

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

**И.В. ШАШКОВ, А.С. КЛИНКОВ,  
П.С. БЕЛЯЕВ, М.В. СОКОЛОВ**

# **ВАЛКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ**

*Рекомендовано Научно-техническим советом университета  
в качестве монографии*



---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
2012

УДК 621.929.3  
ББК Л71  
В156

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Природопользование и  
защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*Н.С. Попов*

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
главный инженер ОАО «НИИРТМаш»  
*В.В. Бастрыгин*

**В156** Валковое оборудование и технология непрерывной переработки отходов пленочных термопластов : монография / И.В. Шашков, А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 136 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1091-9.

Рассмотрены основные технологические и конструктивные аспекты проектирования валкового оборудования для непрерывной переработки пленочных отходов термопластов. Особое внимание уделено вопросам исследования влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели получаемого гранулята. Приведена методика инженерного расчета основных параметров непрерывного процесса вальцевания и конструкции валкового оборудования непрерывного действия с заданным качеством получаемого гранулята.

Монография полезна для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией валкового оборудования по переработке полимерных материалов, а также аспирантам, магистрантам и студентам старших курсов, специализирующимся в области переработки пластмасс и эластомеров.

УДК 621.929.3  
ББК Л71

**ISBN 978-5-8265-1091-9**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

## ВВЕДЕНИЕ

---

В настоящее время проблема переработки отходов полимерных материалов актуальна, в первую очередь, с позиций охраны окружающей среды, но также и с тем, что в условиях дефицита полимерного сырья, пластмассовые отходы становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом.

Проблем, связанных с утилизацией полимерных отходов, достаточно много. Они имеют свою специфику, но их нельзя считать неразрешимыми. Однако решение невозможно без организации сбора, сортировки и первичной обработки амортизованных материалов и изделий; без разработки системы цен на вторичное сырье, стимулирующих предприятия к их переработке; без создания эффективных способов переработки вторичного полимерного сырья, а также методов его модификации с целью повышения качества; без создания специального оборудования для его переработки; без разработки номенклатуры изделий, выпускаемых из вторичного полимерного сырья.

Отходы пластических масс делятся на: технологические отходы производства, которые возникают при синтезе и переработке термопластов; отходы производственного потребления – накапливаются в результате выхода из строя изделий из полимерных материалов, используемых в различных отраслях народного хозяйства; отходы общественного потребления, которые накапливаются у нас дома, на предприятиях общественного питания и т.д., а затем попадают на городские свалки; в конечном итоге они переходят в новую категорию отходов – смешанные отходы.

Наибольшие трудности связаны с переработкой и использованием смешанных отходов.

Основное количество отходов уничтожают захоронением в почву или сжиганием. Однако уничтожение отходов экономически невыгодно и технически сложно. Кроме того, захоронение, затопление и сжигание полимерных отходов ведет к загрязнению окружающей среды, к сокращению земельных угодий (организация свалок) и т.д.

Термические методы, применяемые для разложения отходов пластмасс, и создание биоразрушающихся полимеров требуют значительных финансовых затрат, сложны технологически. Поэтому наиболее приемлемым с точки зрения охраны окружающей среды и финансовых затрат является переработка отходов полимерных материалов механическим рециклингом.

Однако имеющаяся технология переработки отходов полимерных материалов, включающая в себя измельчение, мойку, сушку, переработку в червячно-дисковых экструдерах, требует значительных затрат электроэнергии, трудовых затрат, увеличение производственных площадей, что приводит к увеличению себестоимости продукции. В связи с этим предлагается непрерывная технология переработки отходов пленочных полимерных материалов на вальцах. Применение данной технологии предполагает снижение энергозатрат, трудовых затрат, сокращение производственных площадей, что приведет к уменьшению себестоимости продукции.

Также до настоящего времени отсутствует математическая модель процесса переработки полимерного материала в межвалковом зазоре валкового оборудования непрерывного действия и методика инженерного расчета основных технологических параметров непрерывного процесса вальцевания и конструктивных параметров валковых пластикаторов-грануляторов непрерывного действия с учетом заданного качества получаемого гранулята. Поэтому поставленная в настоящей работе задача изучения непрерывного процесса переработки отходов термопластичных пленочных полимерных материалов на валковом оборудовании является весьма актуальной как в научном, так и в практическом плане.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процесса вторичной переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов по непрерывной технологии на валковом оборудовании.

Цель работы – разработка валкового оборудования и технологии процесса непрерывной переработки отходов пленочных термопластов.

