

На правах рукописи

МАКЕЕВ Павел Владимирович

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ

Специальности: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(химическая промышленность)

05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2012

Работа выполнена на кафедре «Переработка полимеров и упаковочное производство» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

Научные руководители:

кандидат технических наук, профессор
Клишков Алексей Степанович

доктор технических наук, профессор
Беляев Павел Серафимович

Официальные оппоненты:

Скуратов Владимир Кириллович,
доктор технических наук, профессор,
Московский государственный
университет инженерной экологии

Баронин Геннадий Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
Тамбовский государственный
технический университет
кафедра «Теория машин,
механизмов и детали машин»

Ведущая организация

ОАО «Тамбовмаш», г. Тамбов

Защита состоится «29» мая 2012 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Автореферат разослан «26» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Нечаев Василий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема утилизации отходов в полимерной промышленности остается актуальной, несмотря на постоянное совершенствование технологий по их вторичной переработке. Существующие технологии по утилизации отходов: сжигание или размещение на специально отведенных для этих целей участках – полигонах или свалках, приводят к сокращению земельных угодий, загрязнению окружающей среды и уничтожению дорогостоящего сырья. Наиболее перспективным методом «борьбы» с отходами является их вторичная переработка.

Существующие технологии переработки отходов термопластов включают в себя измельчение, мойку, сушку, переработку в червячных и червячно-дисковых экструдерах, что требует значительных энергетических и трудовых затрат, увеличения производственных площадей, существенных капитальных вложений, что приводит к увеличению себестоимости продукции.

В России вопрос о повторной переработке полимеров актуален, поскольку в стране традиционно существует дефицит дешевого полимерного сырья. Этот дефицит компенсируется за счет импортных поставок. Так, по итогам 2009 г. доля импорта на российском рынке полиэтилена составила 24%, а полипропилена – 38%.

В связи с этим актуальное научное и практическое значение имеют проведенные в настоящей работе исследования процесса переработки широкого класса отходов термопластов на разработанном валково-шнековом агрегате во вторичный гранулят заданного качества.

Работа выполнена в рамках ФЦП № 14.740.11.0141 по теме «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области многофункционального приборостроения для промышленных систем управления», а также поддержана фондом содействия развитию малых форм предприятия в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К. по теме «Разработка технологии и оборудования для переработки отходов полимерных материалов» ГК № 13081 от 25.07.2010. Работа выполнялась в рамках государственного задания министерства образования и науки РФ высшим учебным заведением на 2012 г.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена разработке принципов конструирования машин, реализующих технологию совмещенного процесса валково-шнековой переработки отходов полимерных материалов во вторичный гранулят заданного качества.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ современного состояния в области утилизации и вторичной переработки отходов полимерной тары и упаковки;
- рассмотреть существующие технологии и применяемое оборудование для вторичной переработки отходов различных термопластичных полимерных материалов;
- разработать новое оборудование – агрегат на основе вальцов с бесконечной фрикцией за счет одного неподвижно закрепленного вала и шнека, расположенного во внутренней его полости с индивидуальным приводом, и формирующей головки для утилизации отходов термопластов;
- создать лабораторный стенд валково-шнекового агрегата по изучению процесса переработки отходов термопластов с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров;

- изучить влияние конструктивных и технологических параметров оборудования и процесса валково-шнековой утилизации на качественные показатели получаемого вторичного термопластичного материала (предел прочности при разрыве, предел текучести и относительное удлинение при разрыве), а также показать взаимосвязь суммарной величины сдвига и качественных показателей вторичного материала;

- разработать методику расчета и программное обеспечение для определения суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных технологических и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого вторичного материала;

- определить оптимальные значения величины суммарного сдвига в рабочих органах разрабатываемого агрегата для различных отходов термопластичных материалов;

- предложить методику инженерного расчета конструктивных и технологических параметров предлагаемых агрегатов различной производительности с учетом заданного качества получаемого гранулята;

- внедрить разработанную технологию утилизации отходов полимерной тары и упаковки на разработанном агрегате, позволяющую снизить энерго- и трудовые затраты, уменьшить себестоимость получаемых вторичных термопластичных материалов и повысить их качество.

Научная новизна работы. Разработано новое оборудование для утилизации отходов термопластов: агрегат на основе валцов с бесконечной фрикцией за счет одного неподвижно закрепленного вала и шнека, расположенного во внутренней его полости с индивидуальным приводом, и формирующей головки (Пат. РФ 2417881 RU C2 B29B 7/64).

Теоретически обоснована и экспериментально доказана однозначная связь суммарной величины сдвига в рабочих органах разработанного агрегата на прочностные показатели получаемого гранулята.

