отходы и отходы производственного и бытового потребления.

«Технологические отходы (кромки, высечки, литники, обрезки, слитки, лента, крошки, обрезь и т.д.) возникают в процессе синтеза и переработки ПЭТФ и эффективно перерабатываются посредством повторного использования в основном производстве» [19].

Отходы производственного и бытового потребления ПЭТФ – это контейнеры для расфасовки и упаковки жидкостей, таких как воды, пива, вина, безалкогольных и алкогольных напитков, паст, порошков [26].

Если сравнивать методы химического разложения с механической вторичной переработкой ПЭТФ, то второй метод относительно простой, требует малых капиталовложений, гибкий (в плане объема поступления сырья, не оказывает негативного воздействия на окружающую среду).

«Основной проблемой при переработке расплава любого ПЭТ является снижение вязкости расплава, которое происходит за счет термической гидролитической деструкции. Поэтому вторично переработанный ПЭТФ хорошо подходит для производства волокон, так как волокна требуют меньшей характеристической вязкости, чем бутылки» [18].

Вторичная переработка ПЭТФ механическим способом имеет определенные трудности и ограничения:

- вторичному ПЭТФ в случае использования в нетрадиционной области применения приходится конкурировать с более дешевой пластмассой;
- следы от этикеток и клея (на основе канифольных кислот и сложных эфиров) приводят к потере прозрачности и изменению цвета ПЭТФ;
- недостаточно высушенный и содержащий остаточную влагу ПЭТФ легко деструктируется при переработке;

- продукты термической и окислительной деструкции вызывают пожелтения и снижают механические свойства ПЭТФ;

- ПЭТФ требует специальной обработки и сушки перед переработкой, поэтому он не может быть использован в обычном оборудовании для литья и экструзии полимерных материалов.

Технология удаления компонентов этикеток из вторичного сырья ПЭТФ является важным этапом переработки отходов и позволяет повысить качество и экономическую эффективность процесса.

Наиболее распространенными методами удаления компонентов этикеток являются механический, химический и термический способы. Механический метод основан на использовании специализированного оборудования, которое позволяет отделить этикетки от поверхности ПЭТФ [27].

Одним из примеров такого оборудования являются шредеры и грануляторы, которые дробят ПЭТФ на мелкие части и отделяют этикетки.

Химический метод использует растворители или щелочные растворы, которые разрушают связи между этикеткой и ПЭТФ.

Этот метод обычно применяется при очистке ПЭТФ бутылок, но используется и для удаления этикеток.

Термический метод основан на использовании высоких температур для отделения этикеток от ПЭТФ. Этот метод может быть применен как в сухом, так и во влажном виде.

В первом случае, ПЭТФ нагревается до высокой температуры, что позволяет отделить этикетки.

Во втором случае, ПЭТФ помещается в воду, где происходит удаление этикеток.

Химический метод очистки ПЭТ флексов может включать следующие этапы:

- разложение остатков пищевых продуктов: для этого ПЭТФ помещают в ёмкость с раствором щелочи (например, 3% раствор каустической соды) и

нагревают до определенной температуры и времени. Это разлагает остатки пищевых продуктов на более простые соединения;

- ополаскивание: ПЭТФ промывают водой, чтобы удалить остатки щелочи и других загрязнений;

- обработка кислотой: для удаления остатков цветных пигментов ПЭТФ могут быть обработаны раствором кислоты (например, уксусной);

- повторное ополаскивание: после обработки кислотой ПЭТФ промывают водой, чтобы удалить остатки кислоты;

- сушка: ПЭТФ высушиваются, чтобы удалить излишки влаги;

- фракционирование: ПЭТФ могут быть разделены на разные фракции в зависимости от их химических свойств и качества;

- проверка качества: ПЭТФ проверяются на наличие остатков загрязнений и соответствие требованиям качества для дальнейшего использования.

Термический метод очистки ПЭТ флексы основан на нагревании пластикового материала до определенной температуры, при которой происходит разложение органических загрязнений и образование газов, которые выходят из материала.

«Этот процесс называется пиролизом. Для термической очистки ПЭТФ используют специальные установки, в которых флексы помещаются в камеру, где создается высокая температура. В процессе нагревания пластик начинает разлагаться на молекулы, которые затем превращаются в газы и выходят из материала. Оставшиеся после процесса твердые остатки удаляются из камеры» [17].

Термическая очистка является эффективным методом очистки ПЭТФ от органических загрязнений. Однако, этот метод может привести к потере части полимерного материала, что может снизить его качество и прочность. Поэтому перед использованием данного метода необходимо провести тщательное исследование и оценку его эффективности и безопасности [28].

В целом, каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного метода зависит от характеристик ПЭТФ и требований к качеству переработанного материала. Однако, в любом случае, удаление компонентов этикеток является важным этапом переработки отходов и позволяет повысить эффективность процесса.

Выводы к разделу 1.

Литературный обзор состава ПЭФ, поступающих на переработку, влияние компонентов этикетки на продукты переработки ПЭТФ и анализ технологий удаления компонентов этикетки позволил рассмотреть возможность применения ПАВ в процессе удаления компонентов этикетки и клея с отходов ПЭТФ.

ПАВ (поверхностно-активные вещества) могут оказывать влияние на процесс удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТ флексы.

Во-первых, использование ПАВ может улучшить смачивание поверхности ПЭТ флексы, что способствует более эффективному удалению этикеток. При этом ПАВ помогает разрушить связи между клеевыми и красящими веществами и поверхностью ПЭТ флексы, что облегчает их отделение.

Во-вторых, ПАВ могут повлиять на качество получаемого продукта переработки. Если использовать слишком большое количество ПАВ, то это может привести к загрязнению продукта переработки и уменьшению его качества.

Таким образом, использование ПАВ может быть полезным для улучшения процесса удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТ флексы, но необходимо контролировать их количество, чтобы не повредить качество продукта переработки.

2 Экспериментальная часть

2.1 Анализ применяемой технологии отделения этикетки от вторичного ПЭТ сырья на примере ООО «ЭкоРесурсПоволжье»

«ПЭТФ бутылки поступают на ООО «ЭкоРесурсПоволжье» в составе ТКО. Выгрузка мусоровозов осуществляется на бетонированную площадку, в центре которой находятся три заглубленных конвейера, подающих отходы на три сортировочные линии, на которых вручную отбирают ПЭТ бутылки, пригодные для дальнейшей переработки» [4].

Все отобранные в процессе ручной сортировки ПЭТФ бутылки поступают на пресс, где формируются тюки массой до 150 кг (рисунок 6).



Рисунок 6 – Спрессованная ПЭТФ

Спрессованный ПЭТФ попадает на линию дробления и мойки ПЭТФ-бутылок в виде тюка, закрепленного металлической проволокой.

