

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
«Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Т. А. Кулагина

подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность»

«Разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов»

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

канд. техн. наук

И.В. Андруняк

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д.И. Гелемеева

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Е.Н. Зайцева

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
Кафедра «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Т. А. Кулагина  
подпись  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме бакалаврской работы

Студенту: Гелемеевой Дарье Игоревне

Группа ФЭ 15-10Б Направление (специальность) 20.03.01 «Техносферная  
безопасность»

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка схемы  
получения готового изделия из пластиковых отходов»

Утверждена приказом по университету: № 18983/с от 17 декабря 2018 г.

Руководитель ВКР: И.В. Андруняк, канд. техн. наук

Исходные данные для ВКР: исследовательские и научные статьи,  
технологическая инструкция, нормативная, справочная и другая литература.

Перечень разделов ВКР: Введение. Общие сведения о пластиковых  
отходах. Утилизация полимерных материалов. Выбор метода переработки.

Метод грануляции пластмасс. Расчет образования и рассеивания  
загрязняющих веществ. Заключение. Список использованных источников.

Перечень графического и иллюстрационного материала с указанием  
основных чертежей, плакатов:

Лист 1. Морфологический состав ТКО в России, структура пластиковых  
отходов по видам полимеров, маркировка типов пластика.

- Лист 2. Общая информация о переработке отходов пластика.  
Лист 3. Продукция, производимая из переработанного пластика.  
Лист 4. Технологическая схема производства вторичных гранул из  
пластиковых отходов.  
Лист 5. Ситуационная карта местности с изолиниями равных концентраций  
загрязняющих веществ.

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись

И.В. Андруняк

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

Д.И. Гелемеева

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

## КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК выполнения ВКР

Наименование и содержание этапа	Срок выполнения
Сбор и анализ исходной литературы и документации	11.05.2019 – 23.06.2019
Постановка основной задачи, освоение расчетных методик	24.06.2019 – 28.06.2019
Выполнение расчетов, оформление результатов, составление выводов	29.06.2019 – 01.07.2019
Работа над нормативно-правовой базой, оформление расчетно-пояснительной записки	02.07.2019 – 04.08.2019
Графическое оформление чертежей	05.07.2019 – 07.07.2019
Оформление прочей документации	08.07.2019 – 17.08.2019

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись

И. В. Андруняк

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

Д.И. Гелемеева

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов» содержит 112 страниц, включает 40 таблиц, 32 рисунка, 25 литературных источников и 5 листов графического материала.

ПЛАСТИК, ПОЛИМЕРЫ, ОТХОДЫ ПЛАСТИКА,  
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ, ГРАНУЛЯНТ, ВТОРИЧНОЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ, ПЕРЕРАБОТКА.

Объект исследования: пластиковые отходы, методы переработки пластиковых отходов.

Цели работы:

- изучение общих сведений о пластиковых отходах;
- изучение методов утилизации;
- выбор доступной и выгодной технологии переработки отходов пластика;
- подробное ознакомление с выбранным методом переработки и разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы подробно рассмотрены виды пластиковых отходов, методы и направления их переработки, а также тенденции развития в России этой отрасли.

Конечным результатом работы стала разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов с подробным описанием необходимого оборудования и основных этапов производства.

## АННОТАЦИЯ

Бакалаврская работа на тему: «Разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов» ВКР выполнена на 112 страницах, включает 40 таблиц, 32 рисунка, 5 графических материалов и 25 литературных источника.

Целью работы является разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов.

Во введении раскрывается актуальность бакалаврской работы по выбранному направлению, ставится цель работы.

В первой главе рассказывается о пластиковых отходах и их видах.

Во второй главе описываются существующие и новейшие методы утилизации отходов пластика, а также приводятся сведения об уровне развития данной отрасли в России.

В третьей главе описывается и обосновывается выбор метода переработки пластикового сырья.

В четвертой главе приведены подробные сведения о выбранном методе грануляции пластмасс, и основных этапах и оборудовании, необходимом для производства вторичных гранул, а также описана технологическая линия получения вторичных гранул из пластиковых отходов.

В пятой главе производится расчет образования и рассеивания загрязняющих веществ, образующихся на производстве при получении гранулянта из отходов пластика.

В результате выполнения работы были подробно рассмотрены виды пластиковых отходов, методы и направления их переработки, а также тенденции развития в России этой отрасли; разработана и разобрана схема получения готового изделия из пластиковых отходов с подробным описанием необходимого оборудования и основных этапов производства.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	9
1 Общие сведения о пластиковых отходах.....	11
2 Утилизация полимерных материалов .....	18
2.2 Переработка пластиковых отходов различными видами живых организмов .....	25
2.3 Переработка отходов пластмасс в России и за рубежом .....	30
3 Выбор метода переработки .....	36
4 Метод грануляции пластмасс.....	40
4.1 Основные этапы и оборудование для производства вторичных гранул пластика .....	44
4.2 Разработка технологической линии получения готовых вторичных гранул из пластиковых отходов.....	49
5 Расчет образования и рассеивания загрязняющих веществ .....	70
5.1 Расчет выбросов загрязняющих веществ при операциях дробления полимерных материалов.....	70
5.2 Расчет выбросов ЗВ при гранулировании полимерного материала .....	72
5.3 Расчет загрязняющих веществ от упаковки готовых гранул в термопленку .....	74
5.4 Расчет рассеивания загрязняющих веществ от точечного источника выбросов в атмосферу.....	79
5.4.1 Подбор и расчет системы вентиляции .....	79
5.5 Расчет максимальных приземных концентраций загрязняющих веществ .....	90
5.6 Расчет расстояния, на котором наблюдается максимальная приземная концентрация .....	96
5.7 Расчет опасной скорости ветра.....	97
5.8 Обоснование принятого размера санитарно-защитной зоны.....	97

5.9 Расчет приземной концентрации вредных веществ в атмосфере на различных расстояниях от источника выброса.....	98
5.10 Расчет приземной концентрации загрязняющих веществ с учетом фоновой концентрация вредных веществ в атмосфере.....	101
5.11 Расчет приземной концентрации загрязняющих веществ в долях ПДК .....	105
Заключение .....	108
Список использованных источников .....	110



## ВВЕДЕНИЕ

Пластики являются уникальными материалами, пришедшими на смену бумаге (картону), металлам и стеклу, прочно укрепившимися во всех сферах жизни человека. Ныне уже и нельзя представить жизнь без пластика. Из пластика в наши дни производится наиширочайший спектр разного рода товаров: от детских игрушек и упаковок пищевых продуктов, до медицинских принадлежностей и деталей различного рода машин и установок.

Уникальность синтетических полимеров заключается в их свойствах, благодаря которым спрос на такие товары непрерывно растет. К числу их ценных свойств относятся низкая электрическая и тепловая проводимость, пластичность, легкость, высокая устойчивость к агрессивным средам, исключительная прочность, весьма низкая степень деградации в естественных условиях и сравнительно малая стоимость.

Изобретение пластмассы относится к концу XIX века. Однако широкое производство и потребление началось с 1950 года, после Второй мировой войны, когда существенно ощущалась нехватка природных материалов, и активно велся поиск синтетических альтернатив; что привело к стремительному росту объемов производства пластиковых изделий, продолжающемуся и по сей день и значительно опережающему возможности утилизации данного вида материала.

За последние 9 лет в России наблюдались стремительные темпы роста производства базовых полимеров (полиэтилентерефталата, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, полиэтилена). Их выпуск увеличился на 56%, а спрос на 18,5%. Суммарные мощности производства полимеров составляют 5,6 млн т.

В то же время такой рост производства тесно сопряжен с образованием огромных объемов полимерных отходов. Вышедшие из эксплуатации пластики в основном подвергаются захоронению, однако, в силу своих особенных свойств, практически не разлагаются, и происходит засорение окружающей среды. Ввиду чего остро встают вопросы утилизации пластиковых отходов.

Отношение к утилизированным полимерам как к вторичному сырью является наиболее перспективным и позволяет решать не только экологические, но и социальные и экономические проблемы.

Существуют технологии переработки всех полимеров без исключения, однако, для полноценного функционирования системы перерабатывающих предприятий в России созданы ещё не все условия. Культура сортировки и последующей переработки мусора только зарождается, пока нет массового осознания важности таких действий. Тем не менее, уже сейчас принимаются весьма жесткие изменения в российском законодательстве, согласно которым производители обязаны нести расширенную ответственность за производимые продукты.

Данная работа посвящена поиску доступных, эффективных и максимально выгодных технологий переработки отходов пластика с точки зрения экологии. Целью работы является создание характеристики основных способов утилизации; выбор метода переработки, подробное ознакомление и разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов.

## **1 Общие сведения о пластиковых отходах**

Отходы – это остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, иных изделий или продуктов, которые, не являясь конечной целью производственного процесса, образовались при получении готовой продукции, или же полностью или частично утратили свои потребительские свойства.

В процессе производства и потребления образуется большое количество отходов, которые при соответствующей обработке могут быть вновь использованы как сырье для производства промышленной продукции [1].

Пластики или пластмассы являются материалами органическими, в основе которых лежат природные или синтетические высокомолекулярные соединения – полимеры – вещества, молекулы которых (макромолекулы) состоят из большого числа регулярно или нерегулярно повторяющихся структурных единиц (звеньев) одного или нескольких типов. В процессе формования такие материалы пластичны, а затем переходят в твердое состояние – стеклообразное или кристаллическое [2]. В настоящее время, термин «пластик» используется для обозначения любого коммерческого полимерного материала, отличного от волокон и эластомеров.

Пластики обладают такими свойствами как прочность, легкость, долговечность, нечувствительность к влажности, чрезвычайно низкими тепловой и электрической проводимостями. Именно потому они так незаменимы в промышленности, а также доставляют множество трудностей при неправильной утилизации. Представленный на рисунке 1 полимер – полиэтилентерефталат (ПЭТ) – используется в основном для производства одежды и тары для напитков. Помимо полимера в состав пластмасс часто входят различные добавки: наполнители, пластификаторы, красители.

Наполнители являются порошкообразными, волокнистыми, сетчатыми веществами органического или неорганического происхождения, повышающими механические свойства, снижающими усадку при прессовании

полуфабриката, придающими материалу необходимые свойства, к примеру, термостойкость или высокое электрическое сопротивление.

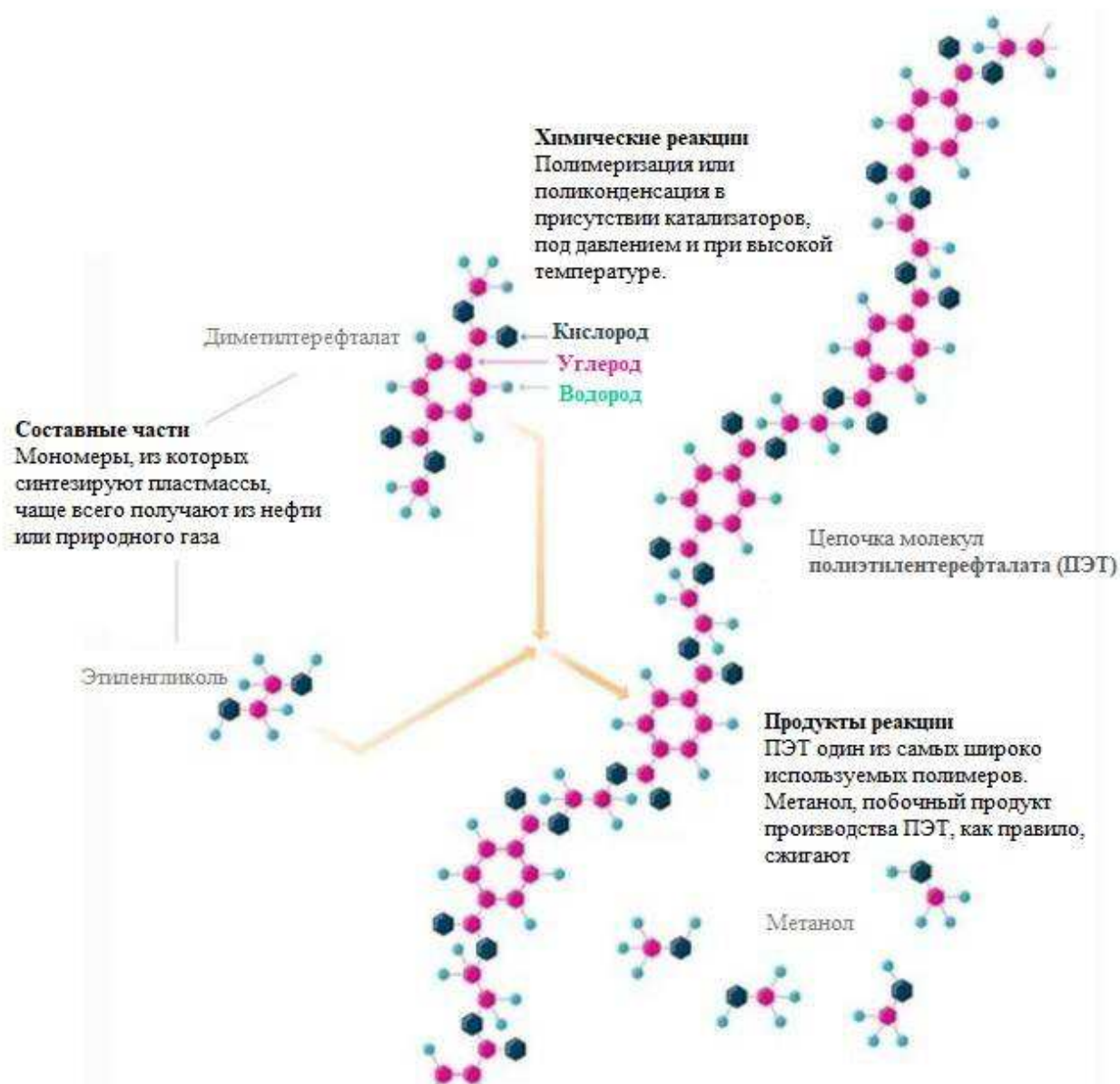


Рисунок 1 – Полимер полиэтилентерефталат (ПЭТ)

Связки – это синтетические смолы, эфиры, целлюлоза.

Пластификаторы добавляют в пластмассу для повышения эластичности и облегчения обработки. Такими веществами могут являться олеиновая кислота, стеарин, дибутилфторат и прочие.

Отвердители – катализаторы процесса отверждения (амины) [3].

Большинство пластиковых упаковок производится из шести видов пластмасс:

- полиэтилентерефталат (РЕТ);
- полиэтилен высокой плотности (ПЭВП);
- поливинилхлорид (ПВХ или винил);
- полиэтилен низкой плотности (ПЭНП);
- полипропилен (РР) и полистирол (РS).

Современные технологии позволяют осуществлять переработку практически всех видов пластика. Чтобы узнать, из чего сделано изделие, следует обратиться к маркировке, указывающей тип пластика, используемого в его производстве.

Для удобства переработчиков Ассоциация переработчиков пластмасс (Plastics Industry Trade Association) тридцать лет назад приняла систему идентификационных кодов. А несколько лет назад была разработана единая система маркировки изделий из пластмассы. Знак маркировки за эти годы претерпел некоторые изменения и в настоящее время представляет собой четким равнобедренный треугольник с цифрой внутри. Под треугольником – буквенная аббревиатура, обозначающая тип пластика.

Таким образом, стандартом каждому виду пластмассы было назначено одно число от 1 до 6. Цифра 7 подразумевает «другой материал» и означает, что данный продукт изготовлен из материала не из основного списка. Это сделано по требованиям законодательства некоторых стран, чтобы все упаковки были промаркированы.

Коды переработки – специальные знаки, применяются для обозначения материала, из которого изготовлен предмет, и упрощения процедуры сортировки перед его отправкой на переработку для вторичного использования [4].

Согласно [5] существует 7 таких кодов:

- РЕТ (РЕТЕ) или ПЭТ (ПЭТФ) – полиэтилентерефталат – самый распространенный тип пластика. Обозначается цифрой «1». Из него делают бутылки напитков, кетчупов, технических жидкостей, растительного масла,

косметических средств, а также моющих и очищающих типов жидкостей. Производство пластика PET не требует особых затрат, благодаря чему он активно применяется и хорошо поддается вторичной переработке. Использовать такой вид пластика можно лишь раз. При повторном использовании бутылка или коробка выделяет опасное вещество – фталат (токсичен, способен вызывать серьезные болезни нервной и сердечно-сосудистой системы). Не подходит для длительного хранения и небезопасен при нагревании. Кроме того, из использованных ПЭТ-бутылок получают дефицитные мономеры – диметилтерефталат и этиленгликоль. Впоследствии их вновь используют для производства бутылок, посредством синтеза ПЭТФ заданной молекулярной массы и структуры.

- PEHD (HDPE) или ПЭНД – высокоплотный полиэтилен низкого давления. Обозначается цифрой «2». Этот вид устойчив к температурным воздействиям (до 120–130 °С) и используется при изготовлении пластиковых пакетов, одноразовой посуды, пищевых контейнеров, канистр, бутылей, пакетов для молока, всевозможных видов шампуней и тары для моющих и чистящих средств. Хорошо поддается переработке, пригоден для вторичного использования. Относительно безопасен, однако при захоронении может выделять формальдегид (токсичное вещество, которое поражает нервную, дыхательную и половую системы, может вызвать генетические нарушения у потомства).

- PVC или ПВХ – поливинилхлорид. Этот вид пластика используется в технических целях и в маркировке обозначается цифрой «3». Из него делают большинство емкостей, не предназначенных для контакта с пищей, мебель и элементы декора, канализационные трубы. ПВХ относительно невосприимчив к прямым солнечным лучам и погоде, поэтому из него также часто делают оконные рамы и садовые шланги. Переработке и вторичному использованию не подвергается. Для применения пищевой упаковки его использование запрещено. Пластик содержит бисфенол А, винилхлорид, фталаты, а так же

может содержать кадмий. Один из самых опасных видов пластмассы. При сжигании выделяет в воздух очень опасные яды — канцерогенные диоксины.

- LDPE (PELD) или ПЭВД – низкоплотный полиэтилен высокого давления. Обозначается цифрой «4». Из него делают пакеты, мешки для мусора, пищевую плёнку, гибкие ёмкости. Допускается контакт с пищей. Поддается переработке и вторичному использованию. Выдерживает нагревание до 110°C.

- PP или ПП – полипропилен. Прочный, химически инертный и термостойкий вид пластика. Из него изготавливают пищевые контейнеры, шприцы, сахарные мешки, бытовые приборы и детские игрушки. Из него же изготавливают трубы для горячего водоснабжения. Сравнительно безопасен, но при некоторых обстоятельствах может выделять формальдегид. Перерабатывается и используется вторично. Обозначается цифрой «5».

Структура пластиковых отходов в России на 2018 год по видам полимеров представлена на рисунке 2 [3].



Рисунок 2 – Структура пластиковых отходов по видам полимеров

- PS или ПС – PS (ПС) – полистирол – это недорогой, легкий и достаточно прочный вид пластика. Обозначается цифрой «6». Из него сделаны стаканчики для йогурта, мясные лоточки, коробочки под овощи и фрукты, сэндвич-панели, канцтовары, теплоизоляционные плиты. При повторном использовании выделяет стирол, который является канцерогеном. При нагревании полистирол выделяет опасные химические соединения. Может подвергаться вторичной переработке.

- O (OTHER) ПРОЧЕЕ – такая маркировка означает, что упаковка состоит из какого-либо другого вида пластика или из их смеси. Маркированный подобным знаком переработки мусор отправляется на мусоросжигательные заводы и вторичной переработке не подвергается.

Далее в таблице 1 представлена краткая информация о международных универсальных кодах переработки пластмасс.



Таблица 1 – Международные универсальные коды переработки пластмасс [4]

Знак	Идентификатор материала		Описание	Использование
	ISO 1043 (97/129/EC)	ГОСТ 24888-81		
	1 PET	ПЭТФ	Полиэтилентерефталат (лавсан)	Полиэстер, бутылки для напитков
	2 PEHD (HDPE)	ПЭНД (ПНД, ПЭВП)	Полиэтилен высокой плотности (низкого давления)	Пластиковые бутылки, пакеты, мусорные вёдра
	3 PVC	ПВХ	Поливинилхлорид	Оконные рамы, бутылки для химических продуктов, покрытия для полов, изоляция (электротехника) электрических проводов
	4 PE-LD (LDPE)	ПЭВД (ПВД, ЭНП)	Полиэтилен низкой плотности (высокого давления)	Пакеты, вёдра, трубы, крышки
	5 PP	ПП	Полипропилен	Автомобильные бамперы, внутренняя отделка автомобилей, корпуса электроинструмента, упаковка из-под шоколадок, макарон, пластиковые стаканчики
	6 PS	ПС	Полистирол	Игрушки, одноразовая посуда, цветочные горшки, видеокассеты, чемоданы, одноразовые стаканчики
	7 O (OTHER)		Остальные виды пластика	Полиуртан, поликарбонат, полиамиды, полиакрилонитрили и др., биопластики

## 2 Утилизация полимерных материалов

На сегодняшний день производится около 150 видов пластиков различного назначения, необходимых для удовлетворения различных нужд сельского производства, техники, быта или торговли. Свойства полимерных материалов настолько ценны, уникальны и по-своему удобны, что пластики стали неотъемлемой необходимой частью во всех сферах жизни человека. Тем не менее, несмотря на все положительные моменты, присутствует у данных синтетических материалов и весьма слабая с точки зрения экологии сторона: в силу обладания специфическим набором особенностей они, выполнив свое основное назначение, продолжают существование в виде отходов, срок естественного разложения которых может достигать 100 лет и более, и порой, они даже не подвергаются разложению, гниению; а при их сжигании выделяются токсичные вещества, вредные для окружающей среды и здоровья человека. Таким образом, остро встают вопросы по утилизации и переработке пластических масс [6].