Предложено математическое описание процесса переработки термопластичных полимерных отходов на разработанном агрегате, позволяющее прогнозировать качественные показатели получаемого материала.

Практическая ценность. Создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать влияние технологических параметров процесса (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров оборудования на прочностные показатели получаемого гранулята (предел прочности и относительное удлинение при растяжении) и определять оптимальные значения суммарной величины сдвига в рабочих органах разработанного агрегата для различных отходов термопластов.

Определены оптимальные значения суммарной величины сдвига для переработки отходов термопластичных полимерных материалов, позволяющие получать вторичный гранулят заданного качества: вторичный полиэтилен низкого (ВПНД) и высокого давления (ВПВД), вторичный полипропилен (ВПП) и вторичный полистирол (ВПС).

Предложена методика инженерного расчета конструктивных и технологических параметров агрегатов для переработки отходов термопластов во вторичный

гранулят заданного качества, разработано необходимое математическое и программное обеспечение расчета на ЭВМ.

Разработанное оборудование позволяет получать из отходов термопластов композиты с добавками технического углерода с улучшенными на 10...15% основными физико-механическими показателями.

Разработанные методика инженерного расчета и программное обеспечение внедрены на ОАО «НИИРТМаш» (Тамбов), что позволило сократить затраты времени на проектирование валково-шнекового агрегата с расчетным экономическим эффектом 196 тыс. р.

Полученный на разработанной установке гранулят из ВПВД, ВПНД, ВПП используется на НПП ООО «Эласт» в производстве полимерных труб методом экструзии, а ВПС используется для получения декоративной плитки методом прессования с расчетным экономическим эффектом 210 тыс. р.

Разработанные программы для ЭВМ по расчету основных параметров процесса переработки отходов термопластов используются при проведении лабораторного практикума в подготовке инженеров по специальности 261201 по дисциплинам «Оборудование для производства тары и упаковки», «Утилизация упаковки» и магистров по программе 150400.26 по дисциплине «Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов».

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов» (Белгород, 2009 г.); 1-й и 2-й всероссийских научно-молодежных конференциях (с международным участием) «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, 2009–2010); 1 Международной научно-практической конференции «Аспекты ноосферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека» (Тамбов, 2010); 7 Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы экологии» (Тула, 2011).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 работы.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 98 наименований и 4 приложений. Содержит 103 страницы основного текста, 33 рисунка, 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано краткое содержание работы, обоснованы ее актуальность, научная новизна и практическая значимость.

В **главе 1** проведен литературный обзор современного состояния в области утилизации и вторичной переработки отходов термопластичных полимерных материалов в России. Исследован рынок полимерных отходов.

Проведен подробный анализ работ по методам вторичной переработки отходов термопластов и применяемого оборудования, рассмотрены способы модификации вторичных полимеров с целью улучшения их качества, даны направления использования вторичных полимеров.

Первая глава завершается постановкой задач исследования.

Глава 2 посвящена рассмотрению технологического процесса переработки отходов термопластов, разработке конструкции валково-шнекового агрегата (в данном случае экспериментальной установки), а также методики расчета геометрических параметров шнекового устройства с учетом заданной производительности.

Разработанный технологический процесс (рис. 1) вторичной переработки отходов термопластов по непрерывной технологии осуществляется следующим образом: отходы с содержанием посторонних примесей не более 5% поступают на участок сортировки отходов 1, в процессе которой из них удаляют случайные инородные включения и выбраковывают сильно загрязненные куски. Отходы полимеров непрерывно загружаются через загрузочный бункер с левой стороны валцов на рабочие поверхности валково-шнекового агрегата 2, на котором происходит плавление отходов, удаление летучих компонентов, пластикация, транспортировка материала вдоль оси валков по направлению к загрузочному отверстию, где за счет максимального давления в зоне деформации валцов расплав продавливается в загрузочное отверстие и захватываясь витками шнека транспортируется в сторону формирующей головки, на выходе из которой получают прутки (стренги) заданного сечения. Полученные стренги сохраняют свой размер за счет установки тянущего устройства 3, далее они режутся ножом 4, после чего полученные гранулы собираются в емкости 5. По данной технологии могут перерабатываться не только пленочные отходы термопластов производственного и общественного потребления, но и различные технологические отходы термопластов.