В данной работе исследовался непрерывный процесс переработки отходов пленочных термопластов на валковой установке с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров, в соответствии с чем решались следующие задачи:

- анализ современного состояния утилизации и вторичной переработки отходов полимерных материалов;
- рассмотрение существующих технологий переработки отходов пленочных термопластов;
- разработка технологического процесса и валкового оборудования для вторичной переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов;
- создание экспериментальной валковой установки непрерывного действия по изучению процесса переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров;
- исследование влияния технологических параметров процесса вальцевания (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины фрикции, величины «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров оборудования (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, геометрических размеров фильеры) на свойства (показатель текучести расплава, предел прочности и относительное удлинение при разрыве) и производительность получаемого гранулята с целью выбора параметров управления;
- разработка математической модели и программного обеспечения для расчета суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных технологических и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого гранулята;
- разработка методики инженерного расчета основных параметров непрерывного процесса вальцевания и конструкции валковых пластикаторов-грануляторов непрерывного действия с учетом заданного качества получаемого гранулята.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

---

- $Q$  – производительность;  
 $N$  – мощность;  
 $V$  – объем;  
 $\Delta P$  – перепад давления;  
 $n$ ,  $K$  и  $m$  – реологические константы;  
 $\mu$  – вязкость;  
 $R$  – радиус;  
 $l_v$  – длина рабочей части валка;  
 $X_n$ ,  $X_k$  – безразмерные координаты сечений входа и выхода;  
 $P$  – удельная мощность, характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал;  
 $d$  – диаметр;  
 $f$  – фрикция;  
 $I$  – показатель текучести расплава;  
 $\sigma_T$  – предел текучести при растяжении;  
 $\sigma_p$  – предел прочности при разрыве;  
 $\varepsilon$  – относительное удлинение при разрыве;  
 $h_0$  – величина минимального зазора;  
 $h_{02}$  – половина величины минимального зазора;  
 $q_N$  – удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции;  
 $u$  – частота вращения переднего валка;  
 $t$  – время вальцевания;  
 $\gamma$  – величина сдвига;  
 $z_j$  – элементарный участок

### Индексы

- $\phi$  – фильера;  
 $n$  – начальное;  
 $k$  – конечное;  
 $c$  – суммарная;  
 $x$  – вдоль оси  $X$

### Аббревиатуры

ПЭ – полиэтилен; ПВХ – пластифицированный поливинилхлорид;  
ПП – полипропилен; ПС – полистирол; ПЭТФ – полиэтилентерефталат;  
ПО – полиолефины; ПА – полиамид; ПЭВП и ПЭНП – полиэтилен высокой и низкой плотности; ЭУ – экспериментальная установка

# 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В современном мире существует свыше 400 различных видов пластмассовых отходов. Мировое производство пластмасс возрастает в среднем на 5...6 % ежегодно и к 2013 году, по прогнозам, достигнет 250 млн. т. Их потребление на душу населения в индустриально развитых странах за последние 20 лет, примерно, удвоилось (достигнув 85...90 кг), а к концу десятилетия, как полагают, повысится на 45...50 % [1].

Одним из быстроразвивающихся направлений использования пластмасс является упаковка. Уже с 1975 года полимеры вышли на третье место после стекла, бумаги и картона по применению для упаковки [2].

Из всех выпускаемых пластиков 41 % используется в упаковке, из этого количества 47 % расходуется на упаковку пищевых продуктов [3, 4]. Удобство и безопасность, низкая цена и высокая эстетика являются определяющими условиями ускоренного роста использования пластиковых масс при изготовлении упаковки. Упаковка из синтетических полимеров, составляющая 40 % бытового мусора, практически «вечна» – она не подвергается разложению. Поэтому использование пластмассовой упаковки сопряжено с образованием отходов в размере 40...50 кг/год в расчете на одного человека.

В России предположительно к 2013 году полимерные отходы составят больше 1 млн. т, а процент их использования до сих пор мал [5]. Учитывая специфические свойства полимерных материалов, они не подвергаются гниению, коррозии; проблема их утилизации носит, прежде всего, экологический характер. Общий объем захоронения твердых бытовых отходов только в Москве составляет около 4 млн. т в год. От общего уровня отходов перерабатывается только 5...7 % от их массы. По данным на 1998 год в усредненном составе твердых бытовых отходов, поставляемых на захоронение, 8 % составляет пластмасса, что составляет 320 тыс. т в год [6].