Стоит понимать, что специфических проблем, связанных с переработкой отходов пластика достаточное количество, однако они не могут считаться неразрешимыми. Кроме того, возможность использования таких отходов, скрывает за собой богатые запасы сырьевых и энергетических ресурсов, а также значительную экономию сырья первичного (такого как нефть) и электроэнергии.

Согласно источнику [7] возможно деление отходов полимеров на три группы:

- отходы производства технологические. Образуются при переработке и синтезе термопластов. Такие отходы возможно переработать в различного рода изделия, подлежащие к использованию в форме добавок к исходному сырью. Технологические отходы производства подразделяются на устранимые и неустраиваемые. Устранимые формируются из-за несоблюдения в процессе синтеза и переработки технологических режимов, то есть они суть есть технологический брак, который можно устранить или удалить вовсе.

Неустранимые же отходы являют собой разнообразные высечки или кромки, а также обрезки и прочее. Таких отходов образуется от 5% вплоть до 35% в отраслях промышленности, связанной с производством или переработкой пластических масс. То есть это сырье высокого качества, обладающее свойствами исходного первичного пластика. Оно не требует специального оборудования и перерабатывается сразу на том же предприятии, где образовалось. К примеру, почти полностью возможно переработать отходы производства труб и листов из полиолефинов (ПЭ, ПП), а также отходы литьевых изделий (литники), или же отходы производства пленки из ПЭ и ПП (до 80%). Отходы вакуумформования из ПС переработать куда как сложнее, а отходы производства литья из пластикатов ПВХ, вакуум формованные изделия из жесткого ПВХ – практически не перерабатываются;

- отходы производственного потребления. Образуются при повреждениях и поломках изделий из пластических масс, служащих в различных отраслях народного хозяйства. Это могут быть различного рода мешки, детали машин, отходы сельскохозяйственной пленки, тара, инструменты, упаковка, амортизированные шины и прочее. Данная категория отходов считается преимущественно слабозагрязненной, в большей степени однородной, а значит, относительно готовой к переработке, ведь в таком случае предполагается наименьшая затрата ресурсов;

- отходы общественного потребления. В своей совокупности представляют отходы, аккумуляция которых происходит в жилых домах или же на предприятиях общественного питания, попадающие в итоге на городские свалки, где им присваивается новая категория – отходы смешанные. Состав таких отходов представлен в таблице 2.

Вторичная переработка является также физическим методом переработки пластика и включает в себя механическую переработку, являющуюся наиболее предпочтительным способом восстановления пластмасс, так как при этом сохраняется максимальное количество ценного сырья. Однако, в силу различных факторов наподобие деградации свойств или загрязнения, такой способ часто

ограничен. Иногда вторичная переработка может подразумевать некоторую химическую модификацию, ко-экструзию (совмещенную экструзию, с получением продукта, сочетающего в себе два и более разнородных материала) и ко-инжекцию (инжекция атомарного пучка по току плазмы).

Таблица 2 – Виды изделий из полимеров, входящих в смешанные отходы [6]

Наименование отходов	Виды полимерных отходов
Отходы полнолефинов (до 50% по массе):	
ПЭНД	Тара, емкости для хранения сыпучих продуктов, ведра, тазы, игрушки, мебельная фурнитура
ПЭВД	Сельскохозяйственная пленка, хозяйственные мешочки, скатерти, пленочные материалы
ПП	Упаковочная пленка для пищевых, кроме молочных продуктов, тара для технических жидкостей и реактивов
Отходы полистирольных пластиков:	
Блочный и ударопрочный ПС	Одноразовая посуда, авторучки, упаковка для молочных продуктов, баки, решетки, вешалки, шашки, шахматы, шкатулки, вазы
Сополимеры стирола	Детали облицовки интерьера, детали различной аппаратуры
Вспененный ПС	Упаковки радиоприборов, аудиотехники, посуды, холодильников, теплозвукоизоляционные материалы
Отходы поливинилхлорида:	
Пластикат	Покрытия для полов, стен, мебели, различные искусственные кожи, пленка, литьевые изделия
Винилпласт	Отделочные материалы, кровельные листы, оконные переплеты, упаковочный материал (сосуды, контейнеры, флаконы
Отходы полиуретана	
Формование и литьевые изделия	
Отходы полиамида	Текстильные материалы (трикотажные, чулочно-носочные изделия и др.), специальные текстильные материалы (подворотничковая ткань, нетканые материалы)
Отходы полиэтиленталата	Бутылки с затворами и без них (с типичными остатками содержания бутылок, с этикетками из бумаги с водорастворимым или нерастворимым клеем), различных цветов и типов.

Далее идет чуть более подробная информация о вторичной переработке.

Механическая переработка термопластов включает следующие этапы механической переработки:

- сбор – включает в себя сбор отходов из мусорных корзин и непосредственно с промышленных предприятий;
- ручная сортировка – собранные пластмассы сортируются в соответствии с их типом с помощью обозначений маркировки на них;
- измельчение – отсортированные пластмассы помещаются в аппараты, которые разбивают их на мелкие частицы, пластиковые пакеты измельчаются;
- промывка – здесь непластичные загрязнения, такие как этикетки, клеи, удаляются путем промывки в емкости для абразивного перемешивания, а моющий раствор содержит щелочные катионные соединения, которые активно удаляют пятна и этикетки;
- очищенные и отколотые гранулы пластмассы затем расплавляются и пропускаются через экструдер, который превращает его в трубки, похожие на лапшу, которые затем нарезаются на поддоны. Поддоны используются для изготовления новых пластмассовых изделий.

Третичная переработка или, как иначе говорят, «сырьевая». К данному виду переработки относятся все технологии использующие управляемые химические реакции. Такой подход превращает выброшенные пластмассы в ценные запасы нефтехимического сырья или топлива. Восстанавливается большая часть отходов, чем при сжигании; а ряд ограничений, присущих механической переработке и вовсе отсутствует.

К видам третичной переработки относятся:

- химическая переработка – это расщепление полимера в результате реакции с определенными химическими агентами, что приводит к образованию олигомеров или исходных мономеров, которые идентичны мономерам первичных полимеров, пригодных для чистых однокомпонентных пластиковых отходов, применимых при конденсации полимеров, таких как поликарбонаты, полиамиды, полиэферы и прочее;

- конденсационная полимеризация, также именуемая конденсацией или поликонденсацией. Является химическим процессом с выделением низкомолекулярных веществ вроде воды, когда меж мономерными единицами образуются главные валентные связи, в итоге образующие полимерную структуру;

- варианты химиолиза:

а) гликолиз – самый простой и древний метод деполимеризации ПЭТ протекает при 180 – 240°C с избытком низкомолекулярного метилен гликоля, этиленгликоля, пропиленгликоля, требуется катализатор цинк или ацетат лития;

б) метанолиз – реакция происходит при давлении ниже 20 – 40 атмосфер и температуре 180 – 280°C метанолом, для чего требуются катализаторы, такие как ацетаты цинка, кобальта, магния или же диоксид свинца. Основными конечными продуктами такого процесса являются этиленгликоль и диметилтерефталат (ДМТ);

в) сверхкритический метанолиз – реакция протекает при давлении 80 атмосфер и температуре 300°C;

г) гидролиз – химический процесс, когда ПЭТ, добавленный с водой, на выходе дает терефталевые кислоты (ТРА) и этиленгликоль, реакцию проводят при различных значениях рН. Процесс протекает при температуре 25 – 100°C с продолжительностью всего несколько минут при атмосферном давлении;

д) аммонолиз – наименее исследованный метод. Реакция происходит при высокой температуре (70 – 180°C) и низком давлении при добавлении аммиака и, в основном, в присутствии этилена. Реакция может быть катализирована ацетатом цинка. Продуктом деградации являются те же терефталевые кислоты;

е) амиолиз – деполимеризация, с образованием амидов ТРА и этиленгликоля, базирующаяся на реакции с первичными аминами, такими как этиламин, метиламин, в температурном диапазоне от 20 до 100°C.

В настоящее время в большей степени используются комбинированный подход к использованию вышеперечисленных вариантов. То есть новые методы переработки отходов пластика состоят из уже нескольких этапов,

объединяющих разные типы переработки: гликолиз-гидролиз, гликолиз-метанолиз и так далее. Но в основном ведущие позиции по обработке пластиковых отходов на ряде промышленных предприятий занимают методы метанолиза и гликолиза;

- термолиз или термическая деполимеризация – это процесс с использованием гидроокиси для восстановления отходов пластмассы в легкую нефть: под воздействием давления и высокотемпературного нагрева длинные углеводородные полимеры разлагаются на углеводороды с короткой цепью с максимальной длиной около 18 атомов углерода. Варианты реакций:

а) пиролиз – физическое и химическое разложение органических материалов при повышенных температурах (400 – 1000°C) при низком давлении кислорода) с целью производства основных химикатов и топлива, а также полукочка из отходов пластмасс, пиролизатор испаряет пластик и образующийся газ конденсируется с получением бензина, дизельного топлива и мазута. Кроме того возможно получение на выходе различного вида сырья, полуфабрикатов, которые будут использоваться в производственных процессах; а также получение мономеров, применяющихся для синтеза полимеров. Пиролиз уменьшает объем отходов на 90% и более и не вызывает загрязнения воздуха, не требует больших площадей и позволяет получать высококалорийное топливо, а также различные сложные смеси жидких, твердых и газообразных продуктов. Жидкие продукты могут использоваться для получения теплоносителей, а газообразные – в качестве топлива для получения рабочего водяного пара.

Ввиду обратимости реакций образования, многие полимеры могут снова разлагаться до мономеров – исходных веществ. В таблице 3 представлены сведения о выходе мономеров при пиролизе некоторых полимеров.

Таблица 3 – Выход мономера при пиролизе полимеров

Полимер	ПС	ПЭ	ПП	ПЭТ
Процент мономера	42	10	2	100

б) газификация – это частичное окисление или неполное сгорание углеродистых материалов, преимущественно содержащих смесь монооксида углерода и водород. Иначе газификацию называют «синтез-газ». Газификация используется в качестве заменителя топлива для существующих промышленных котлов, для производства пара и преобразования химических веществ в метанол, аммиак и другие химические вещества, для сжижения в транспортное топливо, такое как дизельный бензин и реактивное топливо, и для метанизации, такой как синтез природного газа. Газификация имеет много преимуществ, таких как эффективная обработка смешанных пластиков, отсутствие опасных тяжелых металлов и значительное снижение потребления энергии, а из-за высокого давления выделяются менее токсичные газы. А за последние два десятка лет газификация развивалась в сторону получения ценных химических веществ как из биомассы продуктов и органических твердых остатков. На данном этапе развития газификация считается эффективной обработкой для деградации полимерных отходов;

в) гидрирование (гидрокрекинг) – является каталитическим процессом, при котором отходы пластика (ПЭ, ПП, ПС) нагревают водородом для получения метана, этана, пропана, бензина, дизельного топлива, смазочного масла, в то время как ПВХ гидратируют и смешивают со смесью хлороводорода и сульфид натрия для производства хлорида натрия. Гидрокрекинг полимерных отходов является потенциально интересной альтернативой для разрушения полимерных цепей. Кроме того, водород способствует удалению гетероатомов (Cl, N и S), которые могут присутствовать в полимерных отходах. Однако гидрирование обладает несколькими недостатками. Главным образом – это стоимость водорода и необходимость работать при высоких давлениях.

Четвертичная переработка. Здесь речь идет о сжигании отходов пластика. Полезно извлекать энергию из пластмасс, используя пластмассы в качестве источника энергии для производства пара, а затем электричества. Сжигание весьма эффективно как способ уничтожения больших объемов утилизированных



пластиков, однако при сжигании во-первых, практически не извлекаются полезные продукты из мусора, а во-вторых, выделяется намного большее количество токсичных остатков, чем при термическом разложении, так как сжигание происходит в сильно окисляющей среде, в то время как газификация требует восстановительной среды. Однако, конечно, стоит учесть – при газификации выделяется угарный газ с водородом. Данный метод переработки чрезвычайно привлекателен из-за отсутствия необходимости производства сортировки отходов и непрерывного роста цен на органическое топливо. Использование в виде топлива одной тонны предварительно подготовленных смешанных полимерных отходов сохраняет 1,4 т угля. Ранее, в десятых годах двадцать первого века широко было распространено мнение о высокой опасности загрязнения окружающей среды супертоксиантами из-за сжигания отходов пластических масс, однако, оно имело место быть ввиду применения ныне уже устаревших мусоросжигательных установок. Ныне, при использовании современных установок эти вещества под воздействием повышенных температур (1200 – 1400°C) необратимо распадаются, а адсорбирующие фильтры поглощают неразложившуюся часть. Выбросы диоксинов достигают всего 0,6 мкг на тонну. При сжигании тонны каменного угля выделяется 1 – 10 мкг диоксина.

## **2.2 Переработка пластиковых отходов различными видами живых организмов**

Сравнительно недавно ученые разных стран стали находить принципиально новые способы переработки пластика. Биологическое разложение пластикового мусора стало настоящим прорывом.

До 2007 года миру не был известен ни один организм или микроорганизм, способный деградировать пластики или использовать их для поддержания своего роста. Однако в этом году немецкие ученые обнаружили – нитчатые грибы *Fusariumoxysporum* и *F. Solani* способны расти на минеральной среде, содержащей нити полиэтиленфталата. Причем ПЭТ, обработанный ферментом

из *Fusariumoxysporum* показал значительно более высокий рост гидрофильности по сравнению с полиэтилентерефталатом, обработанным ферментом из *F. solani*[8].

Группа биохимиков из Йельского университета пришла к открытию, что обитающий в тропических джунглях Эквадора эндофитный гриб *Pestalotiopsismicrospora* способен питаться, переваривая полиуретановые пластмассы. Причем они также установили: гриб способен разлагать не только твердые пластиковые предметы, но даже жидкие, а кроме того синтетические волокна различного вида, содержащиеся в одежде. Грибы сохраняют способность к разложению пластмасс и в кислородной и в бескислородной среде. Учеными было объявлено, что из данного гриба им удалось выделить вырабатываемый им фермент из класса серин-гидролаз. Именно с помощью этого фермента и происходит разложение полиуретанов [9].

Еще чуть позже учеными из Китая и Кении было выяснено: Плесневый гриб *Aspergillustubingensis* также способен к разложению пластика: он растет на пластмассовых поверхностях и выделяет посредством собственного мицелия разрушительные для химических связей в полимерах ферменты. Он изображен на рисунке 3. Ученые установили: гриб разлагает пластмассу за несколько недель. А на скорость разложения существенно влияет температура и кислотно-щелочной баланс [10].



Рисунок 3 – Плесневый гриб *Aspergillustubingensis*

Помимо всего, Американские ученые совместно с китайскими сделали открытие: пенопласт могут перерабатывать гусеницы мучных хрущаков (*Tenebrio molitor*). Это было выяснено посредством эксперимента: в течение двух недель в стеклянных колбах с заключенными в них гусеницами по 40 штук и 6 граммами пенопласта измерялся уровень  $\text{CO}_2$ . За две недели личинки поедали около 1/4, и из съеденной массы 48% преобразовывалось в углекислый газ, а 49% – выделено; остальная же масса преобразовывалась в энергию и массу тела гусениц. П посредством исследования установлено: пенопласт деградирует в процессе переваривания. Ученые добавили в рацион личинок антибиотики, что привело к полной остановке процесса переваривания пенопласта, что означало: за его переработку в ответе бактерии, живущие внутри личинок. После чего был проведен еще ряд исследований, по окончании которых из червей были выделены 13 культур бактерий, которых выращивали на подкормке из пенопласта. Наилучших успехов добились с бактериями *Exiguobacterium*[11].

В Японии в 2016 году был выведен новый вид бактерий, разлагающих полиэтиленфталат учеными из Киотского института технологии и Университета Кэйо [12]. В ходе исследования на заводе по переработке ПЭТ-бутылок было отобрано 250 загрязненных отходами пластика проб почвы, сточных вод и активного ила с территории завода по переработке пластиковых бутылок в портовом городе Сакаи, после чего произведен отбор микроорганизмов, растущих на ПЭТ-пленке. В результате чего был обнаружен новый вид бактерий: *Ideonellasakaiensis* 201-F6 – граммотрицательная аэробная бета-протеобактерия, использующая полиэтилен ПЭТ как основной источник энергии для себя. При росте данной бактерии происходит сильное повреждение ПЭТ-пленки и в течение 6 недель при температуре 30°C пленка почти полностью исчезает. Приведенный ниже рисунок 4 является иллюстрацией данного процесса. Выяснилось, бактерии в две стадии гидролизуют полимер: на первой превращая его в низкомолекулярное вещество – моногидроксиэтиловый эфир терефталевой кислоты. Данное превращение возможно за счет фермента, названного учеными

ПЭТазой. На второй стадии осуществляется разложение мономера с помощью другого фермента – МЭТазы. Конечным продуктом разложения является терефталевая кислота и этиленгликоль.

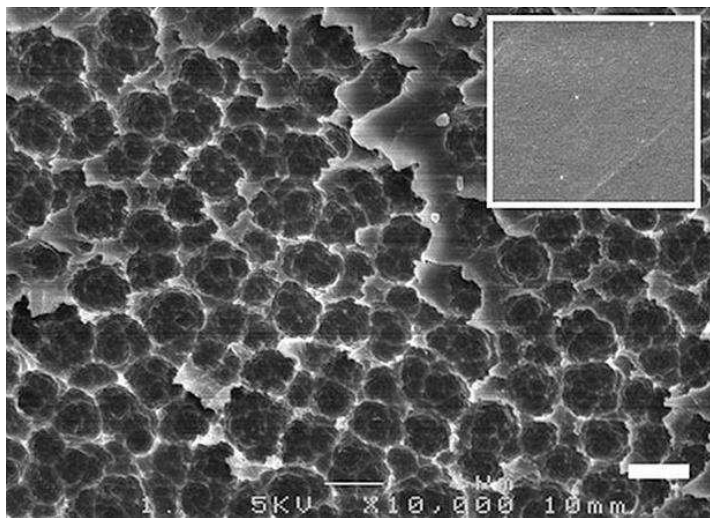


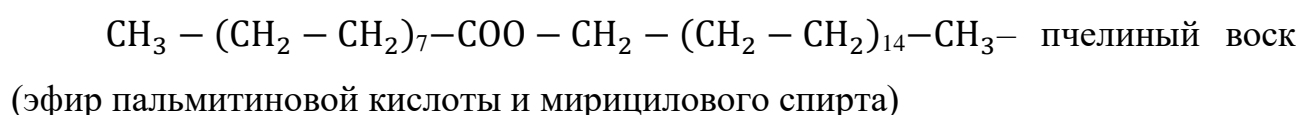
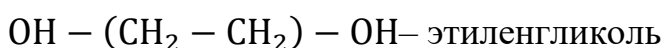
Рисунок 4 – Пленка полиэтилентерефталата, разрушенная бактериями *Ideonellasakaiensis*

Совершенно недавно, в 2017 году в научном журнале *Current Biology* была опубликована работа, в которой рассказывалось об уникальных свойствах гусеницы насекомого *Galleriamellonella* или иначе «большая восковая моль», открытых совершенно случайно Федерикой Берточини (*Federica Bertocchini*), являющейся членом исследовательской команды из Института биомедицины и биотехнологий Кантабрии (Испания). Большая восковая моль считается паразитом, так как откладывает в ульях медоносных пчел личинки, где они питаются воском, пыльцой и медом, повреждая в ульях абсолютно все: соты, пергу, рамки и даже утеплительный материал. Открытие сделано было при очистке пчелиных ульев от паразитов, которые затем складывались в простой пластиковый пакет. Буквально минут через сорок Федерика обнаружила огромное число мелких дырочек, проеденных гусеницами.

По оценкам ученых-исследователей, скорость биодegradации полиэтилена гусеницами большой восковой моли в несколько раз выше, чем

даже у бактерий-поедателей пластика *Ideonellasakaiensis*, о которых рассказано выше. Бактерии (небольшая пленка из бактерий, площадью 1 см<sup>2</sup>) поедали 0,13 мг полиэтиленфталата в сутки, а гусеницы пожирают материал буквально на глазах. На базе кафедры биохимии Кембриджского университета был поставлен эксперимент на время, в ходе которого почти сотня гусениц была помещена в обыкновенные пластиковые пакеты. Гусеницы проели в них значительное количество дыр уже через 40 минут, а спустя 12 часов масса пластика уменьшилась на 92 мг.

В настоящее время ученые занимаются изучением деталей биodeградации воска и пластика, однако уже сейчас установлено: гусеницы в обоих случаях разрушают одинаковые химические связи между молекулами (СН<sup>2</sup>–СН<sup>2</sup>) в веществе. По химической формуле и своим свойствам воск – это полимер, нечто вроде «природного пластика», и его структура не намного отличается от полиэтилена.



Посредством спектроскопического анализа было установлено, как гусеницы осуществляют разрушение химических связей в полиэтилене, и что результатом переработки является этиленгликоль – двухатомный спирт, простейший представитель полиолов. Анализ доказал, дыры в пластиковом пакете являются не просто результатом механического пережевывания материала, нет, это самая настоящая химическая реакция и биodeградация материала. Что доказано было еще одним экспериментом: гусениц измельчили в пасту и намазали ей полиэтиленовую пленку, затем оставили на несколько

часов. Итог оказался тот же – исчезновение части пластика с образованием этиленгликоля. Фермент, благодаря которому гусеницы переваривают пластик, пока не идентифицирован, но ведутся активные работы по изучению[13].