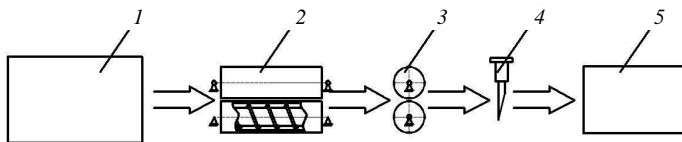


Рис. 1. Схема технологического процесса вторичной переработки отходов термопластов:

1 – участок сортировки отходов; 2 – валково-шнековый агрегат;
3 – тянущее устройство; 4 – нож; 5 – емкость для гранул

Для осуществления разработанного технологического процесса вторичной переработки отходов полимерных материалов была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (ЭУ).

Экспериментальная установка (рис. 2) выполнена на базе лабораторных валцов СМ 200 80/80 и представляет собой горизонтально расположенные полые валки 1, 2 диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм. Передний валок 1 является подвижным (число оборотов валка: от 0 до 30 об/мин). Привод валка осуществляется от электродвигателя постоянного тока АО52/2. Использование данного типа двигателя позволяет плавно регулировать частоту вращения валка, задний валок 2 является неподвижным, в нем имеется загрузочное отверстие 5, расположенное в зоне максимального давления под углом, равным углу подъема винтовой нарезки шнека.

Внутри неподвижного валка установлен шнек 3, привод которого осуществляется от электродвигателя 8. Шнек 3 осуществляет захват материала, транспортировку и создание давления перед формирующей головкой.

Механизм регулировки зазора 9 позволяет перемещать передний валок по направляющим станины и фиксировать его в заданном положении.

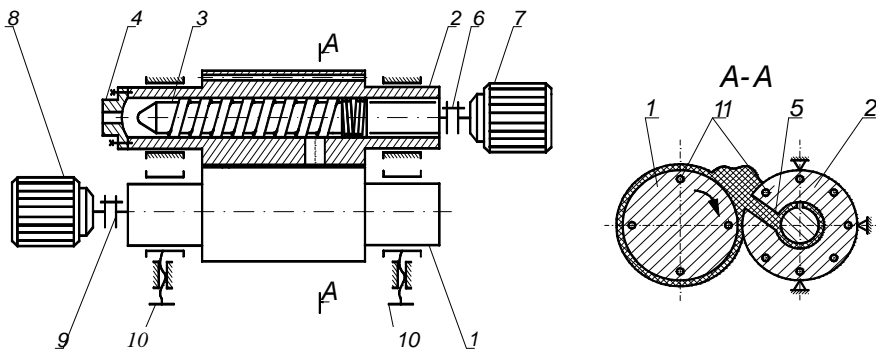


Рис. 2. Схема экспериментальной валково-шнековой установки:

Пат. РФ 2417881 RU C2 B29B 7/64

1 – передний валок; 2 – задний валок; 3 – шнек; 4 – формующая головка;
5 – загрузочное окно; 6, 9 – муфта; 7, 8 – мотор-редуктора;
10 – регулирующее устройство; 11 – электронагреватели

Описана методика расчета конструктивных параметров шнекового устройства, обеспечивающих заданную производительность процесса; изложены требования, предъявляемые к перерабатываемым отходам термопластов.

В главе 3 предложено математическое описание расчета суммарной величины сдвига, характеризующей качественные показатели гранулята.

В работе поставлена и решена задача по определению таких параметров переработки отходов термопластов, которые характеризуют качественные показатели вторичного материала и величина которых может быть положена в основу при расчете конструктивных и технологических параметров валково-шнековых агрегатов.

Величина суммарного сдвига для валково-шнекового процесса утилизации отходов термопластов может быть представлена как алгебраическая сумма величин сдвига для непрерывного процесса вальцевания с одним неподвижным валком, продавливания вторичного материала через загрузочное отверстие, расположенное в неподвижном валке, деформирования полимера в винтовых каналах экструдера и суммарной величины сдвига, возникающей в профилирующих каналах формующей головки.

$$\gamma_{\text{сум}} = \gamma_{\text{в}} + \gamma_{\text{зо}} + \gamma_{\text{ш}} + \gamma_{\text{фк}}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{в}}$, $\gamma_{\text{зо}}$, $\gamma_{\text{ш}}$, $\gamma_{\text{фк}}$ – суммарная величина сдвига для непрерывного процесса вальцевания, в загрузочном отверстии, в каналах шнека, в формующих каналах соответственно.