Однако в настоящее время проблема переработки отходов полимерных материалов обретает актуальное значение не только с позиций охраны окружающей среды, но и связана с тем, что в условиях дефицита полимерного сырья пластмассовые отходы становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом.

Вместе с тем решение вопросов, связанных с охраной окружающей среды, требует значительных капитальных вложений. Стоимость

обработки и уничтожения отходов пластмасс, примерно, в 8 раз превышает расходы на обработку большинства промышленных и почти в 3 раза – на уничтожение бытовых отходов. Это связано со специфическими особенностями пластмасс, значительно затрудняющими или делающими непригодными известные методы уничтожения твердых отходов.

Использование отходов полимеров позволяет существенно экономить первичное сырье (прежде всего нефть) и электроэнергию [7].

Проблем, связанных с утилизацией полимерных отходов, достаточно много. Они имеют свою специфику, но их нельзя считать неразрешимыми. Однако решение невозможно без организации сбора, сортировки и первичной обработки амортизованных материалов и изделий; без разработки системы цен на вторичное сырье, стимулирующих предприятия к их переработке; без создания эффективных способов переработки вторичного полимерного сырья, а также методов его модификации с целью повышения качества; без создания специального оборудования для его переработки; без разработки номенклатуры изделий, выпускаемых из вторичного полимерного сырья.

Отходы пластических масс можно разделить на три группы.

1. *Технологические отходы производства*, которые возникают при синтезе и переработке термопластов. Они делятся на неустраняемые и устранимые технологические отходы. Неустраняемые – это кромки, высечки, обрезки, литники, облой, грат и т.д. В отраслях промышленности, занимающихся производством и переработкой пластмасс, таких отходов образуется от 5 до 35 % [8]. Неустраняемые отходы, по существу представляющие собой высококачественное сырье, по свойствам не отличаются от исходного первичного полимера. Переработка его в изделия не требует специального оборудования и производится на том же предприятии. Устранимые технологические отходы производства образуются при несоблюдении технологических режимов в процессе синтеза и переработки, т.е. это – технологический брак, который может быть сведен до минимума или совсем устранен. Технологические отходы производства перерабатываются в различные изделия, используются в качестве добавки к исходному сырью и т.д.

2. *Отходы производственного потребления* накапливаются в результате выхода из строя изделий из полимерных материалов, используемых в различных отраслях народного хозяйства (амортизованные шины, тара и упаковка, детали машин, отходы сельскохозяйственной пленки, мешки из-под удобрений и т.д.). Эти отходы являются наиболее однородными, малозагрязненными и поэтому представляют наибольший интерес с точки зрения их повторной переработки.

3. *Отходы общественного потребления*, которые накапливаются у нас дома, на предприятиях общественного питания и т.д., а затем

попадают на городские свалки; в конечном итоге они переходят в новую категорию отходов – смешанные отходы.

Наибольшие трудности связаны с переработкой и использованием смешанных отходов. Причиной этого является несовместимость термопластов, входящих в состав бытового мусора, что требует их поэтапного выделения. Кроме того, сбор изношенных изделий из полимеров у населения – чрезвычайно сложное мероприятие с организационной точки зрения и пока еще у нас в стране не налажен.

Основное количество отходов уничтожают захоронением в почву или сжиганием. Однако уничтожение отходов экономически невыгодно и технически сложно. Кроме того, захоронение, затопление и сжигание полимерных отходов ведет к загрязнению окружающей среды, к сокращению земельных угодий (организация свалок) и т.д.

Однако и захоронение, и сжигание продолжают оставаться довольно широко распространенными способами уничтожения отходов пластмасс. Чаще всего тепло, выделяющееся при сжигании, используют для получения пара и электроэнергии. Но калорийность сжигаемого сырья невелика, поэтому установки для сжигания, как правило, являются экономически малоэффективными. Кроме того, при сжигании происходит образование сажи от неполного сгорания полимерных продуктов, выделение токсичных газов и, следовательно, повторное загрязнение воздушного и водного бассейнов, быстрый износ печей за счет сильной коррозии [9].

В начале 70-х годов прошлого века интенсивно начали развиваться работы по созданию био-, фото- и водоразрушаемых полимеров. Получение разлагаемых полимеров вызвало настоящую сенсацию, и этот способ уничтожения вышедших из строя пластмассовых изделий рассматривался как идеальный. Однако последующие работы в этом направлении показали, что трудно сочетать в изделиях высокие физико-механические характеристики, красивый внешний вид, способность к быстрому разрушению и низкую стоимость.