В настоящее время исследования по всем найденным способам разложения пластика продолжаются. Осуществляется поиск оптимальных условий и реальных возможностей масштабного применения обнаруженных свойств живых существ.

### 2.3 Переработка отходов пластмасс в России и за рубежом

В настоящее время доля пластиков в общем объеме твердых коммунальных отходов (ТКО) является одной из самых больших (рисунок 5): по весу и объему пластмассы занимают второе место, а по стоимости — первое, ввиду их большей стоимости (в 5 – 15 раз выше) в сравнении с макулатурой и стеклом [7].

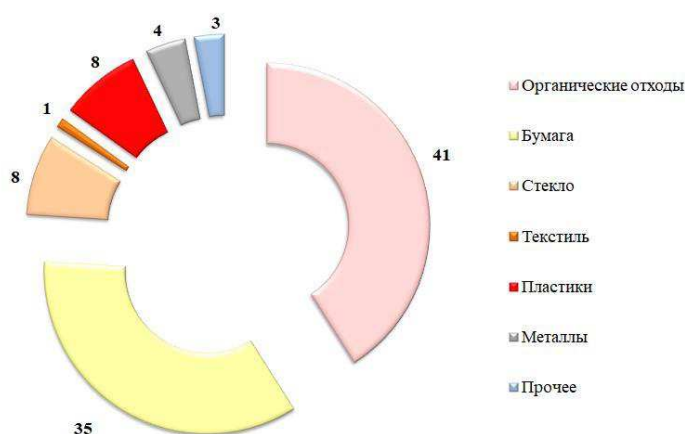


Рисунок 5 – Средний морфологический состав ТКО в России

Основными пластиковыми компонентами в общей массе отходов являются пленка, использованная упаковка и ПЭТ-тара. В силу того, что полиэтилентерефталат легче всего идентифицировать, выбираются и сортируются из общего объема прежде всего ПЭТ-бутылки.

Полиэтилентерефталат является одним из самых перерабатываемых материалов в мире, ввиду высокой технологичности отходов ПЭТ и огромного количества вариантов его использования. Помимо того, что повторное использование сырья экономит объемы мусорных полигонов, это также способствует минимизации выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу, снижению энергопотребления, а также снижению расходов на исходное сырье. Благодаря совокупному действию экономических, технологических и экологических факторов растет сбор и переработка ПЭТ. Однако, уровень сбора и переработки в различных странах различен. Так, к примеру, Китай (80%), Япония (80%) и Швейцария (70%) в этом вопросе занимают лидирующие позиции, страны ЕС – уверенные середнячки (около 50%), а вот Восточная Европа значительно отстает (<20%). Вместе с тем очень отличаются и структуры распределения переработанных отходов ПЭТ по видам продукции. К примеру, в США в основном производятся ПЭТ-волокна, в Западной Европе – бутылки. В большинстве стран, уверенно развивающихся в этой отрасли, приняты программы по решению проблем рециклинга ПЭТ [14].

Именно о переработке ПЭТ-тары пойдет речь в данной работе. Современный уровень выборки различных видов пластика из общего объема твердых коммунальных отходов в России представлен на рисунке 6.

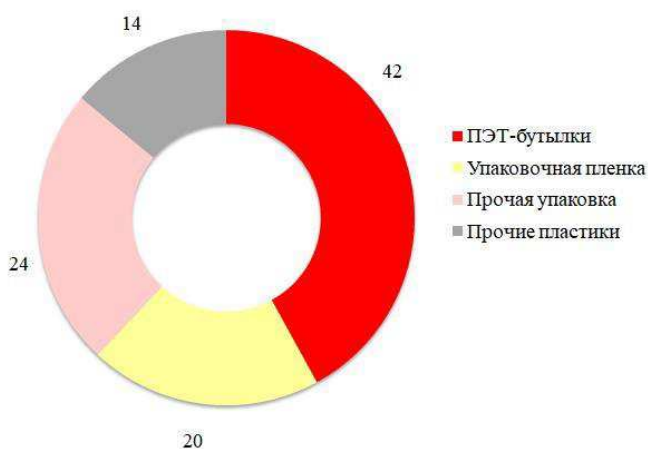


Рисунок 6 – Уровень выборки различных видов полимерных изделий из ТКО, %

Кроме того, собираемые объемы отходов пластмасс и широкий спектр применения вторичного сырья позволяют организовать масштабный, привлекательный с точки зрения рентабельности бизнес. Информация об объемах потребления пластмасс приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Объемы потребления пластмасс (ПЭ, ПП, ПВХ, ПС) и ПЭТ

Тип пластмассы	Потребление, млн т/год	
	в мире	в России
Все пластмассы	≈240	≈5
ПЭТ	≈22,5	≈0,57
Вторичный ПЭТ	≈9,1 (хлопья)	≈0,16

В наши дни интерес к отрасли переработки в России все растет и растет ввиду нескольких факторов: в первую очередь из-за изменения законодательства, в частности, ФЗ №89 «Об отходах производства и потребления», ведшего расширенную ответственность производителя, что стало началом настраивания контактов меж товаропроизводителями и переработчиками. Во вторую очередь немаловажными является фактор того, что большинство «образователей» отходов уже научились их собирать и продавать. Ведь еще лет 6 – 8 назад крупные торговые сети платили за вывоз с мусором оставшейся упаковки. Нынче же практически всем удалось наладить самостоятельный сбор и реализация коммерческих видов отходов. Ярчайшим примером является сеть супермаркетов «Магнит», организовавшая крупнейшую на сегодня в России переработку собственных отходов пленки объемом до 1 тыс. т/мес., а компания «Но вые технологии» производит из нее гранулы прекрасного качества, спрос на которые стабильно превышает предложение. Третьим фактором послужит то, что в России открывается все больше мусоросортировочных станций, благодаря которым ежегодно растет количество подготовленного к переработке материала.



К примеру, в 2012 году 3/4 отходов отбирались посредством ручного труда на полигонах, и лишь небольшая часть сортировалась на специальных станциях, а крохотная доля (около 0,2%) поступала от ЖКХ в результате раздельного сбора. В 2018 же году доля отходов, сортированных на специальных станциях, равна 37,4% от общего объема, из систем раздельного сбора – 4,7%, с промышленных производств — 2,7%. Для наглядности ниже на рисунке 7 представлена информация об объемах собранных в РФ полимерных отходов.

То есть за 5 лет значительные изменения произошли по данному вопросу и, в целом, подход граждан стал более рациональным и цивилизованным.

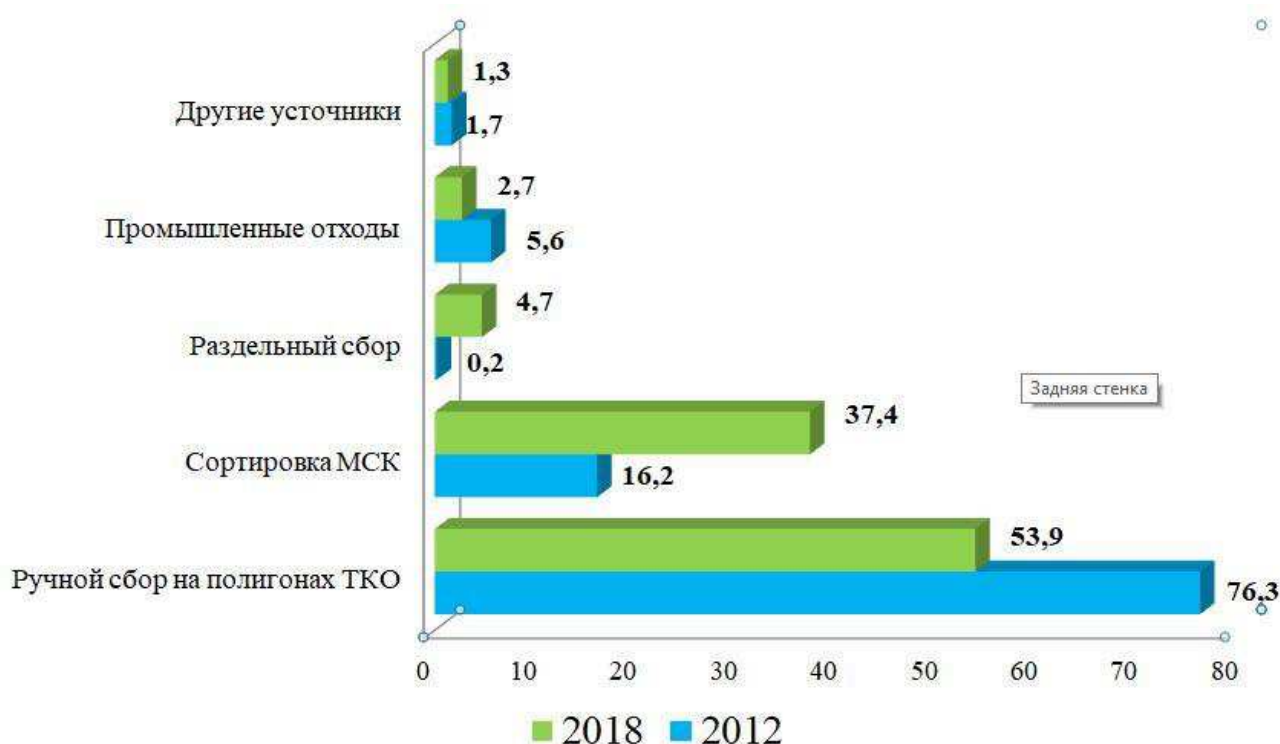


Рисунок 7 – Объемы полимерных отходов, собранных в РФ в 2012 и 2018 гг.,%

Объем собираемых отходов ПЭТ также растет. Например, за последние 14 лет сбор ПЭТ-тары в России увеличился с 4 тыс. т/мес. до 14-15 тыс. т/мес. (160 тыс. т/год). Графическая информация представлена ниже на рисунке 8.

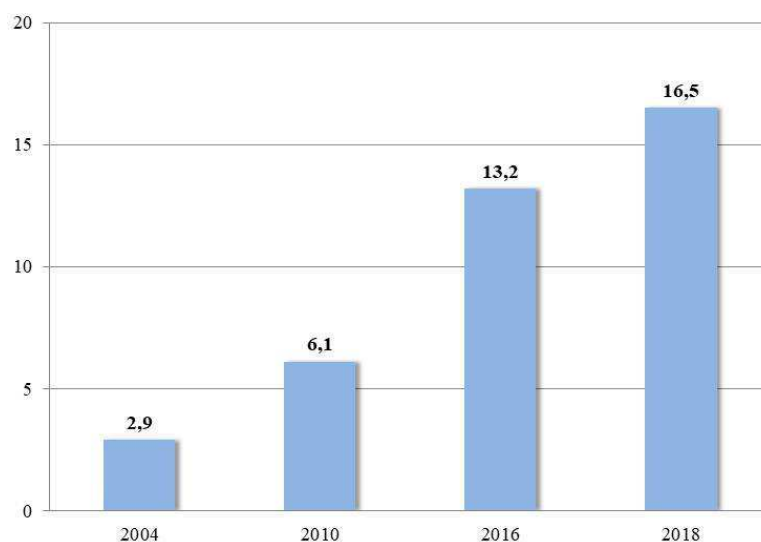


Рисунок 8 – Объем сбора ПЭТ-бутылок в РФ в период 2004 – 2018 гг., тыс т/мес.

И все же, несмотря на позитивные темпы роста, абсолютный уровень сбора ПЭТ-тары из ТКО в РФ по-прежнему остается в пределах 25-27%. То есть в сравнении с другими странами мира, например, Канадой (где уровень вторичной переработки пластиковой упаковки из-под напитков достигает 98%), Россия находится на одном из последних мест. И объемы сбора нужно нарастить не менее чем в 3 – 4 раза. На пути к высокому уровню развития рециклинговой отрасли существуют следующие проблемы:

- наличие недобросовестных производителей, производящих низкокачественную продукцию, вследствие чего подрывается доверие к самой идее переработки пластиков как в глазах производителей конечной продукции, так и в глазах населения;

- низкое качество бизнес-планирования и оценки постоянных затрат, неграмотный просчет всех факторов: многие предприниматели, начавшие работу в этой сфере попросту имеют слабую подготовку и не учитывают важнейших факторов перед запуском предприятия;

- отсутствие отлаженного механизма взаимодействия переработчиков с производителями продукции.

Подводя итоги, можно назвать основные положительные и негативные факторы и тенденции отрасли переработки пластиков в России.

Позитив:

- сегмент переработки пластмасс продолжает расти на 20, 40 и даже на 60 % в год (в зависимости от вида пластмасс);

- первичные полимеры стоят в России дорого и постоянно дорожают, что повышает интерес к использованию вторичных полимеров. Ниже, в таблице 5 приведена информация о стоимости первичного и вторичного пластикового материала;

Таблица 5 – Цена с НДС на некоторые крупнотоннажные полимерные материалы в РФ в декабре 2018 г.

Полимеры	Цена первички с НДС, руб./т	Закупочная цена «скрэпа» с НДС, руб./т	Цена продажи вторичной гранулы, руб./т
ПП	86 – 92	15 – 25	55 – 75
ПЭ	80 – 95	15 – 38	55 – 75
ПЭТ	74 – 81	22 – 28	47 – 58

- претерпевшие за последние четыре года изменения в этой отрасли законы РФ, в целом имеют тенденцию положительно сказаться на сегменте рециклинга пластиковых отходов;

Негатив:

- объемы сбора (в сравнении с другими странами мира) весьма малы, что мешает созданию масштабных производств;

- неудовлетворительная подготовка предпринимателей, начинающих работать в данной отрасли;

- отсутствие понимания о том, как большая часть разработанных законодательных изменений будет реализована на практике, что является сдерживающим фактором для поступления инвестиций в отрасль[14].

### 3 Выбор метода переработки

Выделяется несколько основных способов переработки ПЭТ-тары: химические, механические и термические. В таблице 6 приведена краткая информация об основных способах переработки.

Таблица 6 – Виды изделий из полимеров, входящих в смешанные отходы

Способ переработки	Степень загрязнения отходов	Доля отходов, перерабатываемых данным способом, в общем объеме перерабатываемых отходов, %	Области применения веществ, полученных в результате переработки
Механический	низкая и частично средняя	70 – 75	производство ПЭТ-тары, волокон, нитей, нетканых материалов, пленок
Химический	средняя	5	получение исходного сырья для повторного синтеза ПЭТ и других полиэфиров для производства клеев, покрытий, кровли
Термический	средняя	20 – 25	сжигание для получения тепловой энергии или пиролиз для получения жидких и газообразных топлив

Среди них особой популярностью славятся методы сжигания, радиационной деструкции, термического разложения, химического рециклинга и механико-химический. Ниже более подробно описан каждый.

Посредством сжигания получают энергию для промышленных нужд. Данный метод довольно популярен в США. Согласно российскому классификатору ПЭТ-тара относится к пятому классу опасности. При ее

сжигании не происходит выделения диоксинов, так как в ПЭТ в отличие от, например, ПВХ, не содержится хлор. Согласно данным хроматографии японских исследователей, токсичность ПЭТ при сжигании идентична токсичности при сжигании дров [15]. На основании данной работы (по приведенным в ней показателям токсических эквивалентов газов при сжигании различного рода полимеров в нанограммах токсического эквивалента на грамм сжигаемого полимера, указанных ниже в таблице 7) можно сделать вывод о безопасности сжигания ПЭТ практически безопасно, однако это непрактично, ввиду низкой теплотворной способности ПЭТ, равной 22700 кДж/кг, примерно соответствующей теплотворной способности низкокачественного угля. (При стоимости 1 т ПЭТ-отходов около 25 тыс. руб.). Кроме того, к «минусам» сжигания можно отнести высокую стоимость оборудования; необходимость дополнительной обработки отходов (сушка, измельчение); невозможность полностью уничтожить отходы (остается зола, шлак и прочее, которые могут составлять до 10% первоначального объема и до 30% первоначальной массы отходов).

Таблица 7 – Показатель токсичности (ПТ) газов при сжигании некоторых полимеров

Полимер	Показатель токсичности, нг/г
Полистирол	0,021
ПЭТ	0,032
ПЭ	0,073
ПВХ	29,0

Метод термического разложения (к нему относятся пиролиз и каталитический термолиз). Продуктом переработки являются мономеры этиленгликоль и метилтерефталат. Метод также популярен в США. Термические методы уместны тогда, когда отходы не находят практического использования и не могут быть утилизированы путем переработки в изделия

или применены в различных композициях. Теоретически технология проста: подбирается необходимая температура нагрева, и цепные молекулы полимера распадутся на отдельные звенья (мономеры), которые, предварительно очистив, можно снова подвергнуть полимеризации или поликонденсации для получения чистых полимерных материалов. Таким образом, термические методы разложения более выгодны, в сравнении с сжиганием, так как обеспечивают возможность получать промышленные продукты. Затраты на пиролиз примерно равны затратам на сжигание, однако в последнее время такой способ является убыточным [14].

В процессах химического рециклинга ПЭТ взаимодействует с различными химическими веществами вроде метанола (метанолиз с получением мономера – диметилтерефталата); этиленгликоля (гликолиз с получением бисгидроэтилтерефталата); кислоты (гидролиз с получением терефталевой кислоты) или щелочи (омыление) и деполимеризируется. Такие методы позволяют использовать сырье более низкого качества. Но процессы весьма энергоемки и для их проведения требуется высокотехнологичное дорогостоящее оборудование, дорогостоящие химические продукты. Для обеспечения рентабельности требуются большие товарообороты [16].

Метод радиационной деструкции (или иначе радиолиз) предполагает разрушение химических связей макромолекул полимеров под воздействием излучений высокой энергии (с помощью рентгеновских лучей, нейтронов, гамма-излучения, протонов, бета-частиц, быстрых электронов). Такие излучения вызывают разрыв связей, что способствует глубоким структурным, химическим изменениям и процессам фото и термоокислительной деструкции и образованию низкомолекулярных продуктов, которые могут быть задействованы в биоциклических процессах. Можно менять свойства полимера в нужном направлении, регулируя интенсивность излучения. Радиационная деструкция всегда протекает по закону случая. В России этот метод не используется [17].

Самым распространенным и самым экономичным методом является механико-химический. Он так же подразделяется на несколько направлений:

- переосаждение из растворов с получением порошков для нанесения покрытий;
- разложение отходов с получением мономеров или олигомеров, используемых для изготовления волокна, плёнки;
- химическая модификация с целью получения материалов с новыми свойствами;
- повторное плавление отходов с изготовлением гранулянта, агломерата и изделий посредством литья под давлением или экструзии.

Все из перечисленных направлений отличаются своими преимуществами, однако, не все подходят для переработки пищевой тары. Посредством некоторых возможна переработка лишь незагрязненных отходов.

Теоретический анализ литературы позволил на основании сравнения существующих методов обращения с отходами выделить перспективное направление утилизации полимеров: переработка отходов во вторичное сырье и повторное его использование для получения изделий. Наиболее безопасным и экономически выгодным является метод грануляции полимеров на базе экструдера, популярный за границей. В России он также набирает популярность, так как будет выгодным практически при любых объемах товарооборота. Именно этот метод будет рассмотрен в данной работе далее [16].

#### 4 Метод грануляции пластмасс

В настоящее время существуют технологии переработки всех полимеров без исключения, однако в России могут отказать в приеме непопулярных видов пластика, так как на территории нашей страны разработка и реализация методов утилизации идет шагами отнюдь не быстрыми, и некоторые виды пластика до сих пор не могут быть утилизированы.

В зависимости от установки по переработке пластика определяется конечный продукт, который предприниматель сможет продавать в дальнейшем. Это могут быть гранулы, хлопья-флекс, химическое волокно или топливо.

Наиболее простыми в изготовлении и много более рентабельными продуктами являются гранулы и флекс. Флекс – это пластиковые хлопья мелкой фракции, то есть продукт измельчения пластиков при переработке. Также топливо из пластиковых отходов является перспективным решением для выхода из топливного кризиса. Например, в США уже активно функционируют несколько подобных предприятий: из 1 тонны пластикового сырья можно получить 3 – 5 баррелей синтетической нефти средних или легких фракций [7].

В данной работе рассмотрена линия по производству вторичных гранул в процессе переработки отходов пластика. Гранулы являются готовым продуктом, используемым как промышленное сырье для производства пластиковых изделий наряду с первичными полимерами.

Получаемый ресурс выгоден как с материальной точки зрения (ввиду значительной дешевизны вследствие меньших затрат финансовых ресурсов на изготовление, по сравнению с первичными полимерами), так и с экологической, ведь сырьем для производства, по существу, является мусор.

В качестве сырья для вторичных гранул используются производственный брак и неликвиды, полимерные бывшие в употреблении тара и упаковка, а также бытовые и промышленные отходы из пластика. Готовый гранулянт целесообразно использовать как в чистом виде, так и в качестве добавок к исходному сырью. Вторичные гранулы практически не отличаются от



первичных полимеров ни по физическим, ни по химическим параметрам, при условии подконтрольной и четкой организации процесса переработки. Кроме того, характеристики в значительной степени можно улучшить, при добавлении различного рода присадок и добавок. Также заказчик гранул может указать такие входные параметры как размер, цвет и прозрачность гранулянта. Гранулы могут иметь форму шара, цилиндра, куба, чечевицы и так далее, однако в пределах одной партии материала форма частиц должна быть одинаковой. Размер полимерной гранулы, как правило, составляет 1,5 – 5,0 мм, однако, к примеру, для термопластов, содержащих короткие волокна, размер гранул может достигать 10 – 14 мм, для реактопластов — 0,5 – 2,0 мм; для каучуков и наполненных резиновых смесей — 10 – 25 мм. А вот для получения изделий методом спекания, вспененных изделий или концентратов красителей размер гранул не должен превышать 1 мм. На рисунке 9 изображен один из вариантов вида готовых вторичных гранул.