Суммарная величина сдвига, возникающая в межвалковом зазоре при переработке отходов термопластов на вальцах, у которых один валок является неподвижным (рис. 3), определяется по уравнению

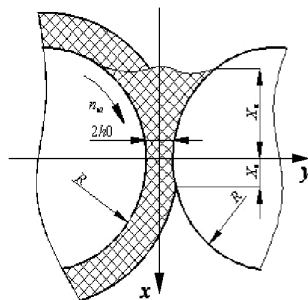


Рис. 3. Схема процесса вальцевания с одним неподвижным валком

$$\gamma_B = \frac{1}{l_B} \int_0^{l_B} \gamma_n dl, \quad (2)$$

где $\gamma_n = \bar{\gamma}i(t)$ – суммарная величина сдвига при периодическом режиме вальцевания на валково-шнековом агрегате, $i(t) = \frac{U_0 t (1 + X_K^2)}{(X_K - X_H) \sqrt{2Rh_0}}$ – число проходов; t –

время вальцевания, с; U_0 – средняя величина окружной скорости; $U_0 = U_2$, так как при переработке отходов термопластов на валково-шнековом агрегате передний валок является неподвижным, следовательно $U_1 = 0$; $\bar{\gamma}$ – средняя удельная деформация сдвига.

Средняя удельная деформация сдвига, которой подвергается материал в процессе переработки на валково-шнековом агрегате, определяется выражением

$$\bar{\gamma} = \left\{ \frac{3}{4} \left[1 - (X_K^2)(\arctg X_K - \arctg X_H) + \frac{(1 + X_K^2)X_H}{1 + X_H^2} - X_K^2 \right] \frac{0,5}{1 - 0,25(1 + X_K^2)} + \frac{0,5}{4(1 + X_K^2)} \left(\frac{X_K}{1 + X_K^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \arctg X_K - \arctg X_H \right) \right\} \left[\frac{1}{2\sqrt{2h_0^2(1 + X_K^2)(X_K - X_H)}} \right]. \quad (3)$$

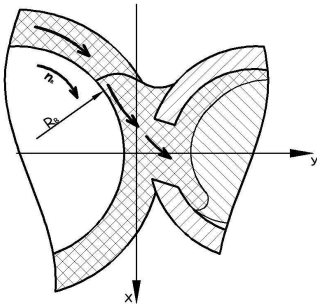


Рис. 4. Схема движения материала с поверхности вала в загрузочное отверстие винтового канала шнека

В процессе переработки материал с поверхности валков направляется в загрузочное отверстие (рис. 4), расположенное в зоне максимального давления.

Величина сдвига в загрузочном отверстии определится следующим выражением:

$$\gamma = \dot{\gamma}\tau, \quad (4)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} ; τ – время пребывания материала в загрузочном отверстии, с

$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi d^3}, \quad (5)$$

где Q – объемная производительность машины, m^3/c ; d – диаметр загрузочного отверстия, м;

$$\tau = \frac{FL}{Q}, \quad (6)$$

где F – площадь поперечного сечения загрузочного отверстия, m^2 .

Далее материал с поверхности валков валцов через загрузочное отверстие направляется в винтовой канал шнека, расположенный в неподвижном валке. Таким образом, дальнейшая переработка представляет собой процесс экструзии, о качестве которого можно судить также по суммарной величине сдвига в винтовых каналах шнека $\gamma_{ш}$ и формирующей головке $\gamma_{фк}$, которая представляет собой функ-

цию различных конструктивных параметров шнека, профилирующих каналов формирующей головки и технологических параметров процесса экструзии.

Суммарная величина сдвига в каналах шнека определяется следующим образом:

$$\gamma_{\text{ш}} = \dot{\gamma}_{\text{р}} \tau_{\text{ш}}, \quad (7)$$

где $\dot{\gamma}_{\text{р}}$ – расчетная скорость сдвига в каналах шнека, с^{-1}

$$\dot{\gamma}_{\text{р}} = \frac{0,5D\omega \left(\frac{1}{n} + 1 \right)}{h}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{ш}}$ – время пребывания перерабатываемого материала в материальном цилиндре, с

$$\tau_{\text{ш}} = \frac{WhL}{Q \sin \varphi}, \quad (9)$$

где $W = (t - e) \cos \varphi$ – ширина винтового канала шнека, м; Q – производительность шнековой машины, $\text{м}^3/\text{с}$; n – индекс течения; ω – угловая скорость шнека, с^{-1} ; φ – угол наклона винтовой нарезки шнека, м; L – длина нарезной части шнека, м; h – глубина винтового канала шнека, м.

Величина суммарного сдвига в формирующих каналах трубной головки определяется следующим образом:

$$\gamma_{\text{фк}} = \sum_{i=1}^n \gamma_{\text{фи}}, \quad (10)$$

где $\gamma_{\text{фи}} = \dot{\gamma}_i \tau_{\text{фи}}$; $\tau_{\text{фи}} = \frac{F_i l_i}{Q_i}$; $\gamma_{\text{фи}}$, $\dot{\gamma}_i$, $\tau_{\text{фи}}$ – сдвиг, скорость сдвига, время пребывания

перерабатываемого материала в i -м канале соответственно; F_i , l_i , Q_i – площадь поперечного сечения, длина и производительность i -го канала соответственно.