«Работник болторезом перерезает проволоку, разбивает лопатой тюк и равномерно загружает ПЭТФ бутылки на ленточный конвейер, который загружает их в дробилку № 1 (рисунок 7)» [11].



Рисунок 7 – Процесс измельчения целой бутылки на частицы

В процессе дробления происходит измельчение целой бутылки на частицы размером 4-6 см, которые по шнековому конвейеру поступают в горизонтальную мойку, где происходит отмывание флекс от загрязнителей, таких как пыль, песок (рисунок 8).



Рисунок 8 – Горизонтальная мойка для очистки ПЭТ от загрязнений

«Далее флекс поступает в двухшнековую мойку, где происходит процесс флотации (разделение материалов по плотности). В результате данного процесса из ПЭТФ бутылок удаляются этикетки и крышки. ПЭТФ хлопья по дну транспортируются шнеком через всю ванну, а пробка, кольца, полиэтиленовые и полипропиленовые этикетки и другие частицы с удельной плотностью менее единицы, всплывают на поверхность» [11].

Удаляется ППС (пробкосодержащая смесь) работником вручную, с использование дуршлага с поверхности воды и совка с фильтрующей сеткой. Весь этот процесс производится в ведро. По мере его заполнения, ПСС перемещают в Биг-Бэг.

Перемещаясь по шнековому конвейеру, флекс поступает в горячую мойку ($T = 80-100\text{ }^{\circ}\text{C}$), куда добавляют 3% раствор едкого натра для отделения клея и этикеток от флекс (рисунок 9).



Рисунок 9 – Горячая мойка для удаления этикеток и прочих примесей

Скорость вращения раствора в горячей мойке – 30 оборотов в минуту (вращение по часовой стрелке), производительность в час 450 кг/ч. В это же время происходит отделение оставшихся загрязнителей и обеззараживание.

«Затем флекс поступает на многостадийную мойку, включающую в себя, последовательно расположенные одну горизонтальную мойку и три флотационные ванны. Многостадийная мойка необходима для эффективной промывки флекс от едкого натра, удаления остатков клея и этикетки, извлечения из общей массы флекс металлов, при помощи магнитов» [11].

Загрязненная вода, образующая в процессе очистки флексы от клея и этикеток поступает в отстойник, где снижается ее рН с помощью разбавления чистой водой. После промывки вода очищается в отстойнике и возвращается в начало линии, а именно в этикеткоотделитель.

На рисунке 10 представлен алгоритм технологических операций очистки ПЭТ, применяемый на производстве.

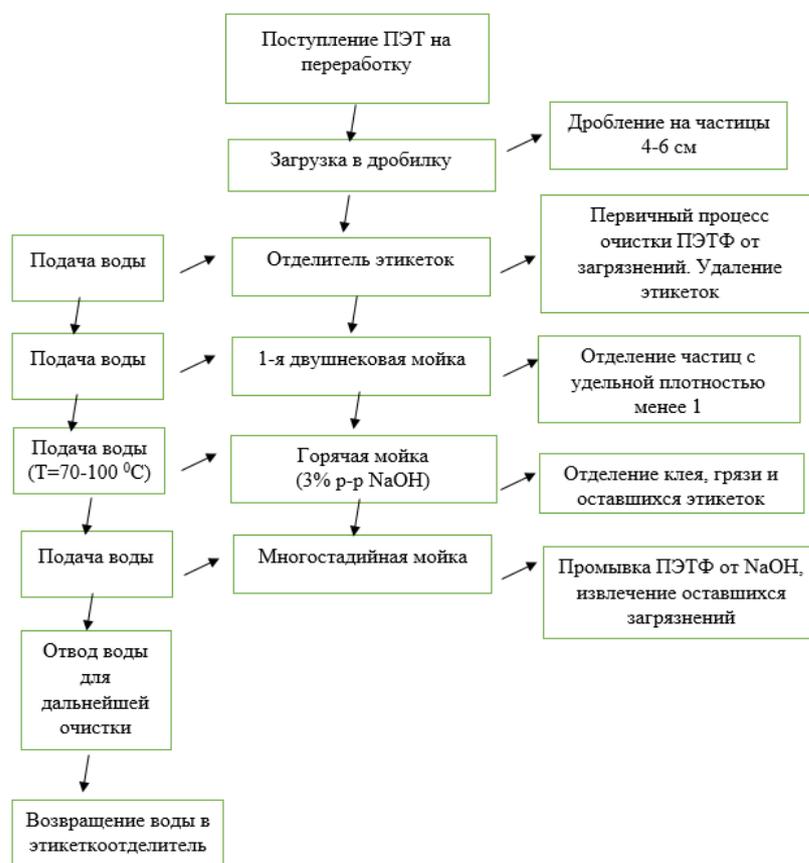


Рисунок 10 – Алгоритм технологических операций очистки ПЭТФ

Качество получаемой ПЭТ флексы значительно снижается из-за наличия загрязнений.

Согласно методике определения степени загрязнения входящего сырья (МИ-202-08-2017), ПЭТ флексу, получаемую в процессе очистки по данной технологии можно отнести к средней степени загрязнения (через ПЭТ бутылку предметы просматриваются с трудом, на поверхности множественные следы загрязнений). Опираясь на проведенный анализ технологии была предложена оптимизация технологии удаления компонентов этикетки и клея от поверхности ПЭТФ.

2.2 Экспериментальное обоснование оптимизации технологии

Перед началом эксперимента навеску гидроокиси натрия, массой 15 г поместили в мерную колбу на 500 мл. Растворили в 250 мл дистиллированной воды и довели до метки. Получили 3% раствор каустической соды.

Предварительно нагрели водяную баню LOIP LB – 160 до 60,5°C. Мешалку закрепили на штативе.

Методика проведения эксперимента по изучению влияния ПАВ на очистку ПЭТ флексы заключается в следующем.

Опыт №1: реализация процесса в лабораторных условиях.

Процесс очистки ПЭТФ от загрязнений, реализуемый на ООО «ЭкоРесурсПоволжье» повторили при тех же условиях в лаборатории.

По итогу в опыте № 1 масса загрязнений флексы был рассчитан по формуле (1):

$$m_3 = m_1 - m_2 \quad (1)$$

где m_1 – масса флексы до очистки;

m_2 – масса флексы после очистки.

Масса загрязнений флексы рассчитанная по формуле (1):

$$m_3 = 5,3423 - 5,1930 = 0,1493 \text{ г}$$

Так же произвели расчёт оставшихся загрязнений на фильтре по формуле (2):

$$m_3 = m_1 - m_2 \quad (2)$$

где m_1 – масса фильтра после фильтрации и сушки;

m_2 – масса фильтра до фильтрации и сушки.