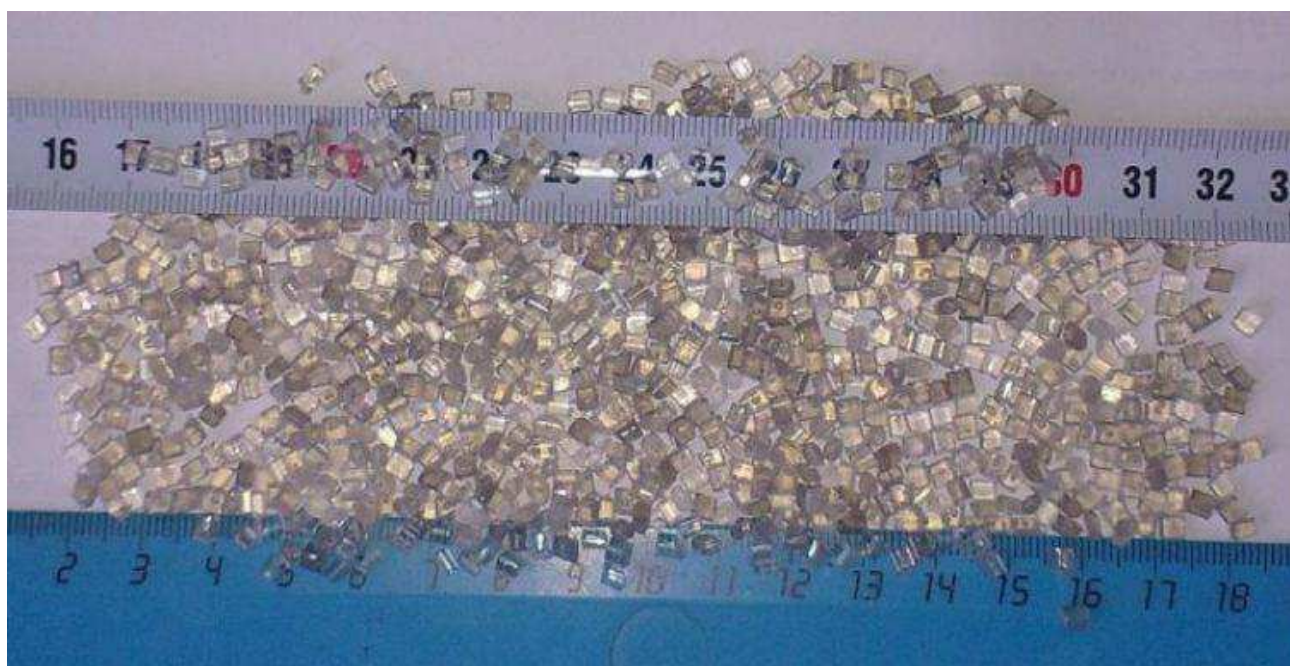


Рисунок 9 – Готовые вторичные гранулы

От степени очистки от примесей полимерного сырья зависит качество гранул. В то же время, предназначение, вид и свойства готовых гранул зависят от полимера, используемого в качестве сырья, для их производства. В основном это поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилентерефталат (ПЭТ), полиэтилен низкого или высокого давления (ПНД или ПВД), а также полипропилен (ПП). Однако, наряду с данными материалами, все более востребованными становятся поликарбонат, полистирол, АБС-пластик и стрейч LLDPE.

Ранее в работе уже говорилось: каждый материал имеет свои особенности. К примеру, обработка полиэтилена высоким давлением обеспечивает ему такие свойства как морозостойкость, эластичность, электронепроводимость, водо- и газонепроницаемость, отсутствие запаха, стойкость к химическим воздействиям, отличная светопроницаемость. Вторичный ПВД достаточно легко перерабатывается. Из вторичных гранул ПВД изготавливаются такие бытовые товары, как упаковочные пленки, лотки и подносы; пластиковая тара; пробки для стеклянных бутылок; детские игрушки. В промышленности ПВД гранулы необходимы для производства кровельных материалов, полимерно-песчаных стройматериалов, утеплителей (пенополистирола) кабельных труб-каналов, водостоков, вентиляции, изделий медицинского назначения.

Для производства ПНД применяются неликвиды и отходы полиэтилена низкого давления, которые обладают высокой плотностью. И именно поэтому затраты на их обработку в разы превышают затраты на другие пластики. ПНД гранулы используют при производстве: полимерных труб, твердой упаковки (пробок для бутылок, тара для продуктов, косметики и химии), мягких упаковочных материалов вроде пленок и пакетов; бытовых емкостей, сельскохозяйственного и бытового инвентаря.

Отходы ПЭТ наиболее удобны и просты в переработке. Вторичные гранулы из этого материала можно как сплавлять с другими видами пластика, так и примешивать к первичному сырью. Из таких гранул производятся в первую очередь бутылки технического и бытового назначения. Также

различная тара для продуктов питания, косметики или химии, кровельные материалы, упаковочная лента. Возможна также переработка ПЭТ в хлопья и технические волокна.

Вторичным гранулам из полипропилена присущи такие качества как электроизоляция и механическая прочность, а также стойкость к химическим воздействиям, спиртам и кислотам. Кроме того, полипропиленовые гранулы славятся водонепроницаемостью и устойчивостью к высоким температурам. А вот устойчивостью к морозу – нет. Избавиться от этого недостатка возможно при помощи специальных компонентов. В основном, готовые гранулы в дальнейшем поступают на литьевую обработку. Гранулы из полипропилена используются для изготовления легкой мебели, теплиц, поддонов и подставок, садового инвентаря, труб, одноразовых шприцов, различных хозяйственных принадлежностей (ведер, тазов), а также упаковочной ленты, пакетов и пленки.

Гранулы из ПВХ удобны в использовании, так как для их обработки можно использовать практически любое оборудование. Их универсальность также подкрепляется простотой окрашивания, ламинирования или каширования. При их производстве не образовывается пыль, и дальнейшая их обработка максимально проста.

Стрейч гранулы в основном выгодны для производства пленки упаковочной, ввиду отличных характеристик, им свойственных: вроде прозрачности, отличной гибкости, стойкости к химическим веществам, растяжимости, отсутствия токсичности и запаха, воздухопроницаемости и фиксации.

Вторичные гранулы из полистирола являются экологически чистым продуктом. К свойствам, ему присущим, относят инертность к химическим веществам, высокая прочность, электроизоляция, устойчивость к механическим воздействиям, оптимальное соотношение жесткости и гибкости материала, а также довольно хорошие показатели светорассеивания. Сырьем для данного вида гранул может служить монолитный или же вспененный полистирол. Из гранул полистирола возможно производство бытовых приборов,

светотехнических изделий, канцелярских товаров, различной тары и упаковки, оборудования различного назначения, а также строительных материалов для утепления и облицовки.

Изделия из вторичных гранул поликарбоната, сырьем для которых служат отходы различных изделий из него, практически не отличаются ничем от таких же изделий из первичного сырья. Вторичный поликарбонат не пропускает влагу, не токсичен, легок в обработке. Является материалом с высокой прочностью, упругостью, отличными оптическими показателями, стоек к отрицательным температурам, не пропускает звук и тепло. Защитить же от ультрафиолетовых лучей его можно посредством добавления в материал различных стабилизаторов. Гранулы поликарбоната идут на изготовление навесов, заборов, теплиц, комплектующих для мебели, медицинских товаров, очков, кухонных принадлежностей.

Стоит отдельно заметить, хоть ранее и было уже упомянуто, что часто для производства гранул используются различного рода добавки с целью улучшения химических или же физических показателей, эксплуатационных свойств вторичных пластиков. Такими добавками могут быть осушители, красители, присадки, антистатика, ароматизаторы.

Наиболее просто и выгодно перерабатывать производственные отходы и брак, так как они не подвергались интенсивной эксплуатации. Весьма затруднительным и зачастую невыгодным для предпринимателей становится изготовление «вторички» из сырья несортированного и сильно загрязненного мусора [18].

#### **4.1 Основные этапы и оборудование для производства вторичных гранул пластика**

В основном, переработка пластика идет двумя путями: либо это простое дробление отходов, в результате которого их можно использовать как добавку к первичному сырью при производстве продукции; либо это дробление и

изготовление гранулянта – тех самых вторичных гранул, о которых рассказывалось выше.

По общей технологии переработки в первую очередь мусор, то есть исходное сырье, подлежит сортировке по цвету и виду. Что в подавляющем большинстве случаев осуществляется вручную. В идеальном варианте, конечно, чтобы любой мусор сортировался непосредственно гражданами, его создающими, как это делается, например, в Японии. Домашняя сортировка пластиков намного облегчает процесс последующей переработки. Поэтому тщательно отсортированные и чистые отходы у населения принимают более охотно и платят за них больше.

Таким образом, прочитав маркировку пластика (о них говорилось ранее), например, на доннышке тары, необходимо по мере использования сразу же его сортировать отдельно по типу материала, из которого он сделан. Также важно у бутылок снимать крышки, дозаторы, железные предметы; все ёмкости, пакеты и обертки необходимо промывать и обязательно высушивать; убирать наклейки и этикетки; а также стоит уменьшать пластик в объеме: пакеты скомкать, а бутылки смять. Стоит также помнить, что разные части одной упаковки могут быть изготовлены из разного материала. Так, самым простым примером является бутылка обычная прозрачная. Она является изделием из полиэтилентерефталата (ПЭТ-бутылка), а вот крышка от нее скорее всего изготовлена из полиэтилена (ПЭ). И вместе данные материалы не перерабатываются.

В общем процессе переработки за сортировкой следует измельчение однородных отходов в специально предназначенной дробилке. Размеры получаемых обрезков зависят от дальнейшей переработки. Далее дробленый материал подвергается промывке и очистке от различных примесей и посторонних предметов, после чего высушивается. Далее следует процесс грануляции, где полученное ранее сырье будет нагреваться до определенной температуры (в зависимости от вида полимера); после чего методом экструзии оно будет выдавлено через отверстия в виде нитей. Они, в свою очередь,

мгновенно будут погружены в воду для охлаждения, а затем разрезаны на гранулы. Также, исключая стадию водного охлаждения, возможно использование метода горячей резки.

Из готовых гранул производятся пластиковые изделия обычно методом литья под давлением или экструзией. Из гранулированного пластика возможно изготовление упаковок, бутылок, деталей приборов и автомобилей (тут, в основном, речь о термопластичных полимерах и в частности об АБС-пластике), а также бытовых предметов. Кроме того удачным решением для предприятий является использование полимерно-песчаной смеси. Полимеры смешиваются с песком и красящими веществами, в результате чего могут быть получены такие стройматериалы как гибкая черепица, бордюрный камень, садовая или же тротуарная плитка.

Заводы по производству вторичных гранул могут работать либо по более простой технологии, где не предусматривается глубокая очистка сырья (однако, в таком случае, готовое сырье будет непригодно для изготовления емкостей для пищевых продуктов); либо пользоваться усложненным методом с механизированной линией, оснащенной оборудованием для удаления всех инородных включений и загрязнений, на выходе дающей чистейший продукт, пригодной для производства пищевой тары.

В следующей (за подготовительной) стадии измельчения участвуют различного рода измельчительные агрегаты: шредеры, дробилки. На этом этапе ключевым техническим параметром выбираемого оборудования является размер фракции. Именно от него зависит затратность последующей стадии обработки, а именно – гранулирования. Стоит понимать: в силу слишком великого разнообразия пластиковых отходов и их исходных параметров, таких как структура (могут быть волокнистыми, ячеистыми, сплошными или же композиционными), форма, габаритные размеры и физико-механические свойства (ударная вязкость, температура размягчения, прочность, коэффициент трения), абсолютно невозможно на данном этапе развития создать универсальный измельчитель, который окажется способным переработать все

виды пластмасс. Кроме того, наилучшим решением будет использовать и шредер и дробильный аппарат, так как первый предназначен для первичного, а второй – для вторичного измельчения (при этом их конструкции не обязательно должны отличаться). Такой подход обеспечивает повышение скорости переработки, существенно оптимизирует производство и снижает затраты энергии. Однако, стоит отметить, что, существуют конструкции машин, совмещающих в себе и шредер и дробилку. Так, например, TRIA – международная группа компаний имеет в разработке серию комбайнов, предназначенных для переработки крупногабаритных блоков и толстостенных выдувных изделий. К сожалению, эти комбайны неспособны переработать пластиковые изделия мелких размеров (вроде ПЭТ тары и пленочных материалов).

Таким образом, в зависимости от типа перерабатываемого пластика измельчающее оборудование может быть следующих видов:

- измельчители полимерных пленок разрезающего или разрывного действия – предназначены для переработки пленок из акрила, полипропилена, нейлона, поливинилхлорида, отличающихся высокой эластичностью;

- мельницы для переработки мелких тонкостенных изделий, таких как ПЭТ бутылки, небольшие канистры для горюче-смазочных и лакокрасочных материалов, а также пластиковые трубы. Такие мельницы обязательно оснащены более мощными ножами и зубьями;

- дробилки для крупных и толстостенных изделий вроде оконных ПВХ профилей, литников и брака формовки. Их измельчение происходит в основном сдавливанием, ударным способом или истиранием.

На следующей стадии – промывке и сушке используются специализированные моечные устройства. Также в производстве могут быть использованы агрегаты, способные совмещать стадии измельчения и мойки, и ими являются мокрые дробилки. На данной стадии также может осуществляться процесс удаления клеевых составов и этикеток при помощи различных растворителей, если же это не было сделано ранее, на

подготовительном этапе. Для удаления избыточной влаги пригодны такие аппараты как пресс-отжимы, сушилки сжатым или горячим воздухом, центрифуги, шнековые водоотделители.

Стадия сепарации может как предшествовать этапу сушки, так и следовать после него, в зависимости от вида сепарации. Данная стадия необходима, так как зачастую изначальная ручная сортировка не гарантирует полного разделения полимерных материалов по виду; а подобное смешение полимеров сильно снижает цену готовых вторичных гранул.

Сепарация может быть флотационной, фотометрической и электростатической. В первом случае смесь пластиков поступает в ванну с водой, насыщенной воздухом, где частицы несмачиваемого гидрофобного материала обволакиваются воздушными пузырьками, и оттого всплывают на поверхность; а гидрофильные частицы скапливаются на дне ванны. В основе второго случая лежит разделение веществ по цвету и отражающей способности: аппараты данного типа имеют электромагнитные излучатели и высокочувствительные приемники – сенсоры. В третьем же случае полимерные частицы перемешиваются, благодаря чему их поверхности электризуются трением и приобретают статический электрический заряд определенного знака и величины. Их разделение происходит в электрическом поле.

На стадии грануляции используются специальные прессы – экструдеры одношнековые и двухшнековые для ПЭТ, для ПВХ, ПНД и ПП, для ПВХ, универсальные; где пластиковый материал попадает в зону разогрева, приобретает пластичное состояние, размягчается и перемешивается шнековыми транспортерами. Кроме того здесь же происходит процесс удаления летучих веществ, выделяющихся при нагревании (дегазация). После чего расплавленная масса направляется к круглым отверстиям в стальной матрице (фильере), где на выходе образуются жгуты, после чего происходит водяное или воздушное охлаждение жгутов и их нарезка на гранулы. После чего гранулы подлежат упаковке.



Стоит отметить, что начинающим предпринимателям не стоит стремиться создать универсальное предприятие, которое перерабатывало бы все виды пластмассы. Это потребует больших капитальных вложений, а также значительных производственных площадей [18].

#### **4.2 Разработка технологической линии получения готовых вторичных гранул из пластиковых отходов**

В данной работе рассмотрена типичная, полностью автоматизированная линия по производству готовых вторичных гранул из ПЭТ тары.

В организованном пункте приема ставится специальный пресс, позволяющий сразу прессовать пластиковую тару в тюки. Это облегчает процесс транспортировки и снижает финансовые затраты на это. К примеру, для таких целей подходит пресс PRESSMAX 530, изображенный на рисунке 10 и имеющий технические характеристики, приведенные в таблице 8.



Рисунок 10 – Пресс PRESSMAX 530

Таблица 8 – Технические характеристики пресса PRESSMAX 530

Характеристика	Значение
Усилие прессования, кН	≤300
Время одного цикла, с	≤35
Производительность, т/ч	1,0 –1,2
Габаритные размеры брикета, мм	
длина	1000
ширина	800
высота	800
Масса брикета, кг	≤150
Объем брикета, м <sup>3</sup>	0,64
Габаритные размеры пресса, мм	
длина	1500
ширина	1150
высота	2950
Мощность электродвигателя, кВт	7,5
Напряжение, В	380
Масса пресса, кг	≤1530

Исходное сырье в спрессованных тюках поступает на ленту транспортера кипоразбивателя. В рассматриваемой линии используется модель транспортера ЛТР-ПЭТ, изображенного на рисунке 11 и имеющего технические характеристики, приведенные в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики ЛТР-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габариты, мм	4995×1005×2240
Масса, кг	585
Ширина ленты, мм	600
Двигатель, кВт	1,5



Рисунок 11 – Транспортер ЛТР-ПЭТ

В кипоразрывателе С-КР-ПЭТ, представленном на рисунке 12 и имеющем технические характеристики, приведенные в таблице 10, тюки переходят в рабочую зону, где разбиваются барабанами на отдельные бутылки.

Таблица 10 – Технические характеристики кипоразрывателя С-КР-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	4314×2048×3235
Мощность приводного электродвигателя роликов, кВт	0,37
Мощность приводного электродвигателя барабана, кВт	4
Масса, кг	2080



Рисунок 12 – Кипоразрыватель С-КР-ПЭТ

После разбития отдельные бутылки выгружаются на ленточный транспортер С-ЛТР-700-ПЭТ, изображенный на рисунке 13 и имеющий технические характеристики, приведенные в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики транспортера С-ЛТР-700-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	4700×1050×2800
Скорость перемещения сырья, м/с	1 – 3
Мощность, кВт	≤20
Ширина контролируемой зоны, мм	600
Масса, кг	600

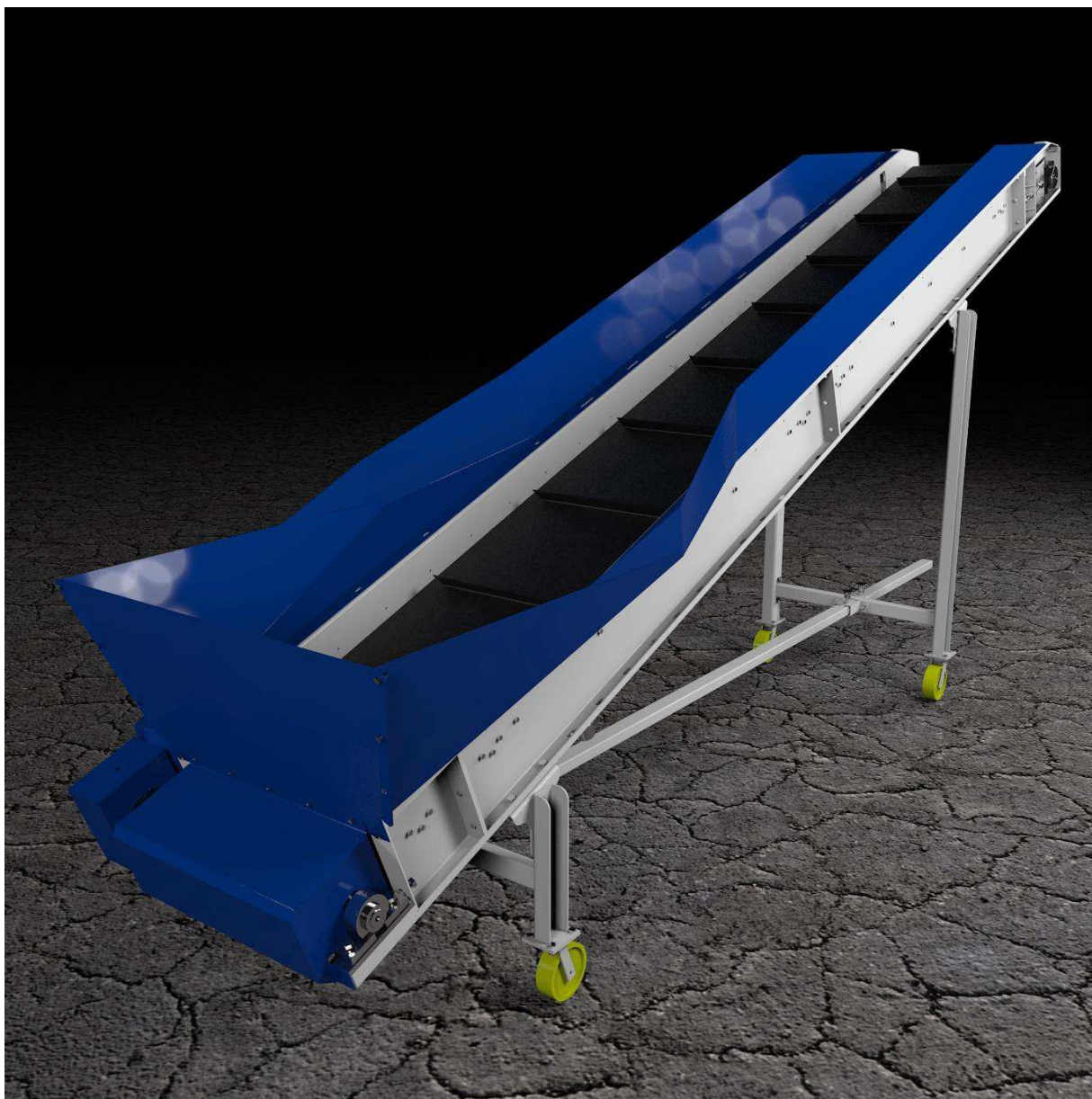


Рисунок 13 – Ленточный транспортер С-ЛТР-700-ПЭТ

Транспортер подает сырье в барабан для отделения этикеток – очень важный структурный элемент линии, так как в РФ отсутствуют четкие правила для производителей по использованию этикеточного клея, и, следовательно, клеям присуща огромная разнообразность химических составов. В бункере аппарата происходит механическое удаление этикеток и предварительная отбивка сырья от грязи и песка. В рассматриваемой линии используется модель С-ОЭ-ПЭТ, изображенный на рисунке 14 и имеющий технические характеристики, приведенные в таблице 12.