Таким образом, решение уравнения (1) совместно с (2, 4, 7, 10) позволяет определить величину суммарного сдвига для процесса валково-шнековой утилизации термопластичных полимерных материалов с получением профильного изделия.

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям процесса переработки термопластов на валково-шнековом агрегате.

Дана методика определения безразмерных координат сечения входа $X_{\text{н}}$ и выхода $X_{\text{к}}$, методики проведения экспериментов, определения физико-механических характеристик гель-фракции получаемого вторичного термопластичного материала, представлен анализ и результаты экспериментов, отраженные в графических зависимостях, дана сравнительная характеристика свойств вторичного термопласта, полученных по различным технологиям.

Цель экспериментов заключалась в определении технологических параметров процесса (частоты вращения вала, частоты вращения шнека), при которых достигаются максимальные прочностные показатели получаемого гранулята (предел прочности и относительное удлинение при растяжении).

В процессе переработки на лабораторном валково-шнековом агрегате проводились следующие измерения:

1. Определяли производительность установки при заданных значениях минимального зазора h_0 , между валками, частоты вращения заднего валка и шнека путем взвешивания полученных гранул за определенный промежуток времени.

2. Регистрировали значения тока и напряжения на тиристорном (для валкового пластикатора) и частотном (для шнекового отборочного устройства) преобразователях с целью оценки мощности, затрачиваемой на процесс утилизации.

Полученные гранулы в процессе переработки собирались в емкости для последующего проведения экспериментов по определению физико-механических показателей (предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве, а также определения золь-гель фракции).

Процесс переработки отходов термопластичных полимерных материалов на валково-шнековом агрегате можно разделить на две стадии.

- 1) переработка на валковом оборудовании с одним неподвижным валком;
- 2) переработка экструзией.

Проведенные экспериментальные исследования (рис. 5) позволили сделать следующие выводы: изменение частоты вращения шнека $n_{ш}$ при постоянной частоте вращения валка вальцов n_v не вносит существенного влияния на величину показателя прочности при разрыве σ_p получаемого вторичного термопластичного материала, что является следствием недостаточной величины сдвиговой деформации, возникающей в межвитковом пространстве шнека. Однако наблюдаются изменения прочностных свойств вторичного материала при различной частоте вращения валка вальцов n_v . Это вызвано тем, что основное сдвиговое воздействие на материал со стороны рабочих органов технологического оборудования в процессе вторичной переработки осуществляется со стороны валковых рабочих органов. В связи с этими заключениями, дальнейшие эксперименты проводили при одной постоянной частоте вращения шнека.

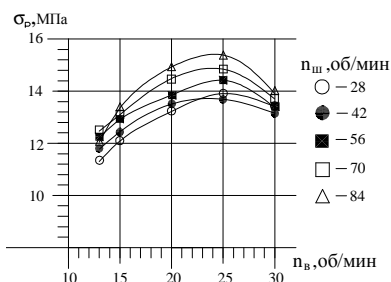


Рис. 5. Зависимость прочности при разрыве σ_p от частоты вращения валка вальцов n_v при различной частоте вращения шнека $n_{ш}$

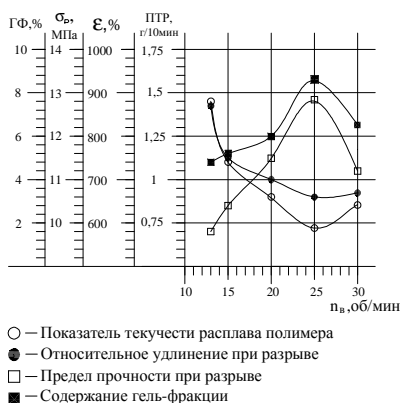
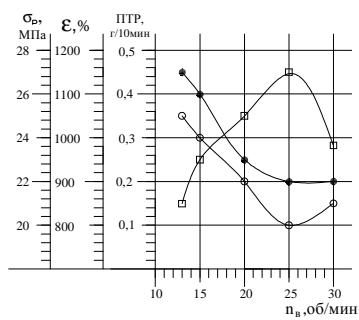


Рис. 6. График зависимости ПТР, относительного удлинения при разрыве, предела прочности при разрыве, содержания гель-фракции от частоты вращения валка (ВПВД)