Результаты расчета по формуле (2):

$$m_3 = 1,6761 - 1,5523 = 0,1238 \text{ г}$$

Опыт №2: с добавлением 1 мл ПАВ.

Навеску ПЭТФ массой 5,3264 г поместили в предварительно нагретый 3% раствор каустической соды с добавлением 1 мл ПАВ (в качестве ПАВ использовалось моющее средство БК-Прогресс).

Перемешивали в течении 30 минут на водяной бане при температуре 60,5°C с помощью механической мешалки.

Далее раствор флексы с ПАВ очистили от всплывших этикеток, промыли от раствора ПАВ и каустической соды, профильтровали через предварительно взвешенный обеззоленный фильтр «синяя лента» масса которого составила 1,5862.

Фильтр вместе с ПЭТФ поместили в сушильный шкаф для удаления лишней влаги при температуре 50°C.

Через час фильтр с флексой достали, поместили флексу в стакан и взвесили. Масса флексы после очистки и сушки составила 5,1761 г.

Фильтр так же взвесили и получили массу 1,7757 г.

Аналогично расчету из первого опыта, провели расчет второго, по формуле (1):

$$m_3 = 5,3264 - 5,1761 = 0,1503 \text{ г}$$

Аналогично первому опыту провели расчет массы оставшихся загрязнений на фильтре и во втором опыте, по формуле (2):

$$m_3 = 1,7757 - 1,5862 = 0,1895 \text{ г}$$

Опыт №3: с добавлением 3 мл ПАВ.

Навеску ПЭТФ массой 5,3532 г поместили в предварительно нагретый 3% раствор каустической соды с добавлением 3 мл ПАВ (в качестве ПАВ использовалось моющее средство БК-Прогресс).

Перемешивали в течении 30 минут на водяной бане при температуре 60,5°C с помощью механической мешалки.

Далее раствор флексы с ПАВ очистили от всплывших этикеток, профильтровали через предварительно взвешенный обеззоленный фильтр «синяя лента» масса которого составила 1.5601 г

Фильтр вместе с ПЭТФ поместили в сушильный шкаф для удаления лишней влаги при температуре 50°C.

Через час фильтр с флексой достали, поместили флексу в стакан и взвесили. Масса флексы после очистки и сушки составила 5, 1309 г.

Фильтр так же взвесили и получили массу 1,8126 г.

Произвели расчёт по формуле (1):

$$m_3 = 5,3532 - 5,1309 = 0,2253 \text{ г}$$

Произвели расчет массы загрязнений на фильтре по формуле (2):

$$m_3 = 1,8126 - 1,5601 = 0,3066 \text{ г}$$

Опыт 4 повторяли при тех же условиях и соотношениях реагентов с одной лишь разницей, что дополнительно вводили 5 мл ПАВ.

Результаты опыта 4 занесли в таблицу 2.

Таблица 2 – Полученные результаты 4 опыта

Масса ПЭТФ до очистки, г	Масса ПЭТФ после очистки, г	Масса фильтра до фильтрации и сушки, г	Масса фильтра после фильтрации и сушки, г
5,3360	5,0930	1,5581	1,9109

Произвели расчет по формуле (1):

$$m_3 = 5,3360 - 5,0930 = 0,2430 \text{ г}$$

Произвели расчет массы загрязнений, оставшихся на фильтре по формуле (2):

$$m_3 = 1,9109 - 1,5581 = 0,3528 \text{ г}$$

Полученные результаты по изучению влияния ПАВ на процесс очистки ПЭТФ занесли в таблицу 3.

Таблица 3 – Влияние ПАВ на процесс очистки ПЭТФ

№ Опыта	Масса флексы до и после очистки		Количество ушедших загрязнений, г	Масса фильтра до и после фильтрации		Количество загрязнений, оставшихся на фильтре, г.
	До очистки, г	После: очистки, г		До фильтрации, г	После фильтрации и сушки, г	
1	5,3423	5,1930	0,1493	1,5523	1,6761	0,1238
2	5,3264	5,1761	0,1503	1,5862	1,7757	0,1895
3	5,3532	5,1309	0,2253	1,5601	1,8126	0,3066
4	5,3360	5,0930	0,2430	1,5581	1,9109	0,3528

В ходе экспериментальной проверки влияния ПАВ на очистку ПЭТ флексы от этикеток и прочих загрязнений в первую очередь была изучена эффективность применения в процессе очистки ПАВ комплексообразователя.

На рисунках 11 и 12 представлена динамика влияния ПАВ на очистку ПЭТФ по массе ушедших загрязнений и загрязнений, оставшихся после фильтрации.

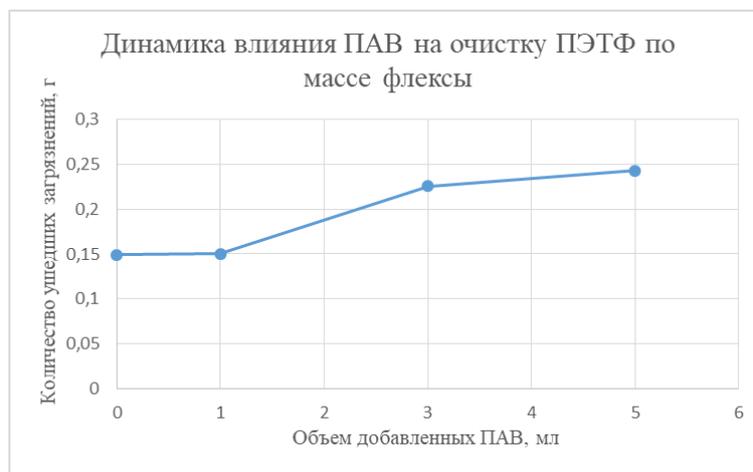


Рисунок 11 – Динамика влияния ПАВ на очистку ПЭТФ по массе флексы

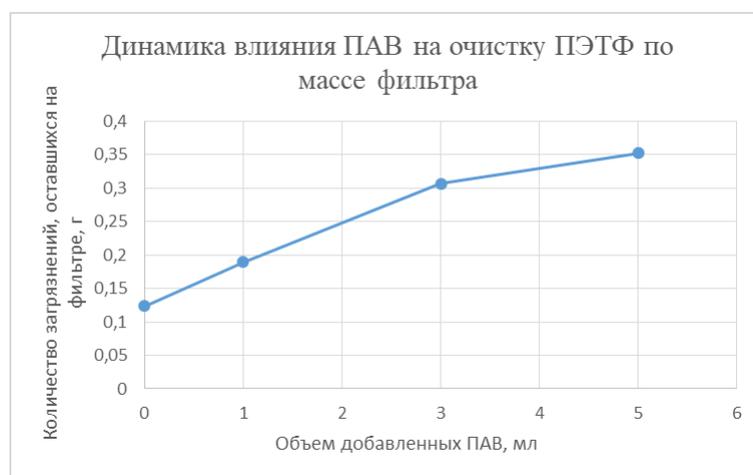


Рисунок 12 – Динамика влияния ПАВ на очистку ПЭТФ по массе фильтра

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что применение ПАВ комплексообразующих в процессе очистки ПЭТФ от этикеток и загрязнений дало положительные результаты. Динамику улучшений можно отследить по выше представленным рисункам 11 и 12. Более того, если присутствие в процессе очистки данного ПАВ в количестве 2% привело к слабому положительному эффекту, то с ростом количества ПАВ в процессе очистки его положительное влияние так же возрастало.