Таблица 12 – Технические характеристики этикеткоотделителя С-ОЭ-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	4254×1575×2150
Мощность приводного электродвигателя, кВт	7,5
Мощность приводного электродвигателя выгрузки этикетки, кВт	1,1
Масса, кг	1550

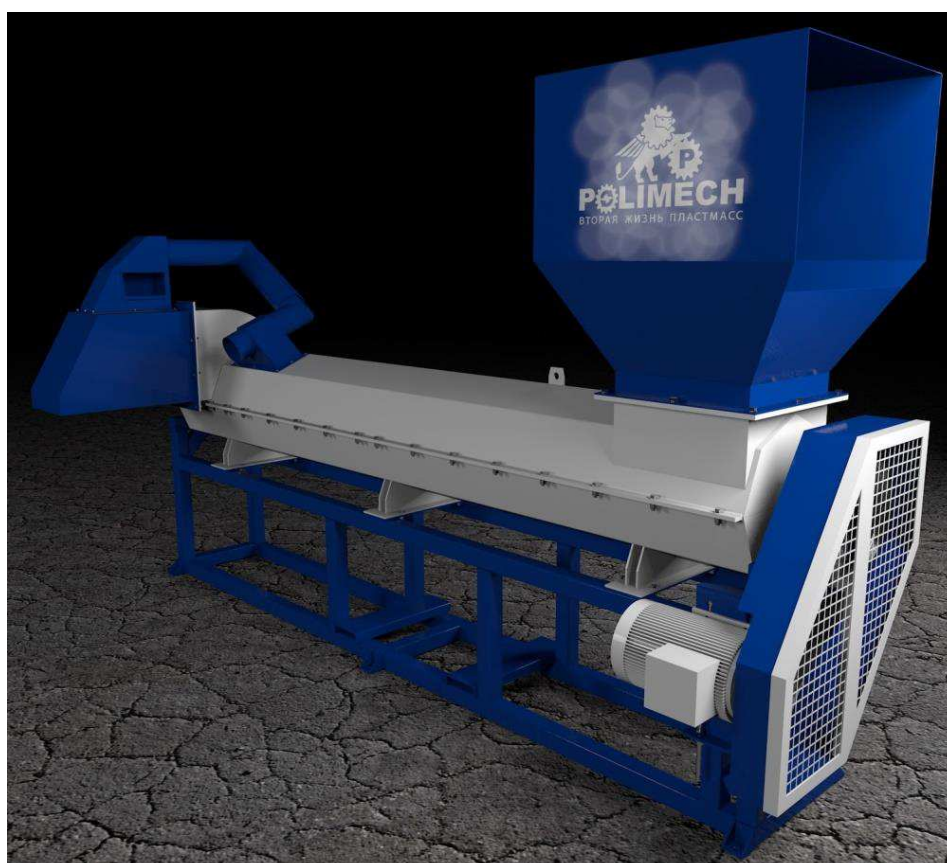


Рисунок 14 – Этикеткоотделитель С-ОЭ-ПЭТ

Из отделителя этикетки, сырье подается на ролики просеивателя С-ПР-ПЭТ, изображенного на рисунке 15 и имеющего технические характеристики, приведенные в таблице 13. При помощи вращательного движения роликов сырье продвигается вдоль просеивателя, при этом песок, грязь и мелкий мусор просыпаются сквозь зазоры между транспортировочными дисками и сыпаются в стороннюю тару.

Таблица 13 – Технические характеристики просеивателя С-ПР-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	2980×1130×1610
Мощность электродвигателя, кВт	2,2
Диаметр дисков, мм	400
Масса, кг	1150



Рисунок 15 – Просеиватель С-ПР-ПЭТ

После чего сырье выгружается из просеивателя в бункер загрузки ленточного транспортера и далее подается в бункер загрузки дробилки ШТОРМ-1200, изображенной на рисунке 16 и имеющей технические характеристики, приведенные в таблице 14. В дробилке сырье попадает сначала в блок ПЭТ, где оно предварительно деформируется двумя вращающимися

роторами и промывается форсунками, расположенными в бункере загрузки дробилки. Далее происходит измельчение ПЭТ до определенного размера фракции.

Таблица 14 – Технические характеристики дробилки ШТОРМ-1200

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	1850×1400×3100
Размер загрузочного окна, мм	900·800
Мощность двигателя, кВт	55
Масса, кг	3850
Производительность, кг/ч	1200
Сырье	пленочное сырье, биг-бэги, ПЭТ бутылки, ящики, канистры, небольшие слитки и прочее



Рисунок 16 – Дробилка ШТОРМ-1200



Далее дробленое сырье проходит несколько стадий очистки и сушки при помощи центрифуг, воздушных разделителей ПЭТ, ванн флотации и подогреваемых моек.

При помощи центрифуги С-Ц-ПЭТ, изображенной на рисунке 17 и имеющей технические характеристики, приведенные в таблице 15, автоматически устраняются загрязняющие примеси из ПЭТ хлопьев за счет скоростного ротора с особыми лопатками. Центрифуга обеспечивает высший уровень осушения.

Таблица 15 – Технические характеристики центрифуги С-Ц-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	1865×1655×3210
Мощность приводного электродвигателя, кВт	18,5
Масса, кг	1490



Рисунок 17 – Центрифуга С-Ц-ПЭТ

Аэросепаратор (воздушный разделитель) С-ВР-ПЭТ, изображен на рисунке 18 и имеющий технические характеристики, приведенные в таблице 16, предназначен для отделения этикетки от дробленого пластикового сырья. В процессе работы в загрузочный бункер аэросепаратора подается материал вместе с этикеткой. Сырьё, попав на крыльчатку, приводимую в движение двигателем и расположенную внутри аэросепаратора, отбрасывается к стенкам кожуха. В этот момент происходит отделение от этикетки. Более тяжелая фракция (пластик) под действием собственного веса падает вниз, а более лёгкая фракция (этикетка), под действием всасывающей силы вентилятора, расположенного сверху, выгружается из аэросепаратора.

Таблица 16 – Технические характеристики воздушного разделителя С-ВР-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	1825×1365×3495
Мощность электродвигателя пневмотранспорта, кВт	3,0
Мощность электродвигателя вытяжки, кВт	3,0
Масса, кг	525

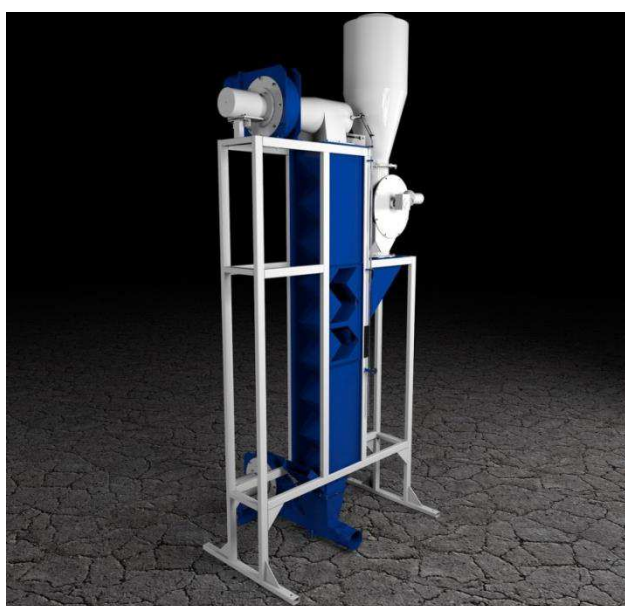


Рисунок 18 – Воздушный разделитель С-ВР-ПЭТ

Ванна флотации С-ВФ-ПЭТ, изображенная на рисунке 19 с техническими характеристиками, приведенными в таблице 17, предназначена для отделения предварительно измельченного сырья (ПЭТ сырье, полистирол, полиамид, пластик-АБС, поликарбонат и т.д. (плотность которых более плотности воды) от инородных включений (бумаги, пленки, этикетки, пробки), а также дальнейшего транспортирования материала для последующей обработки. ПЭТ тонет в воде, погружается на дно ванны, где шнеком транспортируется к выгрузке. Плотность этикетки (пробки, бумаги) меньше плотности воды, поэтому этикетка и пробка всплывают на поверхность воды и через сливной бункер убираются из системы.



Рисунок 19 – Ванна флотации С-ВФ-ПЭТ

Таблица 17 – Технические характеристики ванны флотации С-ВФ-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	5790×2200×3365
Мощность электродвигателя узла загрузки, кВт	1,5
Мощность электродвигателя шнека транспортировочного, кВт	3,0
Мощность электродвигателя узла выгрузки, кВт	4,0
Диаметр шнека загрузки, мм	212
Диаметр шнека транспортировочного, мм	210
Диаметр шнека выгрузки, мм	212
Масса, кг	1670

Подогреваемая мойка С-АПМ-ПЭТ – это специализированный аппарат для горячей отмычки измельчённой ПЭТ флексы от сложных загрязнителей и клея. Позволяет добавлять моющие средства. Отмывка происходит при помощи ворошителя. Особая конструкция кожуха защищает мойку от теплопотерь, а лопасти особой конструкции специально разработаны для эффективной работы с ПЭТ. Аппарат изображен на рисунке 20 и обладает техническими характеристиками, приведенными в таблице 18.

Таблица 18 – Технические характеристики подогреваемой мойки С-АПМ-ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	3585×1555×3260
Мощность электродвигателя узла ворошителя, кВт	3,0
Мощность электродвигателя узла выгрузки, кВт	4,0
Диаметр шнека выгрузки, мм	218
Масса, кг	2015



Рисунок 20 – Подогреваемая мойка С-АПМ-ПЭТ

Все выделенные этикетки и примеси поступают в циклоны-накопители и временно там хранятся. Также данные циклоны предназначены для автоматической выгрузки и сбора в фасовочную тару измельчённого полимерного сырья. Могут использоваться как накопители для различных типов дроблёных твёрдых пластиков, ПЭТ, плёночного сырья. Такой циклон изображен на рисунке 21, а его технические характеристики представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Технические характеристики циклона-накопителя С-ЦН-80ПЭТ-Н

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	1525×1525×4565
Объем бункера, м <sup>3</sup>	0,65
Масса, кг	280

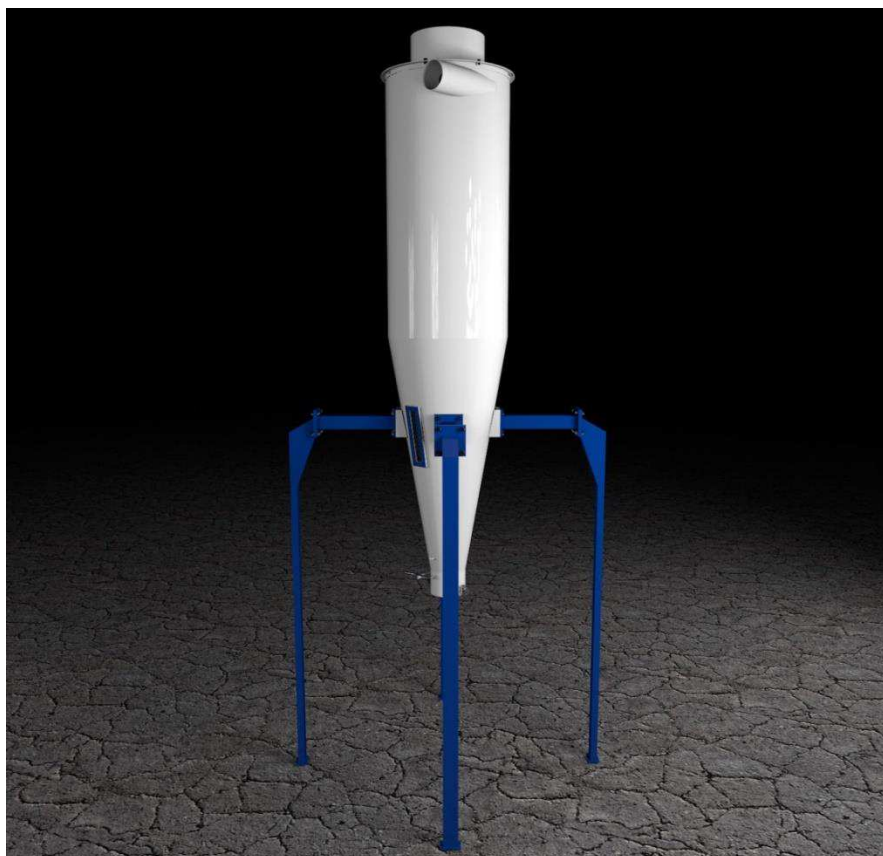


Рисунок 21 – Циклон-накопитель С-ЦН-80ПЭТ-Н

Далее сырье поступает в экструдер для получения однородного расплава. В процессе расплава материал дегазируется, фильтруется от твердых примесей.

Экструдер представлен на рисунке 22, а его технические характеристики представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Технические характеристики экструдера ПЭТ

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	4060×1440×1370
Масса, кг	3000
Мощность двигателя, кВт	90
Количество стренг/Зоны дегазации	36 –40/2 вакуумных дегазации
Количество зон нагрева/охлаждения	7/4
Производительность, кг/ч	≤600



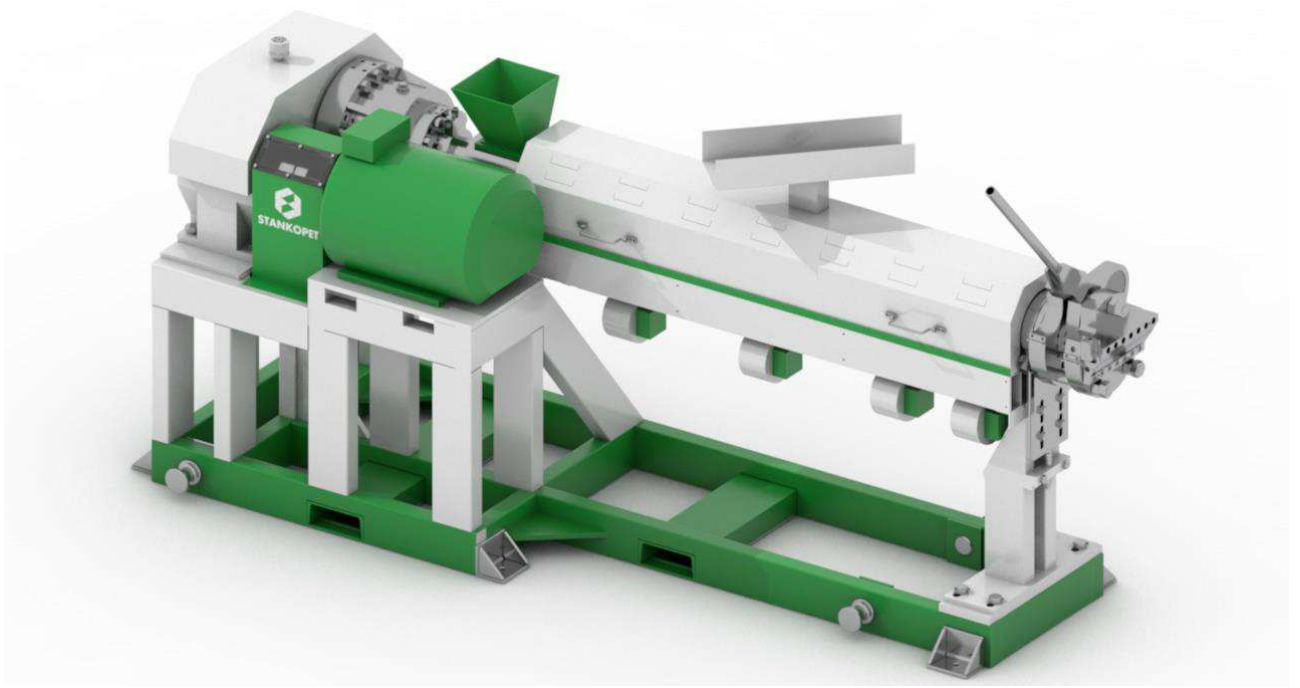


Рисунок 22 – Экструдер ПЭТ

На входе масса проходит через шнековый дозатор (изображен на рисунке 23), который устанавливается на экструдер, с его помощью можно регулировать диаметр подачи пластикового сырья.

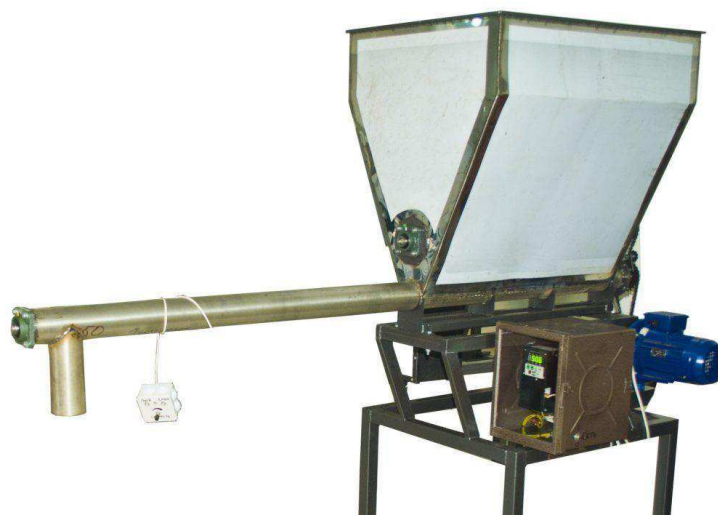


Рисунок 23 – Дозатор шнековый непрерывного действия

Сырье далее попадает в стренговый гранулятор SL-GR-2.200, изображенный на рисунке 24, с техническими характеристиками, приведенными в таблице 21; который используется для нарезки остывших полимерных стренг выходящих из гранулятора на гранулу. Размер гранулы определяется количеством оборотов фрезы.

Таблица 21 – Технические характеристики стренгового гранулятора SL-GR-2.200

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	1180×700×1570
Производительность, кг/час	≤600
Масса, кг	580
Мощность двигателя, кВт	7,5



Рисунок 24 – Стренговый гранулятор SL-GR-2.200

После чего готовые гранулы поступают в упаковочную машину, изображенную на рисунке 25 с техническими характеристиками, приведенными



в таблице 22, предназначенную для их дозирования и упаковки. Где пакуются в прозрачную пленку по 10 кг.

Таблица 22 – Технические характеристики упаковочной машины

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	1500×1000×110
Производительность, кг/час	≤600
Масса, кг	480
Мощность двигателя, кВт	3,2



Рисунок 25 – Упаковочная машина

На любых промышленных предприятиях используется много воды и для получения качественной продукции необходимо очищать её.

Ванны очистки воды используются для очищения отработанной воды от взвешенных веществ и прочих нерастворимых примесей для дальнейшего применения в производстве. Принцип работы такой ванны описан ниже:

- на первом этапе вода очищается от крупных загрязнений посредством вибросита;

- затем вода поступает в отсек гравитационной очистки, где под действием гравитации осаждаются на дно ванны мелкодисперсные загрязнители, а чистая вода переливается в другой отсек;

- на этапе механической фильтрации, вода просачивается снизу вверх, через слой крупнозернистого абсорбента (керамзита);

- процесс повторяется в соседнем резервуаре, но просачивание происходит уже сверху вниз;

- после всего вода считается очищенной и готовой к повторному использованию в технологическом процессе переработки ПЭТ.

Ванна очистки воды представлена на рисунке 26, а ее технические характеристики представлены в таблице 23.



Рисунок 26 – Ванна очистки воды

Таблица 23 – Технические характеристики ванны очистки воды

Характеристика	Значение
Габаритные размеры, мм	4200×3345×2800
Производительность, м <sup>3</sup>	10 – 15
Масса, кг	3205
Объём ванн, м <sup>3</sup>	8,52
Мощность насоса, кВт	0,75
Мощность вибратора, кВт	0,53

### Хранение

Для данной технологии производства требуется два склада:

Закрытый склад для сырья вместимостью до 100 тонн. Исходный пластиковый материал хранится в тюках.

Закрытый склад для хранения готовой продукции вместимостью до 10 тонн. Упакованные гранулы хранят в в закрытом помещении, предохраняющем их от атмосферных осадков.