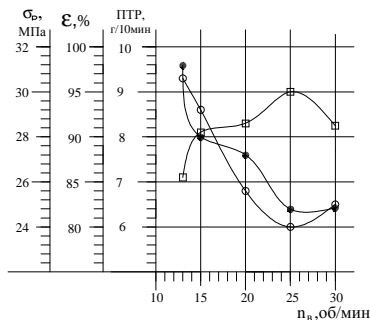
На рисунке 6 представлена графическая зависимость показателя текучести расплава полимера, относительного удлинения при разрыве, предела прочности при разрыве, содержания гель-фракции от частоты вращения вала (ВПВД). Анализируя данную зависимость, можно сделать следующие выводы: с увеличением числа оборотов вала прочностные характеристики материала увеличиваются за счет структурирования материала, максимальное упрочнение материала наблюдается при 25 оборотах вала, при дальнейшем увеличении частоты вращения вала происходит падение прочностных характеристик вследствие возрастания сдвиговых деформаций в межвалковом зазоре, что приводит к разрыву межмолекулярных связей в нем. Одной из важнейших характеристик вторичного полимерного материала, характеризующих его дальнейшее использование, является относительное удлинение при разрыве. Из графической зависимости (рис. 6) видно, что с увеличением частоты вращения вала происходит снижение относительного удлинения, это можно объяснить происходящей реакцией структурирования материала в межвалковом пространстве за счет увеличения сдвиговой деформации. При этом в нем образуется нерастворимая гель-фракция, которая выполняет в данном случае функцию активного наполнителя полимерной матрицы, что, с одной стороны, приводит к увеличению прочности, но в то же время является причиной появления значительных внутренних напряжений, следствием чего является повышение хрупкости материала и снижение относительного удлинения. Минимальное значение относительного удлинения наблюдается при 25 оборотах вала, дальнейшее увеличение частоты вращения вала ведет к росту относительного удлинения, что говорит о снижении в материале нерастворимой гель-фракции.

В работе были проведены также экспериментальные исследования с другими отходами термопластичных полимерных материалов (ВПНД, ВПП, ВПС), которые широко используются в производстве упаковки, результаты экспериментов приведены на рис. 7, 8 соответственно.



- — Показатель текучести расплава полимера
 ● — Относительное удлинение при разрыве
 □ — Предел прочности при разрыве

а)



- — Показатель текучести расплава полимера
 ● — Относительное удлинение при разрыве
 □ — Предел прочности при разрыве

б)

Рис. 7. Графики зависимости показателя текучести расплава полимера, относительного удлинения при разрыве, предела прочности при разрыве от частоты вращения вала:

а — ВПНД; б — ВПП

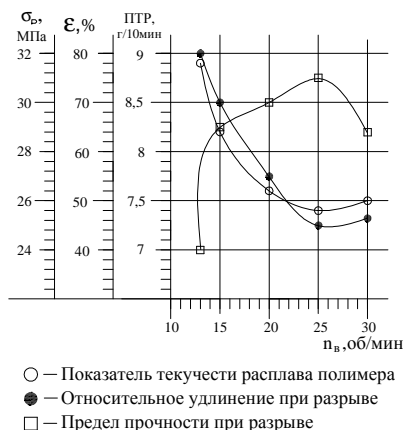


Рис. 8. График зависимости показателя текучести расплава полимера, относительного удлинения при разрыве, предела прочности при разрыве от частоты вращения вала (ВПС)

В таблице 1 приведены характеристики материалов после переработки их на валково-шнековом агрегате, а также после их модификации.

Таблица 1

Характеристики	ВПВД		ВПНД		ВПС		ВПП	
	Отходы	Отходы +0,5% сажи	Отходы	Отходы +0,5% сажи	Отходы	Отходы +0,5% сажи	Отходы	Отходы +0,5% сажи
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	13,8	15,3	25	27,5	31	32,7	30	32
Относительное удлинение при разрыве, %	590	650	900	950	45	49	82	90
Показатель текучести расплава, г/10 мин	1,18	1	0,1	0,9	7,4	7,1	6	5,3

После расчета величины суммарной деформации сдвига для процесса переработки отходов термопластов на валково-шнековом агрегате в зависимости от технологических и конструктивных параметров процесса и оборудования, а также на основании проведенных экспериментальных исследований, были получены зависимости физико-механических свойств $\sigma_{\text{р}}$ вторичных термопластичных материалов от суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$. На рисунке 9 в качестве примера представлена такая зависимость для полиэтилена высокого давления.