2.3 Разработка оптимальной технологической схемы очистки ПЭТФ

Технологический процесс удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТФ на предприятии является комбинированным так как проходит очистку термическим способом (проходит через камеру горячей мойки, температура которой составляет 70-100 °С) и химическим (очищается 3% раствором каустической соды)

Процесс удаления компонентов этикеток и прочих загрязняющих веществ состоит из нескольких этапов (рисунок 13).

На первом этапе «поступившее на переработку сырье полиэтилентерефталата загружается в дробилку, где происходит измельчение для получения крупной фракции т.е. ПЭТ флексы» [11].

Вторым этапом «ПЭТ флекса поступает в горизонтальную ванну, где происходит первичный процесс очистки ПЭТФ от загрязнений, таких как грязь, песок, остатки жидкости» [11].

Третьим этапом является «отделение этикетки от ПЭТФ с помощью флотации. Флекс подается в двухшнековую мойку, где происходит процесс флотации (разделение материалов по плотности). Результатом данного процесса является удаление с ПЭТФ бутылок этикеток и крышек. Сами ПЭТФ хлопья транспортируются по дну шнеком через всю ванну, а остальные части (пробка, кольца, полиэтиленовые и полипропиленовые этикетки и другие частицы с удельной плотностью менее единицы) всплывают на поверхность» [11].

Четвертым этапом ПЭТФ поступает в горячую мойку с температурой 70-100 °С, куда добавляют 3% раствор едкого натра и 10% раствор комплексобразующих ПАВ, для отделения клея, грязи и оставшихся этикеток от ПЭТФ.

Скорость вращения раствора в горячей мойке должна составлять 30 оборотов в минуту.

Пятым этапом «ПЭТФ поступает на многостадийную мойку, включающую в себя, последовательно расположенные одну горизонтальную мойку и три флотационные ванны. Многостадийная мойка необходима для эффективной промывки флекс от едкого натра и ПАВ, удаления остатков клея и этикетки, извлечения из общей массы флекс металлов, при помощи магнитов» [11].

Загрязненная вода, образующая в процессе очистки флексы от клея и этикеток, поступает в отстойник, где снижается ее рН с помощью разбавления чистой водой, а также происходит очистка от ПАВ с помощью коагуляции и сорбции на активном угле, такой способ обеспечивает почти полное изъятие ПАВ из воды. После промывки вода очищается в отстойнике и возвращается в начало линии, а именно в этикеткоотделитель [30].

Алгоритм технологических операций процесса очистки ПЭТФ от клея представлен на рисунке 13.

Данная технология очистки ПЭТ флексы от клея и компонентов этикетки позволяет уменьшить риск возникновения контактов с клеем и этикетками и снижает риск возникновения негативных эффектов.



Рисунок 13 – Алгоритм технологических операций процесса очистки ПЭТФ от клея

В таблице 4 представлены требования к очищенной ПЭТ флексе.

Таблица 4 – Характеристика ПЭТФ и инородных примесей по окончании процесса очистки

Наименование показателей	1 сорт	2 сорт	Брак
Бумага, металл, песок, резина и др.	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%
Влажность	Не более 2%		Более 2%
Качество промывки	Хорошее (для прозрачных хлопьев)	Удовлетворительное (Для прозрачных хлопьев)	
	Удовлетворительное (для прочих цветов)	Неудовлетворительное (для хлопьев любого цвета)	

С целью изучения существующих патентов в области очистки ПЭТФ от клея и компонентов этикетки было проведено исследование научной базы. Результаты изучения представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Патентный поиск по теме исследования

Наименование патента	Номер патента	Авторы патента	Сущность изобретения
Устройство и способ для непрерывной мойки емкостей, изготовленных из пластика, а также для удаление загрязнителей и этикеток с их поверхностей	RU245972C 2	Теруджи Пьерджоржи (ИТ)	«Изобретение относится к области очистки и касается устройства и способа для непрерывной мойки емкостей, изготовленных из пластика, а также для удаления загрязнителей и этикеток с их поверхности. Во время мойки емкости проходят через моечную камеру и подвергаются сильному трению, создаваемому мешалкой, вращающейся с высокой скоростью. Также используется средство снятия, способствующее отделению загрязнителей от поверхности емкостей. Изобретение обеспечивает эффективность процесса мойки пластиковых емкостей» [5].

Продолжение таблицы 5

Наименование патента	Номер патента	Авторы патента	Сущность изобретения
Способ мойки емкости и емкость	RU2139763C1	Патрис Робишон (FR)	«Группа изобретений применима в области повторно используемых пластиковых бутылок, в частности, заполняемых пищевыми продуктами. Способ мойки емкости, особенно для пищевых продуктов или напитков, типа бутылки, предназначенной для повторного использования, включает промывку упомянутой емкости водным раствором при температуре более 70°C. Емкость многоразового использования изготавливают из гомополимера или сополимера либо из их смеси, при этом она прозрачна и имеет среднюю степень кристалличности более 30%, причем толщина стенок емкости составляет более 0,35 мм по корпусу более 1,00 мм в днище. Достигается улучшение механических свойств, повышение химической стойкости к различным пищевым средам и газонепроницаемость, а также снижение степени остаточного загрязнения после промывки» [6].

По результатам проведенного исследования было выявлено, что применение ПАВ положительно влияет на процесс очистки ПЭТФ.

На рисунке 14 представлена схема технологического процесса переработки ПЭТ после внедрения ПАВ в процесс очистки.