Создание фото- и биоразрушаемых пластмасс основано на введении в цепь полимера фото- и биоактивирующих добавок, которые должны содержать функциональные группы, способные разлагаться под действием ультрафиолетовых лучей или анаэробных бактерий. Трудность в том, что добавки вводят в полимер на стадии синтеза или переработки, а разрушение его должно протекать после использования, но не во время переработки. Поэтому проблема заключается в создании активаторов разрушения, обеспечивающих определенный срок службы пластмассовых изделий без ухудшения их качества. Активаторы должны быть также нетоксичными и не повышать стоимость материала.

Оценка сложившейся ситуации по разработке и освоению биодegradуемых пластмасс показана в работах [10 – 22].

В последние годы исследования в области саморазрушающихся полимеров значительно сократились в основном потому, что издержки производства при получении таких полимеров, как правило, значительно выше, чем при получении обычных пластических масс, и этот способ уничтожения является экономически невыгодным.

Основной путь использования отходов пластмасс – это их утилизация, т.е. повторное использование. Показано, что капитальные и эксплуатационные затраты по основным способам утилизации отходов не превышают, а в ряде случаев даже ниже затрат на их уничтожение. Положительной стороной утилизации является также и то, что получается дополнительное количество полезных продуктов для различных отраслей народного хозяйства и не происходит повторного загрязнения окружающей среды. По этим причинам утилизация является не только экономически целесообразным, но и экологически предпочтительным решением проблемы использования пластмассовых отходов. Подсчитано, что из ежегодно образующихся полимерных отходов в виде амортизированных изделий утилизации подвергается только незначительная часть (всего несколько процентов). Причиной этого являются трудности, связанные с предварительной подготовкой (сбор, сортировка, разделение, очистка и т.д.) отходов, отсутствием специального оборудования для переработки и т.д.

К основным способам утилизации отходов пластических масс относятся:

- термическое разложение путем пиролиза;
- разложение с получением исходных низкомолекулярных продуктов (мономеров, олигомеров);
- вторичная переработка.

Пиролиз – это термическое разложение органических продуктов в присутствии кислорода или без него. Пиролиз полимерных отходов позволяет получить высококалорийное топливо, сырье и полуфабрикаты, используемые в различных технологических процессах, а также мономеры, применяемые для синтеза полимеров.

В процессе пиролиза могут образовываться газообразные (пиролизный газ), жидкие (пиролизное масло) или твердые (кокс) продукты [23].

Газообразные продукты термического разложения пластмасс могут использоваться в качестве топлива для получения рабочего водяного пара. Жидкие продукты используются для получения теплоносителей. Спектр применения твердых (воскообразных) продуктов пиролиза отходов пластмасс достаточно широк (компоненты различного рода защитных составов, смазок, эмульсий, пропиточных материалов и др.) [24].

Совершенствование установок для сжигания бытового мусора привело к возникновению таких методов пиролиза, которые позволяют получать горючие, безвредные для окружающей среды газы; значительное уменьшение объема выбросов. Однако получаемые при этом

пиролизные масла имеют очень сложный состав, содержат большое количество воды, термически нестабильны и по этим причинам не пригодны для использования в качестве химического сырья [25 – 27].

Гидролиз является реакцией, обратной поликонденсации. С его помощью при направленном действии воды по местам соединения компонентов поликонденсаты разрушаются до исходных соединений. Гидролиз происходит под действием экстремальных температур и давлений. Глубина протекания реакции зависит от pH среды и используемых катализаторов.

Этот способ использования отходов энергетически более выгоден, чем пиролиз, так как в оборот возвращаются высококачественные химические продукты.

По сравнению с гидролизом для расщепления отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) более экономичен другой способ – гликолиз. Деструкция происходит при высоких температурах и давлении в присутствии этиленгликоля и с участием катализаторов до получения чистого дигликольтерефталата. По этому принципу можно также переэтерифицировать карбаматные группы в полиуретане.

Все же самым распространенным термическим методом переработки отходов ПЭТФ является их расщепление с помощью метанола – метанолиз. Процесс протекает при температуре выше 150 °С и давлении 1,5 МПа, ускоряется катализаторами переэтерификации. Этот метод очень экономичен. На практике применяют и комбинацию методов гликолиза и метанолиза [28].

В настоящее время наиболее приемлемым для России является вторичная переработка отходов полимерных материалов механическим рециклингом, так как этот способ переработки не требует дорогого специального оборудования и может быть реализован в любом месте накопления отходов. Устаревшие пластмассы можно также добавлять к углю, или вводить в кокс для выплавки металла [29].