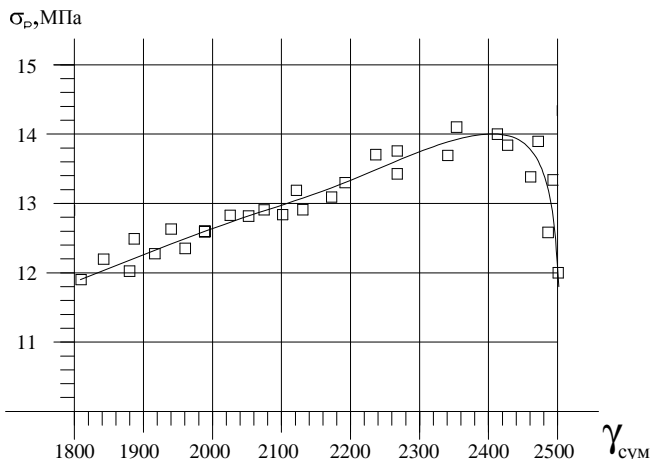


Рис. 9. График зависимости предела прочности при разрыве от суммарной величины сдвига (ВППД)

Анализ графика (рис. 9) позволяет сделать вывод, что наилучшие показатели по прочности данного вторичного полиэтилена высокого давления наблюдаются при суммарной величине сдвига, равной $\gamma_{\text{сум}} = 2450$.

В **главе 5** предложена методика инженерного расчета основных конструктивных и технологических параметров валково-шнековых агрегатов.

При расчете основных параметров процесса переработки отходов термопластичных полимерных материалов на валково-шнековом агрегате решаются два типа задач:

Вариант 1: проектирование нового оборудования. При заданной производительности процесса Q необходимо определить основные геометрические размеры валково-шнекового агрегата (диаметр и длину валков вальцов; диаметр и длину шнека, шаг, глубину винтовой нарезки и ширину гребня шнека). Решение сводится к определению основных геометрических размеров валков (диаметр и длина) и выбору валкового оборудования в соответствии с ГОСТ 14333–73; определению оптимальной высоты «запаса» материала на валках, оптимальной величины минимального зазора между валками; основных размеров шнека (диаметра, длины, шага, глубины винтовой нарезки и ширины гребня шнека); суммарной величины сдвига процесса переработки отходов термопластов, силовых и энергетических параметров процессов вальцевания и экструзии; проводится прочностной расчет основных деталей и узлов валково-шнекового агрегата и тепловой расчет процесса утилизации. Составляется техническая характеристика спроектированного валково-шнекового оборудования.

Вариант 2: при заданных геометрических размерах валков вальцов необходимо определить производительность процесса Q и основные геометрические размеры шнека, установленного в неподвижный валок (диаметр и длину шнека), а также габариты формующей головки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выполнен литературный обзор и анализ состояния вторичной переработки полимерных материалов в РФ и за рубежом. Рассмотрены существующие технологии и применяемое оборудование для вторичной переработки отходов различных термопластичных полимерных материалов, и показаны их достоинства и недостатки.

2. Разработано новое оборудование для утилизации отходов термопластов: агрегат на основе валцов с бесконечной фрикцией за счет одного неподвижно закрепленного валка и шнека, расположенного во внутренней его полости с индивидуальным приводом, и формирующей головки (Пат. РФ 2417881 RU C2 B29B 7/64).

3. Создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать влияние технологических параметров процесса (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров оборудования на прочностные показатели получаемого гранулята (предел прочности и относительное удлинение при растяжении).

4. Показана взаимосвязь величины суммарного сдвига в рабочих органах разработанного агрегата и качественных показателей получаемого вторичного гранулята.

5. Определены оптимальные значения величины суммарного сдвига для различных отходов термопластичных материалов: 2450 – для полиэтилена высокого и низкого давления, 2390 – для вторичного полипропилена, 2540 – для вторичного полистирола.

6. Разработано математическое и программное обеспечение расчета суммарной величины сдвига в рабочих органах разработанного агрегата, на которое получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

7. Создана методика инженерного расчета конструктивных и технологических параметров предлагаемых к использованию агрегатов различной производительности с учетом заданного качества получаемого гранулята.

8. Разработанное оборудование позволяет получать из отходов термопластов композиты с добавками технического углерода с улучшенными на 10...15% основными физико-механическими показателями.

9. Разработанные методика инженерного расчета и программное обеспечение внедрены на ОАО «НИИРТМаш» к использованию при проектировании промышленного валково-шнекового агрегата по переработке отходов термопластов с расчетным экономическим эффектом 196 тыс. р. в год.

10. Полученный на экспериментальной установке гранулят из отходов термопластов используется на НПП ООО «Эласт» для производства электроизоляционных полимерных труб, применяемых в железобетонных строительных плитах методом экструзии, для производства декоративной плитки методом прессования с расчетным экономическим эффектом 210 тыс. р.