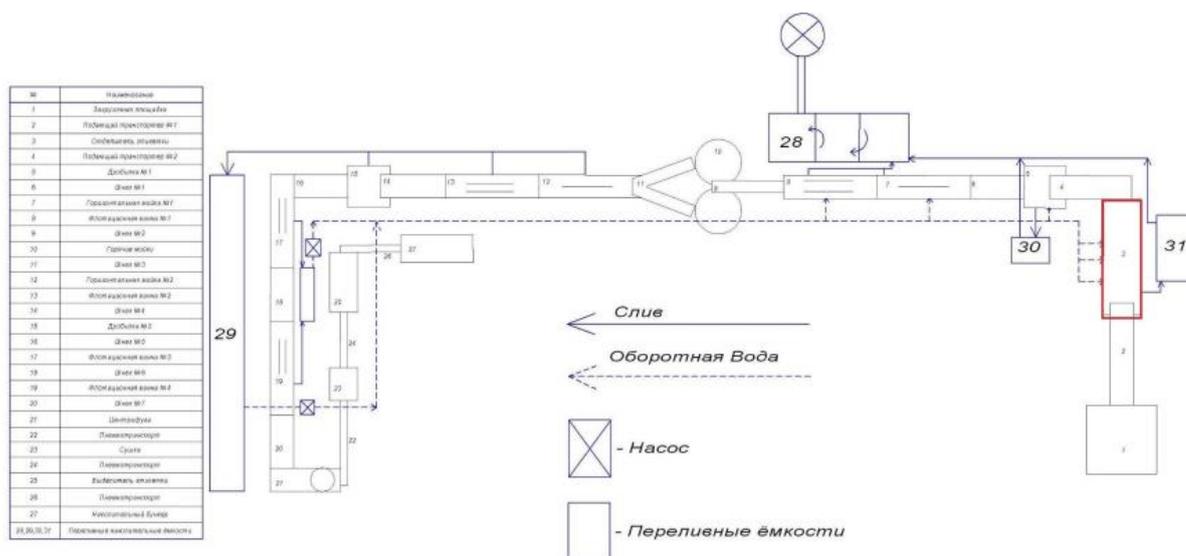


Рисунок 14 – Схема технологического процесса переработки ПЭТ

Таким образом, с целью изучения существующих патентов в области очистки ПЭТФ от клея и компонентов этикетки было проведено исследование научной базы, которое выявило положительное влияние применения ПАВ в процессе удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТФ [7].

Так же, было проведено экспериментальное обоснование внедрения ПАВ в процесс очистки ПЭТФ. Экспериментальная проверка в первую очередь была направлена на изучение влияния ПАВ на процесс очистки ПЭТ флексы от этикеток и прочих загрязнений [8].

Результаты эксперимента показали положительное влияние применения ПАВ в процессе очистки, что говорит об актуальности использования ПАВ в процессе удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТФ.

3 Расчетная часть

3.1 Расчет материального баланса процесса

Произведем расчёт материального баланса аппарата по очистке ПЭТФ от компонентов этикеток и загрязнений.

Расчёт производится с целью получения информации по объемам расхода, который поступает на очистку материала, и объемам получения конечного продукта очистки [10].

Закон сохранения материи утверждает, что в системе, закрытой для обмена веществ, количество вещества остается неизменным, независимо от того, какие физические или химические изменения они претерпевают [29].

В процессе очистки и сушки отходов из полиэтилентерефталата происходит удаление грязи, клея этикеток и мелкой фракции ПЭТ (таких как крышки). Поэтому первоначальную массу, поступающего на переработку материала, необходимо принять за 100%, а получаемый на выходе продукт – очищенную флексу – 80%. В данном технологическом процессе очистки часть материалов отсеивается [9].

На рисунке 15 показана схема материальных потоков при очистке отходов ПЭТ от компонентов этикетки и других загрязняющих веществ.



Рисунок 15 – Схема материальных потоков процесса очистки ПЭТФ от компонентов этикетки

Процесс очистки отходов ПЭТФ на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье» имеет две камеры, работающие попеременно, что делает процесс очистки непрерывным.

«Технология очистки ПЭТФ состоит из нескольких этапов: очистка флексы с помощью 3% раствора едкого натра и 10% раствора ПАВ, очистка флексы от остатков химических растворов и доудаление этикеток, сушка флексы» [12].

Исходные данные для расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Исходные данные для расчёта материально баланса

Параметр	Значение
Масса отходов ПЭТФ, поступающих на очистку, кг	450
Объем воды, поступающий для очистки ПЭТФ, м ³	4
Температура воды, °С	70-100

Тогда уравнение материального баланса имеет вид (формула 3):

$$G_1 + G_4 = G_2 + G_3 + G_4 + G_5 \quad (3)$$

где G_1 – масса отходов ПЭТФ, поступающих на очистку, кг;

G_2 – масса очищенной ПЭТФ, кг;

G_3 – масса загрязнителей (клей, этикетка, песок), кг;

G_4 – масса испаряемой влаги, в процессе сушки, кг;

G_5 – масса пара, кг.

Тогда массу очищенной флексы находим по формуле (4):

$$G_2 = G_1 - (G_3 + G_4 + G_5) \quad (4)$$

Согласно исходным данным, пар составляет 10% от общей массы очищаемого материала, в соотношении 0,3: 0,7. Тогда количество выделившегося пара находим по формуле (5):

$$G_5 = (G_1 + G_4) \cdot 0,1 \cdot 0,3 \quad (5)$$

Результат расчета по формуле (5):

$$G_5 = (360 + 90) \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 13,5 \text{ кг}$$

Произведем расчёт потерь, которые составляют 5%, по формуле (6):

$$G_{\text{потери}} = (G_1 + G_4) \cdot 0,05 \quad (6)$$

Результат расчета по формуле (6):

$$G_{\text{потери}} = (360 + 90) \cdot 0,05 = 21,75 \text{ кг}$$

Следовательно, расчет потерь воды, которые составляют 10%, производится по формуле (7):

$$G_{\text{потери воды}} = (G_1 + G_4) \cdot 0,1 \quad (7)$$

Результат расчета по формуле (7):

$$G_{\text{потери}} = (360 + 90) \cdot 0,1 = 43,5 \text{ кг}$$

Рассчитаем массу очищенной ПЭТФ по формуле (4):

$$G_2 = 450 - (13,05 + 21,75 + 43,5) = 371,7 \text{ кг}$$

На основании произведенных расчётов был составлен материальный баланс (таблица 7).

Таблица 7 - Материальный баланс процесса

Приход			Расход		
Компонент	Масса, кг	Содержание, %	Компонент	Масса, кг	Содержание, %
ПЭТФ загрязненная	360	80	ПЭТФ Очищенная	371,7	82
Вода	90	20	Вода	43,5	10
-	-	-	Пар	13,05	3
-	-	-	Потери	21,75	5
Итого	450	100	Итого	450	100

Так же был произведен расчет материального баланса процесса, реализуемого на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье».

Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Материальный баланс процесса на предприятии

Приход			Расход		
Компонент	Масса, кг	Содержание, %	Компонент	Масса, кг	Содержание, %
ПЭТФ загрязненная	360	80	ПЭТФ Очищенная	310,5	69
Вода	90	20	Вода	50	11,1
-	-	-	Пар	22	4,9
-	-	-	Потери	67,5	15
Итого	450	100	Итого	450	100

В результате расчета материального баланса процесса на предприятии масса потерь составила 67,5 кг, ПЭТФ очищенной 310,5 кг, воды и пара 72кг.

3.2 Тепловой баланс процесса

Учет влияния температуры производится через составление уравнения теплового баланса. В общем виде тепловой баланс показывает равенство количества тепла, которое пришло в реактор, количеству тепла, покинувшего его.

Тепловой баланс процесса очистки ПЭТФ может быть описан следующим образом:

- в начале процесса флекса подвергается нагреванию для размягчения и беспрепятственного удаления клея от поверхности ПЭТ, для этого используют высокотемпературный нагревательный элемент (в данном случае обогреватель змеевикового типа);

- с помощью механического воздействия (например, механической мешалки) клей отделяется от поверхности флексы;

Тепловой баланс процесса очистки ПЭТФ от компонентов этикетки и клея зависит от многих факторов, таких как температура нагревателя, скорость вращения мешалки, время нагрева и охлаждения, а также свойства ПЭТ и этикеток.

Уравнение теплового баланса процесса имеет вид (формула 8):

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}} \quad (8)$$

Количество теплоты жидких веществ, вносимое в аппарат, найдем по формуле (9):

$$Q = G \cdot c_p \cdot t \quad (9)$$

где G – количество вещества;

c_p – средняя теплоемкость этого вещества;

t – температура, отсчитанная от какой-либо точки (обычно от 0°C).

Количество теплоты воды рассчитываем по формуле (10):

$$Q_{\text{в}} = G \cdot c_p \cdot t \quad (10)$$

Результаты расчета по формуле (10):

$$Q_{\text{в}} = 193,22 \cdot 4,218 \cdot 273,150 = 222\,617,7 \text{ кДж}$$

Количество теплоты NaOH нашли по формуле (9):

$$Q_{\text{NaOH}} = 18 \cdot 0,02823 \cdot 273,150 = 23,133 \text{ кДж}$$

Количество теплоты ПАВ найдем по формуле (9):

$$Q_{\text{ПАВ}} = 23 \cdot 5,34 \cdot 273,150 = 13\,127,58 \text{ кДж}$$

По формуле (11) рассчитаем тепловой баланс:

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}} \quad (11)$$

Результаты расчета по формуле (11):

$$Q_{\text{прих}} = 222\,617,7 + 23,133 + 13\,127,58 = 235\,768,4 \text{ кДж}$$

По формуле (10) найдем количество теплоты жидкостей, выходящих из аппарата:

$$Q_{\text{в}} = 186,7 \cdot 4,218 \cdot 273,150 = 215\,136,9 \text{ кДж}$$

Количество теплоты NaOH найдем по формуле (9):

$$Q_{\text{NaOH}} = 9 \cdot 0,02823 \cdot 273,150 = 1145,3 \text{ кДж}$$

Количество теплоты ПАВ найдем по формуле (9):

$$Q_{\text{ПАВ}} = 13 \cdot 5,34 \cdot 273,150 = 19\,486,6 \text{ кДж}$$

По формуле (11) рассчитаем тепловой баланс:

$$Q_{\text{прих}} = 215\,136,9 + 1145,3 + 19\,486,6 = 235\,768,4 \text{ кДж}$$

Сведем полученные результаты в таблицу 9.

Таблица 9 – Тепловой баланс

Приход			Расход		
Компонент	кДж	%	Компонент	кДж	%
$Q_{\text{н}}$	222 617,7	94,4	$Q_{\text{н}}$	215 136,9	91
Q_{NaOH}	23,133	0,01	Q_{NaOH}	1145,3	0,48
$Q_{\text{ПАВ}}$	13 127,58	5,59	$Q_{\text{ПАВ}}$	19 486,6	8,52
-	-	-			
Итого	235 768,4	100	Итого	235 768,4	100

Таким образом, тепловой баланс процесса очистки ПЭТФ от компонентов этикетки и клея составит 235 768,4 кДж.

3.3 Расчет конструктивных параметров оборудования

Проведенный анализ процесса удаления компонентов этикеток и клея с отходов ПЭТФ на предприятии ООО «ЭкоРесурсПоволжье» позволил выявить необходимость в оптимизации данного процесса с помощью внедрения ПАВ.

Исходные данные для расчета аппарата приведены в таблице 10.

Расчет конструктивных параметров оборудования проводился в системе компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования MathCad.

Таблица 10 – Исходные данные для расчета

Наименование	Значение
Диаметр аппарата D , м	2,8
Высота заполнения аппарата H , м	2,65
Плотность жидкой фазы $\rho_{ж}$, кг/м ³	1100
Концентрация твердой фазы $x_{ср}$	11,25
Плотность материала частиц $\rho_{г}$, кг/м ³	1380
Динамическая вязкость жидкой фазы, мПа·с	$5 \cdot 10^3$
Требуемая степень неоднородности среды	0,9
Частота вращения мешалок, об/мин	30
Высота мешалки $H_{м}$, м	1,75
Диаметр мешалки $d_{м}$, м	1,12
Диаметр вала $d_{в}$, м	0,11
Шаг винтовой линии лопасти $t_{л}$, м	0,875
Расстояние от подшипника в стойке до лопасти $h_{п}$	1,9

Рассчитали характеристики перемешиваемой среды (рисунок 16).

1. Расчет характеристик перемешиваемой среды:

Объем перемешиваемой среды, м.куб, находим по формуле

$$V := 0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H \quad V = 16.317 \quad \text{м}^3$$

Средняя плотность суспензии, кг/м.куб:

$$\rho := \frac{\rho_t \cdot \rho_j}{(\rho_t - \rho_{\text{ср}}) \cdot (\rho_t - \rho_j)} \quad \rho = 3.961 \quad \text{м}^3$$

Средняя объемная доля твердой фазы в суспензии:

$$\phi_{\text{ср}} := \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot \rho}{\rho_t} \quad \phi_{\text{ср}} = 0.032$$

Динамическая вязкость суспензии, Па*с:

$$\mu := \mu_j \cdot \exp(4.163 \cdot \phi_{\text{ср}}^2 + 2.856 \cdot \phi_{\text{ср}}) \quad \mu = 5.507 \quad \text{Па} \cdot \text{с}$$

Кинематическая вязкость суспензии, м.кв/с

$$\nu := \frac{\mu}{\rho} \quad \nu = 1.39 \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Рисунок 16 – Расчет характеристик перемешиваемой среды в системе MathCad

Рассчитали мощность перемешивания (рисунок 17).