При укладке упаковок на землю под нижний ряд подкладывают поддоны или прокладки. При хранении в отапливаемых помещениях ящики должны находиться на расстоянии не менее 1 м от отопительных приборов.

Внутризаводская транспортировка грузов осуществляется при помощи электрического вилочного погрузчика Komatsu Forklift PE FB07-3.

Вилочные погрузчики используются для осуществления погрузочно-разгрузочных работ. Такая спецтехника оснащается вилочным захватом, который функционирует при помощи механического привода, расположенного в передней части машины. Вилочный погрузчик используется для перемещения, поднятия или опускания груза.

Технические характеристики погрузчика Komatsu Forklift PE FB07-3 указаны в таблице 24. Устройство погрузчика Komatsu Forklift PE FB07-3 представлено на рисунке 27.

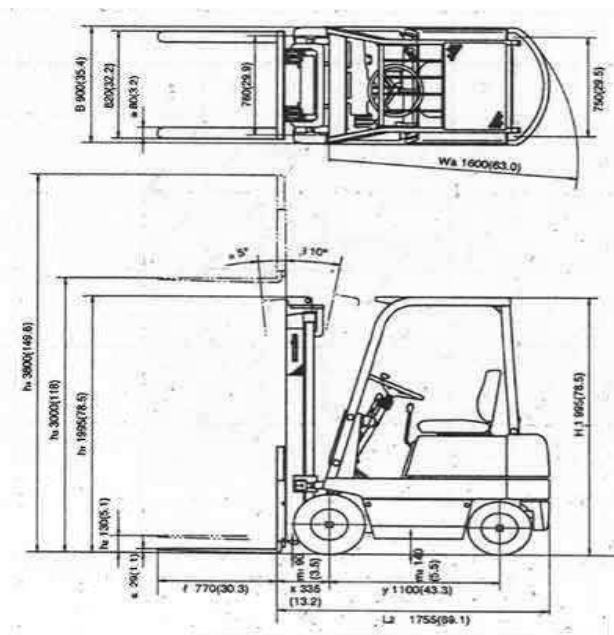


Рисунок 27 – Вилочный погрузчик Komatsu Forklift PE FB07-3

Таблица 24 – Основные характеристики погрузчика Komatsu Forklift PE FB07-3

Основные характеристики	Значение
Грузоподъёмность, кг	700
Тип двигателя	электрический
Мощность двигателя, кВт (л.с.)	1,6
Максимальная скорость, км/ч	9,5
Габаритные размеры, мм	1710×900×1995
Высота с мачтой, мм	1500 - 4000
Высота подъёма рабочего органа, мм	1500 - 4000
Наружный габаритный радиус поворота, мм	1540
Вид управления	сидя
Вид рабочего органа	вилы

На рисунке 28 изображен продукт, получаемый при переработке отходов ПЭТ. Гранулированный пластик – это уже готовое сырье для производителей упаковки и самого широкого спектра продукции: преформ для пластиковых бутылок, европоддонов, абразивных кругов, тротуарной плитки, полиэстера для текстильной промышленности, черепицы, плотной пленки, комплектующих для

автопрома (крышки моторов, панели, бамперы, двери) и многого многого другого.



Рисунок 28 – Готовые вторичные ПЭТ гранулы

Посредством рассмотренной технологической линии ПЭТ можно перерабатывать раз за разом, так как технические свойства пластика теряются незначительно, и их можно усиливать, используя различные добавки. Подобное вторичное сырье пользуется большим спросом на рынке из-за своей более низкой стоимости, по сравнению с первичным пластиком.

В России подобное производство пока только набирает обороты, а вот во многих странах пластик уже давно подлежит исключительно переработке. Ведь утилизация позволяет не только снижать цены на товары из ПЭТ и приносить внушительный доход предпринимателю, но и ограничивать потребление нефти (используемой для производства этих самых пластиков), уменьшить загрязнение окружающей среды, сократить размеры мусорных полигонов.

## 5 Расчет образования и рассеивания загрязняющих веществ

Для наглядного изображения, сколь выгодным с экологической точки зрения будет предприятие, ниже приведены расчеты образования и рассеивания загрязняющих веществ при производстве вторичных ПЭТ гранул.

Основными источниками загрязнения воздуха являются аппараты дробления полимерного сырья, грануляции и упаковки готовой продукции.

### 5.1 Расчет выбросов загрязняющих веществ при операциях дробления полимерных материалов

Расчет выбросов загрязняющих веществ при вспомогательных и механических операциях по обработке полимерных материалов и изделий выполняется с учетом [20].

Максимально-разовый выброс  $i$ -го ЗВ, г/с, при проведении операций по растариванию и дроблению полимерных материалов определяется по формуле:

$$M_i = \frac{Q_{уд} \cdot B}{3600}, \quad (1)$$

где  $Q_{уд}$  – удельный показатель выделения вещества от кг перерабатываемого материала, г/кг;

$B$  – максимальный разовый расход перерабатываемого материала на оборудовании, кг/ч ( $B = 2400$  кг).

Валовый выброс  $i$ -го вещества за год определяется по следующей формуле, т/год:

$$M_i = Q_{уд} \cdot B \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $B$  – валовый расход перерабатываемого материала, кг/год.

Удельные выделения вредных веществ в атмосферу от растаривания и дробления полимерного материала приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Удельные выделения вредных веществ в атмосферу от вспомогательных операций

Наименование технологической операции	Перерабатываемый материал	Выделяющиеся вредные вещества	
		наименование	показатель удельных выбросов, г/кг
Дробление отходов в измельчителях	термопласты	пыль используемого материала	0,70

Расчеты:

Расчет максимального выброса  $i$ -го ЗВ:

$$M_i = \frac{0,70 \cdot 300}{3600} = 0,0583 \text{ г/с}$$

Расчет валового выброса  $i$ -го вещества за год:

$$M_{\text{год } i} = 0,7 \cdot 592800 \cdot 10^{-6} = 0,4149 \text{ т/год}$$

Результаты расчета сведены в таблицу 26.

Таблица 26 – Выбросы ЗВ при проведении операций по дроблению полимерного материала

Наименование	Валовый выброс, т/г	Максимально-разовый выброс, г/с
Пыль полиэтилентерефталата	0,4149	0,0583

## 5.2 Расчет выбросов ЗВ при гранулировании полимерного материала

Расчет образования загрязняющих веществ производится в соответствии с методикой [20].

Валовый выброс загрязняющих веществ (ЗВ), т/год, определяется по формуле:

$$M_i = g_i \cdot B \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где  $g_i$  – удельное выделение  $i$ -го загрязняющего вещества на единицу массы перерабатываемого материала, г/кг (указан в таблице 27);

$B$  – масса перерабатываемого материала за год, кг ( $B = 592800$  кг).

Таблица 27 – Удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от производств по переработке пластмасс

Наименование технологической операции	Перерабатываемый материал	Выделяющиеся вредные вещества	
		наименование	показатель удельных выбросов, г/кг
Гранулирование на базе экструдеров	полиэтилтерeftалат	диметилтерeftалат	0,003
		углерод оксид	0,80
		этановая кислота	0,70
		формальдегид	0,045

Максимально-разовый выброс ЗВ, г/с, определяется по формуле:

$$G_i = \frac{g_i \cdot b}{3600 \cdot t}, \quad (4)$$

где  $b$  – максимальная масса переработанного материала в течение рабочего дня, кг ( $b=2400$  кг);



$t$  – «чистое» время, затрачиваемое на переработку материала в течение рабочего дня, ч.

Расчеты:

-для этановой кислоты:

$$M_{CH_3COOH} = 0,70 \cdot 592800 \cdot 10^{-6} = 0,4150 \text{ т/год}$$

$$G_{CH_3COOH} = \frac{0,70 \cdot 2400}{3600 \cdot 7} = 0,06667 \text{ г/с}$$

- для углерод оксида:

$$M_{CO} = 0,80 \cdot 592800 \cdot 10^{-6} = 0,4742 \text{ т/год}$$

$$G_{CO} = \frac{0,80 \cdot 2400}{3600 \cdot 7} = 0,07619 \text{ г/с}$$

-для формальдегида:

$$M_{HCHO} = 0,045 \cdot 592800 \cdot 10^{-6} = 0,0267 \text{ т/год}$$

$$G_{HCHO} = \frac{0,045 \cdot 2400}{3600 \cdot 7} = 0,00429 \text{ г/с}$$

-для диметилтерефталата:

$$M_{C_{10}H_{10}O_4} = 0,003 \cdot 592800 \cdot 10^{-6} = 0,0018 \text{ т/год}$$

$$G_{C_{10}H_{10}O_4} = \frac{0,003 \cdot 2400}{3600 \cdot 7} = 0,00029 \text{ г/с}$$

Результаты расчета сведены в таблицу 28.

Таблица 28 – Результаты расчета загрязняющих веществ при гранулировании полимерного материала

Наименование загрязняющего вещества	Максимально-разовый выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
Этановая кислота ( $C_2H_4O_2$ )	0,06667	0,4150
Углерод оксид ( $CO$ )	0,07619	0,4742
Формальдегид ( $CH_2O$ )	0,00429	0,0267
Диметилтерефталат ( $C_{10}H_{10}O_4$ )	0,00029	0,0018

### 5.3 Расчет загрязняющих веществ от упаковки готовых гранул в термопленку

При упаковке готовой продукции в полиэтиленовую пленку применяются термоупаковочные машины, которые сваривают пленки. При точечной или линейной сварке происходит расплавление пленки и её затвердевание с выделением загрязняющих веществ в атмосферу. Расчет производится в соответствии с методикой [20].

При линейной сварке термоусаживаемой пленки должен соблюдаться баланс, кг/ч:

$$m_1 = m_2 + m_3, \quad (5)$$

где  $m_1$  – масса расплавленной пленки, кг/ч;

$m_2$  – масса затвердевшей пленки, кг/ч;

$m_3$  – масса вредных веществ, выделяющихся в воздушную среду производственного помещения, кг/ч.

Масса расплавленной пленки  $m_1$  определяется по формуле:

$$m_1 = G_{св} \cdot g \cdot S \cdot h \cdot n, \quad (6)$$

где  $G_{св}$  – производительность сварочного аппарата,  $G_{св} = 200$  п/час;

$g$  – плотность пленки,  $g = 950$  кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – толщина свариваемого шва,  $h = 0,001$  м;

$n$  – количество швов,  $n = 3$  шт.;

$S$  – площадь свариваемого шва, м<sup>2</sup>.

Площадь свариваемого шва  $S$ , м<sup>2</sup>, определяется по формуле:

$$S = a \cdot b, \quad (7)$$

где  $a$  – ширина шва,  $a = 0,002$  м;

$b$  – длина шва,  $b = 0,28$  м.

Расчеты:

$$S = 0,002 \cdot 0,28 = 0,00056 \text{ м}^2;$$

$$m_1 = 200 \cdot 950 \cdot 0,00056 \cdot 0,001 \cdot 3 = 0,3192 \text{ кг/ч}.$$

Массу паров  $m_3$ , выделяющихся в воздушную среду, кг/ч, следует определять в долях от  $m_1$  по формуле:

$$m_3 = K_m \cdot K_t \cdot m_1, \quad (8)$$

где  $K_t$  – коэффициент, учитывающий временной фактор выделения вредностей ( $K_t = 0,4$ ).

$K_m$  – коэффициент, учитывающий массовую долю паров, выделившихся в воздушную среду.

Данный коэффициент  $K_m$  определяется по формуле:

$$K_m = \frac{S_1}{S}, \quad (9)$$

где  $S_1$  – площадь свариваемого шва, с которого выделяются вредные вещества, м<sup>2</sup>.

Площадь свариваемого шва  $S_1$ , с которого выделяются вредные вещества, определяется по формуле:

$$S_1 = (a + 0,025 \cdot b) \cdot h, \quad (10)$$

Расчеты:

$$S_1 = (0,002 + 0,025 \cdot 0,28) \cdot 0,001 = 0,000009 \text{ м}^2;$$

$$K_m = \frac{0,000009}{0,00056} = 0,016$$

$$m_3 = 0,016 \cdot 0,4 \cdot 0,3192 = 0,002 \text{ кг/ч}$$

Максимально-разовый выброс  $i$ -го вещества определяется по формуле, г/с:

$$M_i = \frac{Q_i \cdot m_3 \cdot 10^3}{3600}, \quad (11)$$

где  $Q_i$  – масса вредного вещества, в долях от  $m_3$ , кг/ч.

При сварке термоусадочной ПЭ-пленки в воздушную среду производственного помещения выделяются вредные вещества, указанные в таблице 29.

Таблица 29 – Перечень и массы веществ, выделяемые при сварке термоусадочной ПЭ-пленки

№ п/п	Наименование вредного вещества	Масса вредного вещества $Q_i$ в долях от $m_3$ , кг/ч
1	Ацетальдегид	0,202
2	Углерод оксид	0,300
3	Формальдегид	0,282
4	Этановая кислота	0,216

Валовый выброс  $i$ -го вещества за год определяется по формуле, т/год:

$$M_{\text{год}_i} = M_i \cdot T \cdot k_3 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}, \quad (12)$$

где  $T$  – годовой фонд рабочего времени для данного оборудования, ч/год;  
 $k_3$  – коэффициент загрузки оборудования, который определяется по формуле:

$$k_3 = \frac{t}{T} M, \quad (13)$$

где  $t$  – фактическое число часов работы оборудования за год, ч/год.

Ацетальдегид:

$$M_{\text{CH}_3\text{CHO}} = \frac{0,202 \cdot 0,002 \cdot 10^3}{3600} = 0,0001 \text{ г/с}$$

$$M_{\text{годCH}_3\text{CHO}} = 0,0001 \cdot 1976 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 0,0007 \text{ т/год}$$

Углерод оксид:

$$M_{\text{CO}} = \frac{0,300 \cdot 0,002 \cdot 10^3}{3600} = 0,0002 \text{ г/с}$$

$$M_{\text{годCO}} = 0,0002 \cdot 1976 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 0,0014 \text{ т/год}$$

Формальдегид:

$$M_{\text{НСНО}} = \frac{0,282 \cdot 0,002 \cdot 10^3}{3600} = 0,0002 \text{ г/с}$$

$$M_{\text{годНСНО}} = 0,0002 \cdot 1976 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 0,0014 \text{ т/год}$$

Этановая кислота:

$$M_{\text{СН}_3\text{СООН}} = \frac{0,216 \cdot 0,002 \cdot 10^3}{3600} = 0,00012 \text{ г/с}$$

$$M_{\text{годСН}_3\text{СООН}} = 0,00012 \cdot 1976 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 0,0009 \text{ т/год}$$

Результаты расчета сведены в таблицу 30.

Таблица 30 – Результаты расчета загрязняющих веществ при упаковке готовых гранул в термопленку

Наименование загрязняющего вещества	Максимально-разовый выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
Ацетальдегид ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ )	0,0001	0,0007
Углерод оксид ( $\text{CO}$ )	0,0002	0,0014
Формальдегид ( $\text{CH}_2\text{O}$ )	0,0002	0,0014
Этановая кислота ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ )	0,00012	0,0009

## **5.4 Расчет рассеивания загрязняющих веществ от точечного источника выбросов в атмосферу**

Расчет рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере производится согласно [21].

Источник рассеивания загрязняющих веществ является одиночным, выброс в атмосферу осуществляется посредством системы вентиляции. Расчётами определяются разовые концентрации, относящиеся к 20–30-минутному интервалу осреднения. При расчёте приземных концентраций учитываются метеорологические условия и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосферу города Красноярска.

### **5.4.1 Подбор и расчет системы вентиляции**

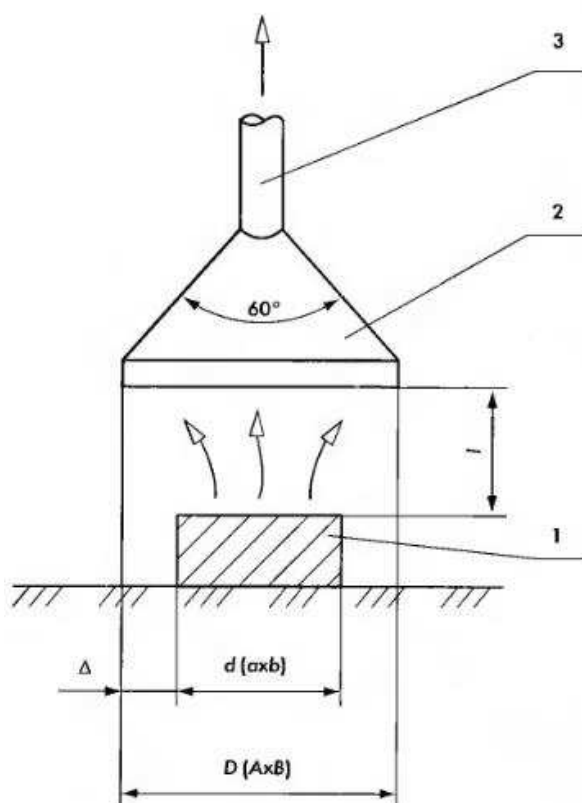
Предприятия по переработке пластмассы должны быть оборудованы эффективной системой вентиляции. Вследствие чего для более полного анализа и изучения технологической линии будет разработана система вытяжной вентиляции для производственного цеха по переработке пластмасс методом грануляции.

В данной технологической линии выделяющиеся в помещении тепло, влага, газы, пыль, запахи точно поступают в воздух помещения, поэтому рационально все вредные вещества удалять из помещения непосредственно в том месте, где они образуются. Для этого будет использована местная вытяжная вентиляция. Местных отсосов будет достаточно, так как вредные вещества выделяются с устойчивыми потоками.

Местные вытяжные системы, весьма эффективны, так как позволяют удалять вредные вещества непосредственно от места их образования или выделения, не давая им распространиться в помещении. Благодаря значительной концентрации вредных веществ (паров, газов, пыли), обычно

удается достичь хорошего санитарно-гигиенического эффекта при небольшом объеме удаляемого воздуха.

Местная вытяжная вентиляция предназначена для улавливания и удаления из обслуживаемого помещения газов, пыли, теплоты и влаги непосредственно от мест их выделения. Локализует распространение загрязняющих веществ в воздух помещения местный отсос – устройство для улавливания вредностей (теплоты, влаги, пыли, газов и паров) у мест их образования, присоединяемое к воздуховодам систем местной вытяжной вентиляции и являющееся, как правило, составной частью технологического оборудования. Схема данного устройства представлена на рисунке 29.



1 – источник выделения загрязняющих веществ; 2 – зонтик; 3 – газопровод (воздуховод)

Рисунок 29 – Схема работы зонта



Недостающий объем воздуха в помещении компенсируют системами приточной вентиляции. Приточные системы, как правило, общеобменные, то есть подача воздуха происходит через специальные устройства – воздухораспределители – осуществляется равномерно по объему всего помещения в верхнюю, среднюю или нижнюю зоны. Системы вентиляции классифицируются: приточная – вытяжная, местная – общеобменная, механическая – естественная. Расчеты производятся в соответствии с [22].

Расчет потребного воздухообмена.

Воздухообменом называется частичная или полная замена воздуха, содержащего вредности, чистым атмосферным воздухом. Воздухообмены разделяют по виду вредностей, для разбавления которых они предназначены: воздухообмен, по избыткам явной теплоты, по избыткам влаги, по массе выделяющихся вредных веществ.

Минимальный потребный воздухообмен для данной технологической линии может быть принят на основании минимальной известной кратности воздухообмена ввиду отсутствия более точных параметров для расчета потребного воздухообмена.

В соответствии с [23] при переработке полимерных материалов производственные помещения должны быть оборудованы местной вытяжкой и общеобменной вентиляцией. Относительная влажность в рабочих помещениях должна быть не ниже 50%. Кратность обмена воздуха в помещении должна составлять не менее 8.

Расчет потребного воздухообмена при известной кратности воздуха выполняется по следующей формуле:

$$L = n \cdot V_n, \quad (14)$$

$$L = 8 \cdot 3000 = 24000 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

$$V_n = a \cdot b \cdot c = 20 \cdot 30 \cdot 5 = 3000 \text{ м}^2$$

где  $L$  - количество воздуха для удаления из помещения вредных выделений, м<sup>3</sup>/ч;

$V_n$  – объем помещения;

$n$  – кратность воздухообмена.

Аэродинамический расчет воздуховодов. В системах вентиляции применяются воздуховоды: металлические, металлопластиковые, неметаллические. Воздуховоды могут быть гибкими, полугибкими, теплоизолированными, звукопоглощающими. По форме воздуховоды бывают круглого и прямоугольного сечения.

Металлические воздуховоды изготавливаются из листовой кровельной оцинкованной или нержавеющей стали на заводах или заготовительных мастерских. Предпочтение следует отдавать круглым воздуховодам из-за меньшего аэродинамического сопротивления, расхода металла и трудоемкости при изготовлении. Преимущество прямоугольных воздуховодов, в том, что при открытых прокладках они лучше вписываются в интерьер общественных зданий, проще размещаются в пространстве с ограниченной высотой (например, за подшивным потолком).

Металлопластиковые воздуховоды изготавливаются из листовых панелей, которые представляют собой слой вспененного пластика толщиной 20 мм, проложенный между двумя слоями термообработанного гофрированного алюминия. Эти воздуховоды легки, обладают высокой прочностью и теплоизоляционной способностью, имеют хороший внешний вид, могут изготавливаться непосредственно на объекте.

Гибкие воздуховоды изготавливаются из многослойной ламинированной алюминиевой фольги и пленки из полиэфира. Форму воздуховодам придает специальный стальной проволочный каркас. Воздуховоды легки, термостойки, упрощают монтаж. Однако создают большое аэродинамическое сопротивление. Применяются в качестве присоединительных воздуховодов небольшой длины.