11. Разработанные программы для ЭВМ по расчету основных параметров процесса переработки отходов термопластов используются при проведении лабораторного практикума в подготовке инженеров по специальности 261201 по дисциплинам «Оборудование для производства тары и упаковки», «Утилизация упаковки» и магистров по программе 150400.26 по дисциплине «Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов».

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q – производительность, кг/ч; n , K и m – реологические константы; μ – вязкость, Па·с; n – частота вращения, об/мин; ρ – плотность смеси, кг/м³; R – радиус, м; l_v – длина рабочей части валка, м; L – длина нарезной части шнека, м; X_n , X_k – безразмерные координаты сечений входа и выхода; x_n , x_k – координаты сечения входа и выхода, м; D – диаметр, м; σ_t – предел текучести при растяжении, МПа; σ_p – прочность при разрыве, МПа; ε – относительное удлинение при разрыве, %; h_0 – величина минимального зазора между валками, м; q_N – удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции кВт/кг; t – время (продолжительность) вальцевания, мин; γ – величина суммарной деформации сдвига.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Разработка конструкции валково-шнекового агрегата и совмещенного технологического процесса утилизации полимерной тары и упаковки / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, П.В. Макеев, С.С. Гуреев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 578 – 587.
2. Анализ эффективности разработанных технологий утилизации отходов термопластов / П.В. Макеев, А.С. Клинков, И.В. Шашков, В.Г. Однолько // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 1002 – 1006.
3. Методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества / П.В. Макеев, А.С. Клинков, Д.Л. Полушкин, П.С. Беляев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 1.

Публикации в других изданиях:

1. Гуреев, С.С. Разработка полимерных композиционных материалов на основе вторичного сырья и технического углерода / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, И.В. Шашков // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы Всерос. науч.-инновац. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 27 – 29 октября 2009 г. – Тамбов, 2009. – С. 248 – 250.
2. Макеев, П.В. Разработка технологии и оборудования для переработки отходов полимерной тары и упаковки / П.В. Макеев, С.С. Гуреев // Материалы XIV Междунар. экологической студенческой конф. «Экология России и сопредельных территорий». – Новосибирск, 2009. – С. 155–156.
3. Исследование процесса получения композитов на основе вторичного полимерного сырья и технического углерода / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, А.С. Клинков, С.П. Хрущев // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – Вып. 23. – С. 160 – 163.

4. Влияние параметров процесса вторичной переработки отходов полимерной тары и упаковки на качественные показатели получаемого вторматериала / П.В. Макеев, С.С. Гуреев, А.С. Клинков, Д.Л. Полушкин // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – Вып. 23. – С. 163 – 166.

5. Гуреев, С.С. Получение композиционных полимерных материалов заданного качества / С.С. Гуреев, А.С. Клинков, П.В. Макеев // Молодой ученый. – Чита, 2011. – № 1(24) – С. 22 – 24.

6. Макеев, П.В. Инновационная технология рециклинга отходов термопластов / П.В. Макеев, С.С. Гуреев, И.В. Шашков // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2011. – Вып. II. – С. 158 – 161.

7. Гуреев, С.С. Сравнительный анализ двух методов определения суммарной деформации сдвига в рабочих пространствах двухроторных смесителей с овальными рабочими органами / С.С. Гуреев, А.С. Клинков, П.В. Макеев // Молодой ученый. – Чита, 2011. – № 6(29). – С. 32 – 37.

8. Гуреев, С.С. Технологический процесс получения композита на основе ВПВД и активированного технического углерода / С.С. Гуреев, А.С. Клинков, П.В. Макеев // Молодой ученый. – Чита, 2011. – № 6(29). – С. 37 – 41.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – № 2010617845. Расчет интегрального критерия качества в зонах деформации смесительных устройств / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2010616018 ; заявл. 01.10.2010 ; зарег. 26.11.2010.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – № 2011612497. Расчет интегрального критерия качества в зонах деформации двухроторных смесителей / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2011610879 ; заявл. 14.02.2011 ; зарег. 25.03.2011.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. – № 2008612658. Расчет на прочность и жесткость валков вальцов / П.В. Макеев, Д.Л. Полушкин, М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2008611473 ; заявл. 07.04.2008 ; зарег. 28.05.2008.

12. Пат. РФ 2417881 RU C2 B29B 7/64. Валково-шнековый агрегат / А.С. Клинков, П.В. Макеев, М.В. Соколов, Д.Л. Полушкин, В.Г. Однолько ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2009100295/05 ; заявл. 11.01.2009 ; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.

Подписано в печать 20.04.2012.
Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 199

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14