2. Расчет мощности перемешивания:

Относительная ширина зазора между мешалкой и стенками аппарата

$$h_{12} := \frac{D - d_m}{d_m} \quad h_{12} = 1.5$$

Коэффициент сопротивления лопасти мешалки

$$\lambda := \begin{cases} (157.685 \cdot e^{-4.27 \cdot h_{12}} + 46.728 \cdot h_{12}) & \text{if } h_{12} \leq 0.6 \\ 40 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda = 40$$

Число Рейнольдса

$$Re_{mm} := \frac{n \cdot d_m^2}{\nu} \quad Re = 27.067$$

Параметр M

$$M := \frac{1}{3} \cdot \lambda \cdot \frac{H_m}{d_m} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_v}{d_m} \right)^3 \right] \quad M = 20.814$$

Коэффициент мощности

$$K_{mm} := \pi^2 \cdot \frac{M}{2 \cdot Re} \quad K = 3.795$$

Мощность, необходимая для осуществления перемешивания, Вт

$$N_{mm} := K \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5 \quad N = 7.152 \times 10^5 \quad \text{Вт}$$

Рисунок 17 – Расчет мощности перемешивания в системе MathCad

Рассчитали время гомогенизации процесса (рисунок 18).

3 Расчет времени гомогенизации перемешивающей среды

Относительный радиус границы раздела зон

$$r := \frac{dv}{D} \quad r = 0.039$$

Относительный радиус вала мешалки

$$r2 := 0.57 + 0.36 \cdot r \quad r2 = 0.584$$

Параметр зоны циркуляции

$$X12 := \frac{r}{r2} \quad X12 = 0.067$$

Параметр циркуляционного расхода среды в центральной зоне

$$\Theta1 := 0.627 - 1.17 \cdot X12 + 9.8 \cdot X12^2 - 27.2 \cdot X12^3 + 34.16 \cdot X12^4 - 15.67 \cdot X12^5$$

$$\Omega1 := 0.5 \cdot r2 \cdot (r2 - r)^2 \cdot \Theta1 \quad \Omega1 = 0.051 \quad \Theta1 = 0.585$$

Параметр циркуляционного расхода среды в периферийной зоне

$$\Theta2 := 0.627 - 1.17 \cdot r2 + 9.8 \cdot r2^2 - 27.2 \cdot r2^3 + 34.16 \cdot r2^4 - 15.67 \cdot r2^5$$

$$\Omega2 := 0.5 \cdot (1 - r2)^2 \cdot \Theta2 \quad \Theta2 = 0.778 \quad \Omega2 = 0.067$$

Объемный циркуляционный расход среды, м.куб/с

$$q := \frac{1}{16} \cdot \lambda \cdot D^2 \cdot \frac{\left(1 - \frac{dv}{dm}\right) \cdot t_l \cdot H_m}{H \cdot (r2^2 - r^2) \cdot (\Omega1 + \Omega2)} \cdot \Omega1 \cdot \Omega2 \cdot \eta \quad q = 0.782$$

Время гомогенизации, с:

$$\tau := \left(0.315 + 8.921 \cdot \eta - 18.077 \cdot \eta^2 + 14.569 \cdot \eta^3\right) \cdot \frac{V}{q} \quad \tau = 90.147$$

Рисунок 18 – Расчет гомогенизации процесса в системе MathCad

Полученные данные занесли в таблицу 11.

Таблица 11 – Расчет конструктивных параметров оборудования

Параметр	Значение
Объем перемешиваемой среды, м.куб	16,317
Средняя плотность суспензии кг/м.куб	3,961
Динамическая вязкость суспензии Па·с	5,507
Кинематическая вязкость суспензии м ² /с	1,39
Мощность необходимая для перемешивания, Вт	$7,152 \cdot 10^5$

На рисунке 19 представлена схема аппарата с мешалкой

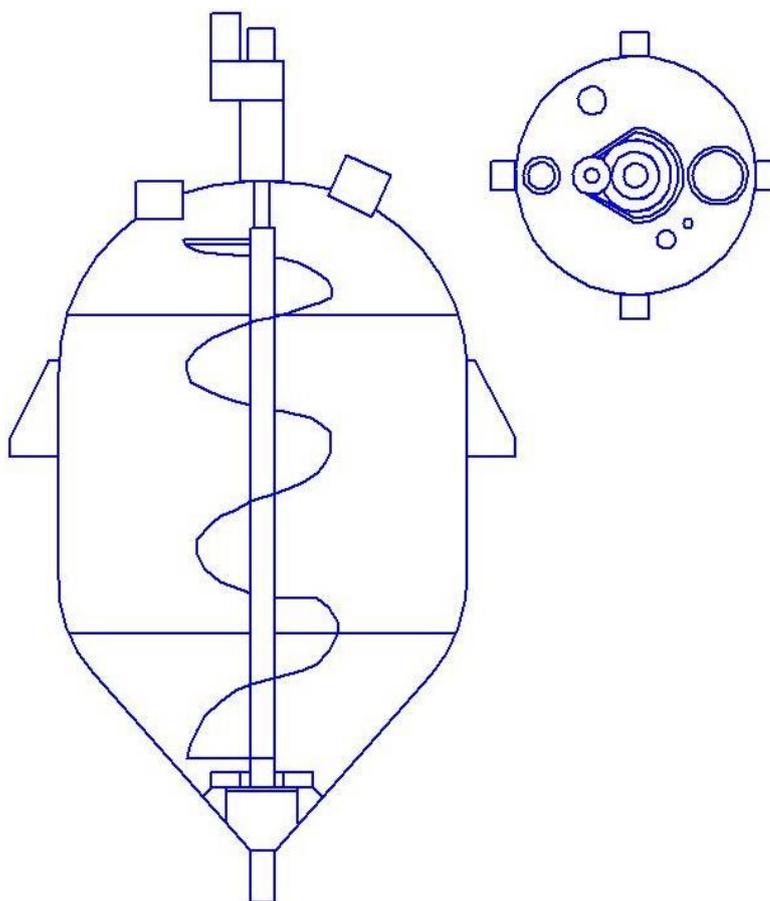


Рисунок 19 – Схема аппарата с мешалкой

Выводы к 3 разделу.

Предполагаемое использование вторично переработанного ПЭТ требует высокой степени чистоты. Засоренность в волокнах или бутылках не допускается из-за возникновения проблем с разрывом волокон и эстетических соображений.

Наличие этикеток может вызвать трудности при вторичной переработке ПЭТ, если она размельчается на мелкие частицы во время промывки и разделения. Из кусочков бумаги могут выделяться отдельные целлюлозные волокна, которые трудно удалить из перерабатываемого полимера.