Аэродинамический расчет вентиляционной системы производят для:

- подбора размеров поперечных сечений воздуховодов по рекомендуемым скоростям движения воздуха;
- определения потерь давления в системе.

Потери давления в системах вентиляции складываются из потерь давления на трение и потерь давления в местных сопротивлениях, Па:

$$\Delta P_{сети} = \Delta P_{тр.} + Z \quad (15)$$

Потери давления на трение, Па:

$$\Delta P_{тр.} = R \cdot l \cdot n, \quad (16)$$

где  $R$  - удельные потери давления на трение, Па/м;

$l$  - длина участка воздуховода, м;

$n$  - поправочный коэффициент, который зависит от абсолютной эквивалентной шероховатости воздуховодов.

Удельные потери давления на трение, Па/м, в круглых воздуховодах определяют по формуле:

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot P_{\partial}, \quad (17)$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления трения;

$d$  - диаметр воздуховода, м;

$P_{\partial}$  - динамическое давление, Па.

Коэффициент сопротивления трения  $\lambda$ , рассчитывается по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{k_{\partial}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (18)$$

где  $k_э$  - абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности воздуховода;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu} , \quad (19)$$

где -  $v$  скорость движения воздуха в воздуховоде, м/с;

$\nu$  - кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Динамическое давление, Па:

$$P_0 = \rho \cdot v^2 / 2 \quad (20)$$

Потери давления в местных сопротивлениях, Па:

$$Z = \sum \xi \cdot P_0 , \quad (21)$$

где  $\sum \xi$  сумма коэффициентов местных сопротивлений на расчетном участке воздуховода, коэффициенты местных сопротивлений на границе двух участков относят к участку с меньшим расходом,

$\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Следует иметь в виду, что расход воздуха в круглом и прямоугольном воздуховоде с эквивалентным диаметром при равенстве скоростей не совпадают.

При движении воздуха с температурой отличной от 20°C потери давления необходимо принимать с поправочными коэффициентами  $K_1$  на трение,  $K_2$  – в местных сопротивлениях. Данные указаны в таблице 31.

При расчете желательно, чтобы скорости движения воздуха на участках возрастали по мере приближения к вентилятору.

Таблица 31 – Коэффициенты местных сопротивлений

№ участка	Вид местного сопротивления	Эскиз	Кол-во	Угол $\alpha$ , град.	К-т местного сопротивления $\xi$
1	Внезапный поворот трубы (колена) вызывает значительные потери энергии		1	90	1,0
1	Вытяжной зонт		1	-	1,0
2	Внезапный поворот трубы вызывает потери энергии, т.к. в нем происходит отрыв потока и вихреобразование		2	90	1,0
2	Резкое расширение трубы		1	-	0,5
2	Тройник под углом $90^\circ$ на проходе потока		1	90	Значение = 12,3 при $L_n/L_c = 0,8$ и $F_n/F_c = 0,6$
2	Переходный сужающийся конус перед вентилятором (уменьшение диаметра в 2 раза)		1	-	0,2
2	Вентилятор			-	-
3	Переходный расширяющийся конус после вентилятора (увеличение диаметра в 2 раза)		1	-	0,5
3	Вытяжная шахта с зонтом		1	-	1,3
4	Вытяжной зонт		1	-	1
4	Тройник под углом $90^\circ$ на ответвлении потока		1	90	1,1 при $L_n/L_c = 0,8$ и $F_o/F_n = 0,3$
					$\sum \xi = 19,9$

Результаты расчетов представлены в таблице 32.

Таблица 32 – Расчет воздуховодов системы

№ участка	L, м <sup>3</sup> /ч	l, м	d, мм	v, м/с	R, Па/м	Rl, Па	P <sub>д</sub> , Па	∑ξ	Z=∑ξ P <sub>д</sub> Па	Rl+Z, Па
1	20000	8,5	900	8	0,5	4,25	38,4	2	76,8	81,05
2	24000	5,5	1100	9	0,6	3,3	48,6	14	680,4	683,7
3	24000	2,5	1100	8	0,45	1,125	38,4	1,8	69,12	70,245
4	4000	3	500	8	1,4	4,2	38,4	2,1	80,64	84,84

Подбор вентилятора и электродвигателя.

Полное требуемое давление с учетом запаса на непредвиденные сопротивления сети в размере 15% составят (без учета некоторых местных сопротивлений):

$$\Delta p_{\text{мех}} = 1,15 \cdot 919,8 \approx 922 \text{ Па}$$

Требуемая подача вентилятора с учетом утечек в размере 10%:

$$L = 1,1 \cdot 24000 = 264000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

К установке принимаем центробежный дутьевой вентилятор одностороннего всасывания ВДН – 11,2, изображенный на рисунке 30, технические характеристики которого представлены в таблице 33.

Таблица 33 – Технические характеристики ВДН – 11,2

Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Напор, кПа	КПД, %	Двигатель		
			Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин
27650	4,82	83	4А-200L4	45	1500

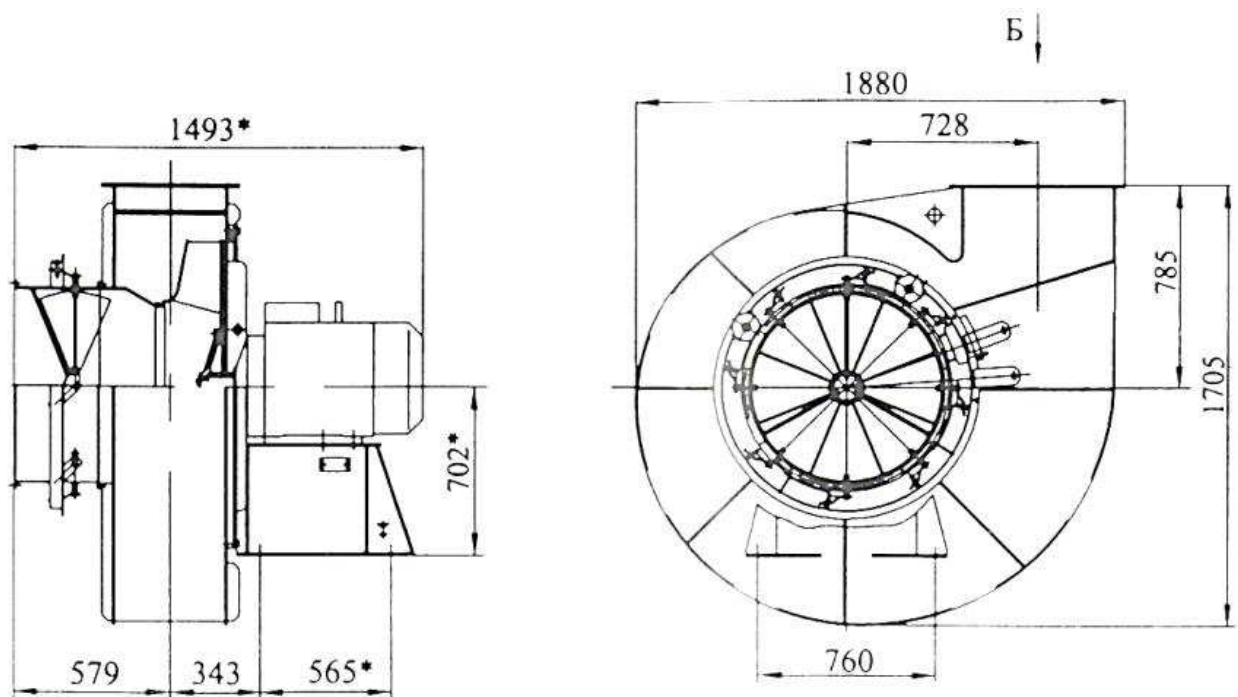


Рисунок 30 –Центробежный дутьевой вентилятор одностороннего всасывания ВДН – 11,2

Вытяжные зонты. Для улавливания вредных при наличии устойчивых тепловых потоков применяют вытяжные зонты. Типичный вид которых представлен на рисунке 31. Их габаритные размеры устанавливают исходя из следующих соображений.

Высота установки зонта принимается в пределах  $H = 1,8...2$  м. Размеры прямоугольного зонта в плане ( $A \times B$  м):

$$A = a + 0,8h , \quad (22)$$

$$B = b + 0,8h , \quad (23)$$

где  $A, B$  – размеры перекрываемого оборудования, м;

$h$  - расстояние от оборудования до низа зонта (м), принимаемое не более  $0,8d_3$  ( $d_3$  – эквивалентный по площади диаметр источника).

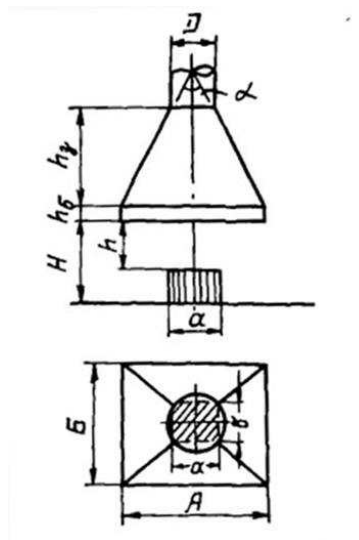


Рисунок 31 – Вытяжной зонт

Для круглого зонта  $D_3 = d + 0,8h$ , где  $D_3$  – диаметр круглого зонта, м;  $d$  – диаметр перекрываемого оборудования, м.

Равномерное распределение скорости всасывания  $v_3$  по всему сечению зонта обеспечивается при угле его раскрытия  $\alpha \leq 60$ .

Высота зонта:

$$h_3 = \frac{A-D}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + h_6, \quad (24)$$

где  $D$  – диаметр вытяжной трубы, м;

$h_6$  – высота борта ( $h_6 = 0,1 \dots 0,3$  м).

Объем удаляемого воздуха ( $L_3, \text{м}^3/\text{ч}$ ) следует определять после уточнения конструктивных размеров зонта, используя формулу:

$$L_3 = 3600 F_3 v_3, \quad (25)$$

где  $F_3$  – площадь всасывания, т. е.  $A \times B$  или  $0,785 D_3^2$ ;



$v_3$  – скорость всасывания, принимаемая для нетоксичных вредностей в пределах 0,15...0,25 м/с.

На эффективность зонта значительно влияет подвижность воздуха в помещении  $v_n$ . При  $v_n > 0,4$  м/с, а также в случае малой тепловой мощности конвективных потоков рекомендуется снабжать зонт откидными фартуками с одной, двух или трех сторон. При наличии токсичных вредностей принимаются следующие значения скорости всасывания: 1,05...1,25 – для зонтов, открытых с четырех сторон; 0,9 ... 1,05 – с трех сторон; 0,75...0,9 – с двух сторон; 0,5...0,75 – с одной стороны.

Если под зонтом отсутствуют конвективные источники теплоты, скорость всасывания в приемном отверстии зонта с учетом подвижности воздуха в помещении  $v_n$  определяют по рисунку 32, составленному для зонтов с центральным углом раскрытия  $\alpha \leq 60^\circ$  в безразмерных координатах:  $v_n/v_3$ ,  $h/A$ ,  $x/A$ . Здесь  $h$  – вертикальное расстояние от нижней кромки всасывающего отверстия зонта до поверхности источника вредностей, м;  $A$  – наименьшая сторона зонта, м;  $x$  – горизонтальное расстояние между кромкой зонта и габаритами укрываемого источника, м.

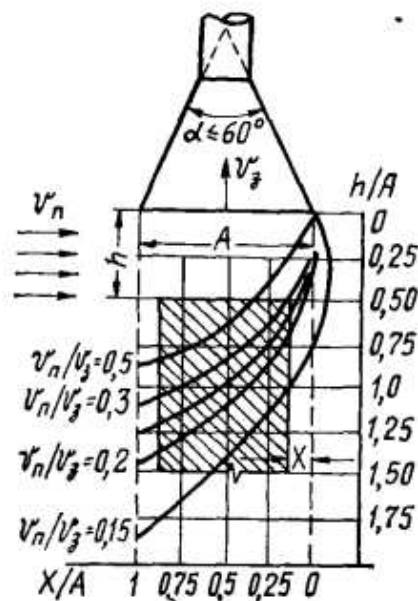


Рисунок 32 – Линии границ воздуха, засасываемого зонтом

Подвижность воздуха в помещении  $v_n$  принимается в зависимости от периода года и категории выполняемой работы и не должна превышать 0,2 –1 м/с.

Результаты расчетов представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Результаты расчета вытяжных зонтов

Зонт №1	Зонт №2
Перекрываемое оборудование	
Дробильный аппарат	Экструдер-гранулятор
Размеры прямоугольного зонта в плане (А·Б м)	
А = 1,4 + 0,8·0,4=1,72 м Б = 1,2 + 0,8·0,4=1,52 м	А = 1,4 + 0,8·0,4=1,72 м Б = 1,2 + 0,8·0,4=1,52 м
Высота зонта:	
$h_3 = \frac{1,72 - 0,9}{2 \operatorname{tg} \frac{60}{2}} + 0,1 = 0,8 \text{ м}$	$h_3 = \frac{1,72 - 0,5}{2 \operatorname{tg} \frac{60}{2}} + 0,1 = 1,15 \text{ м}$
Объем удаляемого воздуха ( $L_3$ , м <sup>3</sup> /ч)	
$L_3 = 3600 \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 1,7 = 20000$	$L_3 = 3600 \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 4000$

### 5.5 Расчет максимальных приземных концентраций загрязняющих веществ

Источником, загрязняющим атмосферу на данном предприятии является система вентиляции. Источник имеет следующие параметры:

$$H = 6 \text{ м};$$

$$D = 1,1 \text{ м};$$

$$\omega_0 = 4 \text{ м/с};$$

$$T = 30^\circ \text{C};$$

$$A = 200.$$

В таблице 35 представлены загрязняющие вещества, выбрасываемые точечным источником в атмосферу.

Таблица 35 – Количество загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени

Загрязняющее вещество	Количество загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с
Этановая кислота ( $C_2H_4O_2$ )	0,0668
Углерода оксид ( $CO$ )	0,0764
Формальдегид ( $CH_2O$ )	0,0045
Диметилтерефталат ( $C_{10}H_{10}O_4$ )	0,0003
Ацетальдегид ( $CH_3CHO$ )	0,00010

Максимальная приземная концентрация вредных веществ  $C_m$  ( $mg/m^3$ ) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  (м) от источника должна определяться по формуле:

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (26)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе ( $A=200$ );

$M$  – масса загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени (мощность выброса), г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;

$m$  и  $n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброс;

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ ;

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газо-воздушной смеси  $T_2$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_a$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$V_1$  – расход газовой смеси,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяемый по формуле:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0, \quad (27)$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$\omega_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с.

$$V_1 = \frac{3,14 \cdot 1,1^2 \cdot 4}{4} = 7,5988 \text{ м}^3/\text{с}$$

Значение коэффициента  $A$ , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается равным:

- а) 250 – для республики Бурятия и Забайкальского края;
- б) 200 – для Европейской территории РФ: для районов РФ южнее  $50^{\circ}$  с. ш., для остальных районов Нижнего Поволжья, Кавказа; для Азиатской территории РФ: для Дальнего Востока и остальной территории Сибири и Средней Азии;
- в) 180 – для Европейской территории РФ и Урала от  $50$  до  $52^{\circ}$  с. ш. за исключением попадающих в эту зону перечисленных выше районов;
- г) 160 – для Европейской территории РФ и Урала севернее  $52^{\circ}$  с. ш.
- д) 140 – для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

Значения мощности выброса  $M$  (г/с) и расхода газовой смеси  $V_1$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) при проектировании предприятий определяются расчетом в технологической части проекта или принимаются в соответствии с действующими для данного производства (процесса) нормативами.

Величину  $M$  следует относить к 20 – 30 – минутному периоду осреднения, в том числе и в случаях, когда продолжительность выброса менее 20 минут.

При определении необходимой степени очистки выбросов от вредных веществ должны приниматься реальные значения коэффициента полезного действия очистных устройств при установленных условиях их эксплуатации.

Величину  $\Delta T$  следует определять, принимая температуру окружающего атмосферного воздуха  $T_в$ , равную средней максимальной температуре воздуха наиболее теплого месяца года, а температуру выбрасываемой в атмосферу газовой смеси  $T_г$  – по действующим для данного производства технологическим нормативам. Для города Красноярск средняя температура наиболее жаркого месяца составляет  $25,8^\circ\text{C}$ .

$$\Delta T = T_г - T_в, \quad (28)$$

$$\Delta T = 30 - 25,8 = 4,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Значение безразмерного коэффициента  $F$  принимается:

а) для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, золы и т. п., скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю) – 1;

б) для мелкодисперсных аэрозолей при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов не менее 90% - 2; от 75 до 90% - 2,5; менее 75% и при отсутствии очистки – 3.

Значение коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f, v_m, v'_m, f_e$ :

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (29)$$

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}, \quad (30)$$

$$v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H}, \quad (31)$$

$$f_e = 800 (v'_m)^3, \quad (32)$$

Расчеты:

$$f = 1000 \frac{8 \cdot 1,1}{6^2 \cdot 4,2} = 465,609$$

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{7,5988 \cdot 4,2}{6}} = 1,1346$$

$$v'_m = 1,3 \frac{8 \cdot 1,1}{6} = 1,9067$$

$$f_e = 800 \cdot (1,9067)^3 = 5545,1629$$

Безразмерный коэффициент  $m$  определяется в зависимости от параметра  $f$  по формуле (при  $f \geq 100$ ):

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}, \quad (33)$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{465,609}} = 0,1897$$

Значение безразмерного коэффициента  $n$  определяется в зависимости от параметра  $v_m$  при условии, что  $f \geq 100$ . При  $0,5 \leq v_m < 2$ :

$$n = 0,532v_m^2 - 2,13v_m + 3,13, \quad (34)$$

$$n = 0,532 \cdot 1,1346^2 - 2,13 \cdot 1,1346 + 3,13 = 1,3981$$

Для  $f \geq 100$  и  $v_m \geq 0,5$  (холодные выбросы) при расчете вместо формулы  $C_{max}$  (26) используется формула:

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^{\frac{4}{3}}} \cdot K, \quad (35)$$

где  $K = \frac{D}{8V_1} = \frac{1,1}{8 \cdot 7,5988} = 0,0181$

Определим значение максимальной приземной концентрации загрязняющего вещества в атмосфере  $C_m$  (мг/м<sup>3</sup>):

Для этановой кислоты:

$$C_M^{CH_3COOH} = \frac{200 \cdot 0,0668 \cdot 1 \cdot 0,1897 \cdot 1,3981 \cdot 1}{6^{\frac{4}{3}}} \cdot 0,0181 = 0,0058784 \text{ мг/м}^3$$

Для углерод оксида:

$$C_M^{CO} = \frac{200 \cdot 0,0764 \cdot 1 \cdot 0,1897 \cdot 1,3981 \cdot 1}{6^{\frac{4}{3}}} \cdot 0,0181 = 0,0067237 \text{ мг/м}^3$$

Для формальдегида:

$$C_M^{HCHO} = \frac{200 \cdot 0,0045 \cdot 1 \cdot 0,1897 \cdot 1,3981 \cdot 1}{6^{\frac{4}{3}}} \cdot 0,0181 = 0,003948 \text{ мг/м}^3$$

Для диметилтерефталата:

$$C_M^{C_{10}H_{10}O_4} = \frac{200 \cdot 0,0003 \cdot 1 \cdot 0,1897 \cdot 1,3981 \cdot 1}{6^{\frac{4}{3}}} \cdot 0,0181 = 0,0000251 \text{ мг/м}^3$$

Для ацетальдегида:

$$C_M^{CH_3CHO} = \frac{200 \cdot 0,0001 \cdot 1 \cdot 0,1897 \cdot 1,3981 \cdot 1}{6^{\frac{4}{3}}} \cdot 0,0181 = 0,00000883 \text{ мг/м}^3$$

Результаты расчета сведены в таблицу 36.

Таблица 36 – Максимальные приземные концентрации загрязняющих веществ в атмосфере

Загрязняющее вещество	$C_m$ (мг/м <sup>3</sup> )
Этановая кислота (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> )	0,0058784
Углерода оксид (CO)	0,0067237
Формальдегид (CH <sub>2</sub> O)	0,0003948
Диметилтерефталат (C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> )	0,0000251
Ацетальдегид (CH <sub>3</sub> CHO)	0,0000088

### 5.6 Расчет расстояния, на котором наблюдается максимальная приземная концентрация

Расстояние  $x_m$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $C_m$  определяется по формуле:



$$x_m = \frac{5-F}{4} \cdot dH, \quad (36)$$

где  $d$  – безразмерный коэффициент, значение которого при  $f > 100$  находится по формуле, при  $0,5 \leq v'_m < 2$ :

$$d = 11v'_m, \quad (37)$$

$$d = 11,4 \cdot 1,9067 = 21,736$$

Расстояние  $x_m$  (м) для газообразных выбросов:

$$x_m = \frac{5-1}{4} \cdot 21,736 \cdot 6 = 130,4 \text{ м}$$

### 5.7 Расчет опасной скорости ветра

Значение опасной скорости  $u_m$  (м/с) на уровне флюгера (обычно 10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации загрязняющих веществ  $c_m$ , в случае  $f \geq 100$  определяется по формуле, при  $0,5 < v'_m \leq 2$ :

$$u_m = v'_m, \quad (38)$$

$$u_m = 1,9067 \text{ м/с}$$

### 5.8 Обоснование принятого размера санитарно-защитной зоны

Санитарно-защитная зона (СЗЗ) – специальная территория с особым режимом использования, которая устанавливается вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и

здоровье человека. Размер СЗЗ обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух (химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами.