ПАВ (поверхностно-активные вещества) могут оказывать влияние на процесс удаления компонентов этикеток от отходов ПЭТ флексы.

Для того, чтобы получить информацию по объемам расхода, поступающего на очистку материала и объемам получения конечного продукта очистки был произведен расчет материального баланса.

Данный расчет показал актуальность использования ПАВ в процессе очистки т.к при сравнении материального баланса предлагаемого улучшения процесса с материальным балансом уже существующего процесса было выявлено, что при использовании ПАВ количество очищенного продукта на 13% больше, а количество потерь, возникающих в процессе очистки на 10 % меньше.

Так же, для анализа тепловых процессов, осуществляющихся на производстве, был рассчитан тепловой баланс, который показал количество входящего и выходящего в процессе тепла 235 768,4 кДж.

Заключение

Технология удаления компонентов этикеток из вторичного сырья ПЭТФ является важным этапом переработки отходов и позволяет повысить качество и экономическую эффективность процесса.

В данной выпускной квалификационной работе была предложена оптимизация технологии очистки ПЭТФ от компонентов этикетки. Так же рассмотрена технологическая схема существующего процесса и предложена оптимальная технологическая схема.

Экспериментально было проанализировано влияние ПАВ на процесс очистки ПЭТФ от этикеток.

По результатам эксперимента было выявлено, что применение ПАВ комплексообразующих в процессе очистки ПЭТФ от этикеток и загрязнений дало положительные результаты. Масса ушедших загрязнений после очистки способом, используемым на ООО «ЭкоРесурсПоволжье» составила 0,1493 г. Масса ушедших загрязнений после добавления 1, 3 и 5 мл ПАВ составила 0,1503; 0,2253; 0,2430. Исходя из результатов эксперимента можно сделать вывод, что присутствие в процессе очистки ПАВ в количестве 2% привело к слабому положительному эффекту, а с ростом количества ПАВ в процессе очистки его положительное влияние возрастало.

Так же был произведен расчет материального баланса процесса, который показал актуальность использования ПАВ в процессе очистки т.к при сравнении материального баланса предлагаемого улучшения процесса с материальным балансом уже существующего процесса было выявлено, что при использовании ПАВ количество очищенного продукта на 13% больше, а количество потерь, возникающих в процессе очистки на 10 % меньше.

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты показывают, что предложенная оптимизация технологии удаления компонентов этикетки от отходов ПЭТФ является актуальной.

Список использованной литературы

1. Виды этикеток // Знай товар. [Электронный ресурс]. URL: http://www.znaytovar.ru/s/Vidy_etiketok.html (дата обращения: 22.03.2023).
2. Воздушный разделитель PZO VR1000. [Электронный ресурс]. URL: <https://p-z-o.com/periferiya/vozdushnyj-razdelitel-pzo-vr1000> (дата обращения: 18.04.2023).
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 научнопрактической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по естественным наукам. – Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2018. – с. 363–365.
4. Дорожкин В.П., Руденко А.А., Руденко А.А., Ярыгин Д.В. Использование полимерных отходов для создания нефтесорбентов // Молодой ученый. – 2018. – № 2.1 (136.1). – С. 8-11. [Электронный ресурс]. – URL: <https://moluch.ru/archive/136/39050/> (дата обращения: 25.03.2023).
5. Патент RU2139763C1 Способ мойки емкости и емкость Автор(ы): Патрис Робишон / [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2139763C1_19991020 (дата обращения 29.04.2023)
6. Патент RU245972C2 Устройство и способ для непрерывной мойки емкостей, изготовленных из пластика, а также для удаления загрязнителей и этикеток с их поверхностей. Автор(ы): Теруджи Пьерджоржио/ [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2465972C2_20121110 (дата обращения 29.04.2023)
7. Переработка отходов полиэтилентерефталата [Электронный ресурс]. - URL: http://www.recyclers.ru/modules/section/item.php?itemid=178__ (дата обращения: 22. 04. 2023)

8. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 (взамен ФККО 2016). Действует с 24 июня 2017. (в ред. Приказов Росприроднадзора от 20.07.2017 N 359, от 28.11.2017 N 566, от 02.11.2018 N 451) (в т.ч. с изменениями вступил в силу 08.12.2018).

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

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

11. Сахно Д.П., Тухватулина Р.Ф., Абржина Л.Л. Утилизация отходов из пластмассы. 2017. Р. 211–216.

12. Технологический процесс «Переработка ПЭТФ бутылок» ООО «ЭкоРесурсПоволжье», утвержденный 25.01.2020. – 15 с.

13. Технология пластических масс. Под ред. В. В. Коршака. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Химия, 1985 — 560 с,

14. Устройство отдиранья этикетки LR-500 (сухое и моющее исполнение). [Электронный ресурс]. URL: <https://ok-stanok.ru/shop/05735-otdiratel-etiketki> (дата обращения: 15.02.2023).

15. 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.

16. Утилизация отходов полимеров // Портал ОТХОДЫ.РУ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.waste.ru/modules/section/print.php?itemid=133> (дата обращения: 20.01.2023).

17. Файдюк И.С. Вторичная механическая переработка ПЭТ [Электронный ресурс]. URL: <https://engitime.ru/tehnologi/vtorichnayamexanicheskaya-pererabotka-pet.html> (дата обращения: 15.01.2023).

18. Шайерс Дж. Рециклинг пластмасс: наука, технологии, практика: Пер. с.англ. — СПб.: Научные основы и технологии, 2019. — 640 с
19. Шварц, Д. Отходы, упаковка и окружающая среда. – Рига, Латвия: Клуб защиты среды, 1995. 68 с.
20. Шнайдер, И.М. Проблема твердых бытовых отходов и пути ее решения // Академический вестник, 2002. № 1. — С.25-31.
21. Angel B. Polyester Fibres. The 23RD PCI Consulting Group European Polyester Industry Conference, 3 October, Berlin.
22. 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
23. 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.
24. 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.
25. Jayanarayanan K., Thomas S., Joseph K. Morphology, static and dynamic mechanical properties of in situ microfibrillar composites based on 79 polypropylene/poly (ethylene terephthalate) blends // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2008. Vol. 39, № 2. P. 164–175.
26. Karayannidis, G. P., Kokkalas, D. E. and Bikiaris, D. N.J. Appl. Polym. Sci., 50, 2135 (2020).
27. 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

28. PET bottles recycling waste – utilization and properties. MajaRujnićSokele, Mladen Šercer, Ana Pilipović, 12th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2008, Istanbul.

29. Recycling of PET, 2005, Firas Awaja, Dumitru Pavel, European Polymer Journal 41, 1453–1477, URL: <http://www.elsevier.com/locate/europolj> (дата обращения 25.04.2023).

30. 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.