По своему функциональному назначению санитарно-защитная зона является защитным барьером, обеспечивающим уровень безопасности населения при эксплуатации объекта в штатном режиме. Ориентировочный размер СЗЗ определяется согласно [25] на время проектирования и ввода в эксплуатацию объекта, в зависимости от класса опасности предприятия.

Предприятие по переработке пластмасс относится к четвёртому классу опасности, санитарно-защитная зона для которого составляет 100 м.

### **5.9 Расчет приземной концентрации вредных веществ в атмосфере на различных расстояниях от источника выброса**

При опасной скорости ветра  $u_m$  приземная концентрация вредных веществ  $c$  (мг/м<sup>3</sup>) в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях  $x$  (м) от источника выброса определяется по формуле:

$$c = s_1 c_m, \quad (39)$$

где  $s_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $x/x_m$  по формулам:

$$s_1 = 3(x/x_m)^4 - 8(x/x_m)^3 + 6(x/x_m)^2, \text{ при } x/x_m < 1, \quad (40)$$

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13(x/x_m)^2 + 1}, \text{ при } 1 < x/x_m, \quad (41)$$

Найдем приземную концентрацию вредных веществ  $C_i$  (мг/м<sup>3</sup>) на расстояниях 130,4; 100, 150 метров от источника выброса.

Расчеты:

Для газообразных веществ:

$$x_1=130,4: \quad \frac{x}{x_M} = \frac{130,4}{130,4} = 1$$

$$x_2=100: \quad \frac{x}{x_M} = \frac{100}{130,4} = 0,77$$

$$x_3=150: \quad \frac{x}{x_M} = \frac{150}{130,4} = 1,15$$

Для низких и наземных источников (высотой  $H < 10$  м) при значениях  $x/x_M < 1$  величина  $s_1$  в формуле (39) заменяется на величину  $s_1''$ , определяемую по формуле:

$$s'' = 0,125 \cdot (10 - H) + 0,125 \cdot (H - 2) \cdot s_1, \text{ при } 2 \leq H < 10, \quad (42)$$

Расчеты:

$$s_1 = 3 \left( \frac{130,4}{130,4} \right)^4 - 8 \left( \frac{130,4}{130,4} \right)^3 + 6 \left( \frac{130,4}{130,4} \right)^2 = 1$$

$$s''_1 = 0,125 \cdot (10 - 6) + 0,125 \cdot (6 - 2) \cdot 1 = 1$$

$$s_2 = 3 \left( \frac{100}{130,4} \right)^4 - 8 \left( \frac{100}{130,4} \right)^3 + 6 \left( \frac{100}{130,4} \right)^2 = 0,96$$

$$s''_2 = 0,125 \cdot (10 - 6) + 0,125 \cdot (6 - 2) \cdot 0,96 = 0,98$$

$$s_3 = \frac{1,13}{0,13 \cdot \left( \frac{150}{130,4} \right)^2 + 1} = 1,02$$

$$s''_3 = 0,125 \cdot (10 - 6) + 0,125 \cdot (6 - 2) \cdot 1,01 = 1,01$$

Приземные концентрации для этановой кислоты:

$$c_1 = 1 \cdot 0,0058784 = 0,00588 \text{ мг/м}^3$$

$$c_2 = 0,98 \cdot 0,0058784 = 0,00576 \text{ мг/м}^3$$

$$c_3 = 1,01 \cdot 0,0058784 = 0,00592 \text{ мг/м}^3$$

Приземные концентрации для углерод оксида:

$$c_1 = 1 \cdot 0,0067237 = 0,00672 \text{ мг/м}^3$$

$$c_2 = 0,98 \cdot 0,0067237 = 0,00658 \text{ мг/м}^3$$

$$c_3 = 1,01 \cdot 0,0067237 = 0,00677 \text{ мг/м}^3$$

Приземные концентрации для формальдегида:

$$c_1 = 1 \cdot 0,0003948 = 0,00039 \text{ мг/м}^3$$

$$c_2 = 0,98 \cdot 0,0003948 = 0,00039 \text{ мг/м}^3$$

$$c_3 = 1,01 \cdot 0,0003948 = 0,00040 \text{ мг/м}^3$$

Приземные концентрации для диметилтерефталата:

$$c_1 = 1 \cdot 0,0000251 = 0,0000251 \text{ мг/м}^3$$

$$c_2 = 0,98 \cdot 0,0000251 = 0,0000246 \text{ мг/м}^3$$

$$c_3 = 1,01 \cdot 0,0000251 = 0,0000253 \text{ мг/м}^3$$

Приземные концентрации для ацетальдегида:

$$c_1 = 1 \cdot 0,0000088 = 0,0000088 \text{ мг/м}^3$$

$$c_2 = 0,98 \cdot 0,0000088 = 0,0000086 \text{ мг/м}^3$$

$$c_3 = 1,01 \cdot 0,0000088 = 0,0000089 \text{ мг/м}^3$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 37.

Таблица 37 – Максимальные приземные концентрации в зависимости от расстояния

Расстояние	Загрязняющее вещество				
	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) мг/м <sup>3</sup>	(CO) г/м <sup>3</sup>	(CH <sub>2</sub> O) мг/м <sup>3</sup>	(C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> ) мг/м <sup>3</sup>	(CH <sub>3</sub> CHO) мг/м <sup>3</sup>
130,4	0,00588	0,00672	0,00039	0,0000251	0,0000088
100	0,00576	0,00658	0,00039	0,0000246	0,0000086
150	0,00592	0,00677	0,00040	0,0000253	0,0000089

### 5.10 Расчет приземной концентрации загрязняющих веществ с учетом фоновой концентрация вредных веществ в атмосфере

В случае наличия совокупности источников выброса вклады этих источников (или их части) могут учитываться в расчетах загрязнения воздуха путем использования фоновой концентрации  $C_{\phi}$  (мг/м<sup>3</sup>), которая для отдельного источника выброса характеризует загрязнение атмосферы в городе

или другом населенном пункте, создаваемое другими источниками, исключая данный.

Фоновая концентрация относится к тому же интервалу осреднения (20 - 30 мин), что и максимальная разовая ПДК. По данным наблюдений  $C_{\phi}$  определяется как уровень концентраций, превышаемый в 5 % наблюдений за разовыми концентрациями.

Определение фоновой концентрации производится на основании данных наблюдений за загрязнением атмосферы по нормативной методике, утвержденной Госкомгидрометом и Минздравом РФ.

В случае, когда нет возможности получить данные о фоновых концентрациях из определенных источников, ее значение находится как:

$$C_{\phi}=0,9 \cdot \text{ПДК}, \quad (43)$$

Для этановой кислоты ПДК=0,2 мг/м<sup>3</sup>

$$C_{\phi}=0,9 \cdot 0,2=0,18 \text{ мг/м}^3$$

Для СО ПДК=5 мг/м<sup>3</sup>

$$C_{\phi}=0,9 \cdot 5=4,5 \text{ мг/м}^3$$

Для формальдегида ПДК=0,035 мг/м<sup>3</sup>

$$C_{\phi}=0,9 \cdot 0,05=0,045 \text{ мг/м}^3$$

Для диметилтерефталата ПДК=0,05 мг/м<sup>3</sup>

$$C_{\phi}=0,9 \cdot 0,05=0,045 \text{ мг/м}^3$$

Для ацетальдегида ПДК=0,01 мг/м<sup>3</sup>

$$C_{\phi}=0,9 \cdot 0,01=0,009 \text{ мг/м}^3$$

В таблице 38 представлены сведения о ПДК и фоновых концентрациях загрязняющих веществ.

Таблица 38 – Значение предельно допустимых и фоновых концентраций загрязняющих веществ[24]

Загрязняющее вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	C <sub>ф</sub> , мг/м <sup>3</sup>
Этановая кислота (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> )	0,2	0,18
Углерода оксид (CO)	5	4,5
Формальдегид (CH <sub>2</sub> O)	0,05	0,045
Диметилтерефталат (C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> )	0,05	0,045
Ацетальдегид (CH <sub>3</sub> CHO)	0,01	0,009

Суммарная концентрация вредных веществ (мг/м<sup>3</sup>) находится по формуле:

$$C_{\text{сум}} = C_{\text{м}} + C_{\phi}, \quad (44)$$

Для этановой кислоты (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>):

$$x_1=50 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00588+0,18=0,18588 \text{ мг/м}^3$$

$$x_2=80 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00576+0,18=0,18576 \text{ мг/м}^3$$

$$x_3=100 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00592+0,18=0,18592 \text{ мг/м}^3$$

Для СО:

$$x_1=50 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00672+4,5=4,50672 \text{ мг/м}^3$$

$$x_2=80 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00658+4,5=4,50658 \text{ мг/м}^3$$

$$x_3=100 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00677+4,5=4,50677 \text{ мг/м}^3$$

Для формальдегида (НСНО):

$$x_1=50 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00039+0,045=0,04539 \text{ мг/м}^3$$

$$x_2=80 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,00039+0,045=0,04539 \text{ мг/м}^3$$

$$x_3=100 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,000340+0,045=0,04540 \text{ мг/м}^3$$

Для диметилтерефталата ( $C_{10}H_{10}O_4$ ):

$$x_1=65,2 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,0000251+0,045=0,04503 \text{ мг/м}^3$$

$$x_2=100 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,0000246+0,045=0,04502 \text{ мг/м}^3$$

$$x_3=150 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,0000253+0,0455=0,04503 \text{ мг/м}^3$$

Для ацетальдегида ( $CH_3CHO$ ):

$$x_1=65,2 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,0000088+0,009=0,0090088 \text{ мг/м}^3$$

$$x_2=100 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,0000086+0,009=0,0090086 \text{ мг/м}^3$$



$$x_3=150 \text{ м: } C_{\text{сум}}=0,0000089+0,009=0,0090089 \text{ мг/м}^3$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 39.

Таблицы 39 – Суммарные концентрации с учетом фоновых в зависимости от расстояния

Расстояние	Загрязняющее вещество				
	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) мг/м <sup>3</sup>	(CO) г/м <sup>3</sup>	(CH <sub>2</sub> O) мг/м <sup>3</sup>	(C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> ) мг/м <sup>3</sup>	(CH <sub>3</sub> CHO) мг/м <sup>3</sup>
130,4	0,18588	4,50672	0,04539	0,04503	0,0090088
100	0,18576	4,50658	0,04539	0,04502	0,0090086
150	0,18592	4,50677	0,04540	0,04503	0,0090089

### 5.11 Расчет приземной концентрации загрязняющих веществ в долях ПДК

Концентрации загрязняющих веществ  $C$  – доли ПДК, рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{C_M + C_\Phi}{\text{ПДК}}, \quad (45)$$

Для этановой кислоты (CH<sub>3</sub>COOH):

$$x_1=130,4 \text{ м: } q = \frac{0,18588}{0,2} = 0,92939$$

$$x_2=100 \text{ м: } q = \frac{0,18576}{0,2} = 0,92878$$

$$x_3=150 \text{ м: } q = \frac{0,18592}{0,2} = 0,92961$$

Для CO:

$$x_1=130,4 \text{ м: } q = \frac{4,50672}{5} = 0,90134$$

$$x_2=100 \text{ м: } q = \frac{4,50658}{5} = 0,90132$$

$$x_3=150 \text{ м: } q = \frac{4,50577}{5} = 0,90135$$

Для формальдегида (НСНО):

$$x_1=130,4 \text{ м: } q = \frac{0,04539}{0,05} = 0,90790$$

$$x_2=100 \text{ м: } q = \frac{0,04539}{0,05} = 0,90773$$

$$x_3=150 \text{ м: } q = \frac{0,04540}{0,05} = 0,90796$$

Для диметилтерефталата( $C_{10}H_{10}O_4$ ):

$$x_1=130,4 \text{ м: } q = \frac{0,04503}{0,05} = 0,90050$$

$$x_2=100 \text{ м: } q = \frac{0,04502}{0,05} = 0,90049$$

$$x_3=150 \text{ м: } q = \frac{0,04503}{0,05} = 0,90051$$

Для ацетальдегида ( $CH_3CHO$ ):

$$x_1=130,4 \text{ м: } q = \frac{0,0090088}{0,01} = 0,90088$$

$$x_2=100 \text{ м: } q = \frac{0,0090086}{0,01} = 0,90086$$

$$x_3=150 \text{ м: } q = \frac{0,0090089}{0,01} = 0,90089$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 40.

Таблица 40 – Значения приземных концентраций в долях ПДК

Расстояние	Загрязняющее вещество				
	( $C_2H_4O_2$ ) мг/м <sup>3</sup>	(CO) г/м <sup>3</sup>	( $CH_2O$ ) мг/м <sup>3</sup>	( $C_{10}H_{10}O_4$ ) мг/м <sup>3</sup>	( $CH_3CHO$ ) мг/м <sup>3</sup>
130,4	0,92939	0,90134	0,90790	0,90050	0,90088
100	0,92878	0,90132	0,90773	0,90049	0,90086
150	0,92961	0,90135	0,90796	0,90051	0,90089

Проведенные расчеты показывают, что концентрации загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух, не превышают ПДК на расчетном расстоянии их максимальных приземных концентраций (на расстоянии 130,4 м). Кроме того было установлено, что даже с учетом фоновых концентрации загрязняющих веществ, приземные концентрации тех самых веществ находятся в рамках предельно допустимых значений. Что наглядно показывает, сколь удачным с точки зрения экологии является предприятие по переработке ПЭТ тары во вторичные гранулы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из наиболее ощутимых результатов антропогенной деятельности является образование отходов, среди которых отходы пластмасс занимают особое место в силу целого комплекса своих уникальных механических свойств. В то же время, одним из этих ценных свойств является весьма низкая степень деградации в естественных условиях: срок естественного разложения изделий из пластмассы составляет много более нескольких сотен лет. Таким образом, большое количество отходов пластика создает серьезную экологическую угрозу. Именно поэтому утилизация отходов пластмасс приобрела важное экономическое и экологическое значение.

На сегодняшний день в промышленности существует несколько основных направлений утилизации пластиков, к которым относится их захоронение на специальных полигонах, уничтожение посредством сжигания с бытовым мусором, утилизация для получения газообразного или жидкого топлива, переработка во вторичное сырье с последующим применением для изготовления новой продукции.

Переработка отходов пластмасс для их дальнейшего использования – гораздо более грамотный и экологически эффективный подход к борьбе с отходами, чем обычная утилизация. Она позволяет превращать мусор в необходимые для производства продукты и с пользой использовать их в жизни общества.

Опираясь на различные источники информации, а также собственные теоретические поиски, был выбран и подробно разобран в данной работе способ переработки пластикового сырья, а именно ПЭТ-тары, методом грануляции. В процессе переработки пластиковых изделий производятся вторичные гранулы, которые используются в качестве промышленного сырья наряду с первичными полимерами.

Процесс переработки включает в себе следующие друг за другом этапы: сортировка – отходы разделяются по виду и цвету – этот этап, как правило,

выполняется вручную; дробление – измельчение отсортированных отходов в специальном дробильном оборудовании; очищение и промывка – полученное измельченное сырье промывается и очищают от примесей; сушка – полученная на предыдущих этапах смесь просушивается; нагревание – сухую массу нагревают до конкретной температуры, температура нагрева зависит от вида полимера; формирование – масса выдавливается через специальные нитевидные отверстия методом экструзии; охлаждение; формирование гранул – полученные после охлаждения нити нарезаются на гранулы. Получаемый материал – вторичная гранула – весьма востребованный на рынке сырья продукт, так как он гораздо дешевле, чем первичное сырье для изготовления пластиковых изделий, и притом процесс рециклинга – экологически безопасен.

После рассмотрения предложенной технологической цепочки по производству вторичных гранул, были выполнены расчеты рассеивания и образования загрязняющих веществ в атмосферу. В результате чего было установлено, что концентрации (с учетом фоновых) загрязняющих веществ, как углерода оксид, этановая кислота, формальдегид, диметилтерефталат, ацетатальдегид), поступающих в атмосферный воздух, не превышают ПДК на расчетном расстоянии их максимальных приземных концентраций (на расстоянии 130,4 м), а также на границе санитарно-защитной зоны и жилой застройки.

На основании выполненного расчета рассеивания загрязняющих веществ, предположив, что предприятие будет производить переработку пластмасс в зоне самых высоких фоновых концентраций указанных загрязнителей для города Красноярска, доказано, что подобные производства могут работать в центре крупных промышленных городов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ветошкин А.Г. Защита литосферы от отходов: учеб.пособие/ А.Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. университета, 2005. – 189 с.
2. Тростянская Е. Б. Пластические массы: Химическая энциклопедия: в 5 томах / Тростянская Е. Б., Бабаевский А. Г. – Москва: Т. 1, 1997. – 316 с.
3. Луканин А. В. Инженерная экология. Защита литосферы от твердых промышленных и бытовых отходов : учебное пособие/ Луканин А. В. – Москва : Инфра-М, 2018. - 555 с.
4. Коды переработки, маркировка [Электронный ресурс] : Производственная компания Гринтехкоми – 2019. – Режим доступа: <https://гринтехкоми.рф/services/zakupaem>.
5. Классификация отходов пластика [Электронный ресурс] : Заводы по покупке, переработке пластика и отходов пластмасс в России – 2019. – Режим доступа: <http://pererabotkatbo.ru/zavodplastik.pg1.html>.
6. Бледзки А. К. Вторичная переработка пластмасс/ .Бледзки А. К., Шпербер В. Е – С-Петербург: Профессия, 2006. – 400 с.
7. 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 с.
8. Nimchua, T. Comparison of the hydrolysis of polyethylene terephthalate fibers by a hydrolase from *Fusarium oxysporum*LCH I and *Fusarium solani* f. sp. pisi. / T. Nimchua, H. Punnapayak, W. Zimmermann // *Biotechnology Journal*. – 2007. – № 2. – P. 361–364.
9. Russel, J.R. Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi / J. R. Russel, J. Huang, P. Anand [et al.] // *Applied and environmental biotechnology*. – 2011. – Vol. 77, № 17. – P. 6076–6084.
10. Khan, S. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis* / S. Khan, S. Nadir, Z.U. Shah [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 225. – P. 469–480.

11. Yang, Y. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms / Y. Yang, J. Yang, W.-M. Wu [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 49, № 20. – P. 12087–12093.
12. Yosida, S. A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate) / S. Yosida, K. Hiraga, T. Takehala // *Science.* – 2016. – Vol. 351, № 6278. – P. 1196–1199.
13. Bombelli P. Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella* / Bombelli P., Howe C. J., Bertocchini F. // *Current Biology/* – 2017. – P. 31–32.
14. Керницкий, В. И. Краткие основы производства и переработки полиэтилентерефталата (ПЭТ) / монография / В. И. Керницкий, А. К. Микитаев – Тверь : Изд-во РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 208 с.
15. Katami T. Formation of PCDDs, PCDFs and Coplanar PCBs from Polyvinyl Chloride during Combustion in an Incinerator / Katami T., Yasuhara A., Shibamoto // *Environ. Sci. Technol.* 2012 – P. 1320–1324.
16. Беданокоев А. Ю. Полиэтилентерефталат: новые направления рециклинга / А. Ю. Беданокоев, Б. З. Бештоев, М. А. Микитаев, А. К. Микитаев, В. В. Сазонов // *Пластические массы.* – 2009. – № 6. – С. 18–21.
17. Симагина В. И. Вторичное использование полимерных материалов / В. И. Симагина, О. В. Комова // *Химия и рынок.* – 2002. – № 2–3. – С. 21–22.
18. Ла Мантия Ф. Вторичная переработка пластмасс/ пер. с англ.; Под ред. Г. Е. Заикова. – С-Петербург: Профессия, 2006. – 400 с.
19. Клинков А. С. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов : учебное пособие / А. С. Клинков, П. С. Беяев, В. Г. Однолько, М. В. Соколов, П. В. Макеев, И. В. Шашков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 188 с.
20. Удельные показатели образования вредных веществ, выделяющихся в атмосферу от основных видов технологического оборудования для предприятий радиоэлектронного комплекса: расчетная методика / – Санкт - Петербург, 2006. – 160 с.


21. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе / Взамен ОНД-86, утвержденной 04.08.1986; введ. 01.01.2018. – Москва : МПРИЭ РФ, 2004. – 119 с.
22. Каменев П.Н. Вентиляция: учебное пособие / П.Н.Каменев, Е.И. Тертичник - Изд. 2-е, исправл.и дополн. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 632с.
23. СП 4783-88 Санитарные правила для производств синтетических полимерных материалов и предприятий по их переработке. – Взамен СанПиН № 1950-78; введ. 12.12.88 – Москва: Главный государственный санитарный врач СССР, 1988. – 114 с.
24. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух [Электронный ресурс]: Онлайн справочник веществ – 2019. – Режим доступа: <https://voc.integral.ru>.
25. СП 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. – Введ 29.04.2003. – Москва: Главный государственный санитарный врач РФ, 2003. – 101 с.



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
«Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
Т. А. Кулагина

Подпись

« 17 » июля 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность»

«Разработка схемы получения готового изделия из пластиковых отходов»

Руководитель

09.07.19  
подпись, дата

канд. техн. наук

И.В. Андруняк

Выпускник

  
подпись, дата

Д.И. Гелемеева

Нормоконтролер

  
09.07.2019  
подпись, дата

Е.Н. Зайцева

Красноярск 2019