Далее рассмотрим основные методы вторичной переработки наиболее распространенных полимерных материалов.

## **1.2. УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПОЛИОЛЕФИНОВ**

Полиолефины – самый многотоннажный вид термопластов. Они находят широкое применение в различных отраслях промышленности, транспорта и в сельском хозяйстве. К полиолефинам относятся полиэтилен высокой и низкой плотности (ПЭВП и ПЭНП), полипропилен (ПП). Наиболее эффективным способом утилизации отходов ПО является их повторное использование. Ресурсы вторичных ПО велики: только отходы потребления ПЭНП в 1995 году достигли 2 млн. т. Использование вторичных термопластов вообще и ПО в частности позволяет увеличить степень удовлетворения в них на 15...20 %.

Способы переработки отходов ПО зависят от марки полимеров и их происхождения. Наиболее просто перерабатываются технологические отходы, т.е. отходы производства, которые не подверглись интенсивному световому воздействию в процессе эксплуатации. Не требуют сложных методов подготовки и отходы потребления из ПЭВП и ПП, так как, с одной стороны, изделия, изготавливаемые из этих полимеров, также не претерпевают значительных воздействий вследствие своей конструкции и назначения (толстостенные детали, тара, фурнитура и т.д.), а с другой стороны, исходные полимеры более устойчивы к воздействию атмосферных факторов, чем ПЭНП. Такие отходы перед повторным использованием нуждаются только в измельчении и гранулировании [30].

### 1.2.1. СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Выбор технологических параметров переработки отходов ПО и областей использования получаемых из них изделий обусловлен их физико-химическими, механическими и технологическими свойствами, которые в значительной степени отличаются от тех же характеристик первичного полимера. К основным особенностям вторичного ПЭНП (ВПЭНП), которые определяют специфику его переработки, следует отнести: низкую насыпную плотность; особенности реологического поведения расплава, обусловленные высоким содержанием геля; повышенную химическую активность вследствие изменений структуры, происходящих при переработке первичного полимера и эксплуатации полученных из него изделий. Кроме того, вторичные полимеры характеризуются резким снижением разрушающего напряжения и особенно относительного удлинения, морозостойкости и теплостойкости при сравнительно низких напряжениях сдвига, а также текучести расплава вследствие образования гель-фракции [31 – 36].

В процессе переработки и эксплуатации материал подвергается механохимическим воздействиям, термической, тепло- и фотоокислительной деструкции, что приводит к появлению активных групп, которые при последующих переработках способны инициировать реакции окисления [37 – 43].

Изменение химической структуры начинается уже в процессе первичной переработки ПО, в частности при экструзии, когда полимер подвергается значительным термоокислительным и механохимическим воздействиям [41]. Наибольший вклад в изменения, протекающие при эксплуатации, вносят фотохимические процессы. Эти изменения необратимы, в то время как физико-механические свойства, например, полиэтиленовой пленки, отслужившей один-два сезона для укрыва

парников, после перепрессовки и экструзии почти полностью восстанавливаются [9].

Образование в ПЭ пленке при ее эксплуатации значительного числа карбонильных групп приводит к повышенной способности ВПЭНП поглощать кислород, следствием чего является образование во вторичном сырье винилиденных и винилиденных групп, которые значительно снижают термоокислительную стабильность полимера при последующих переработках, инициируют процесс фотостарения таких материалов и изделий из них, снижают срок их службы. Концентрация карбонильных групп зависит от условий эксплуатации: так, во влажных субтропиках их накапливаемость в 30 раз больше, чем за то же время в условиях Москвы [36].

Наличие карбонильных групп не определяет ни механические свойства (введением их до 9 % в исходную макромолекулу не оказывает существенного влияния на механические свойства материала), ни пропускание пленкой солнечного света (поглощение света карбонильными группами лежит в области длин волн менее 280 нм, а свет такого состава практически не содержится в солнечном спектре) [37]. Однако именно наличие карбонильных групп в ПЭ обуславливает весьма важное его свойство – стойкость к воздействию света.

Инициатором фотостарения ПЭ являются гидропероксиды, образующиеся еще при переработке первичного материала в процессе механохимической деструкции [37, 38, 44]. Их инициирующее действие особенно эффективно на ранних стадиях старения, в то время как карбонильные группы оказывают существенное влияние на более поздних стадиях. Установлено, что предшествующее вторичной переработке ультрафиолетовое облучение усиливает чувствительность ПЭ пленки к последующему фотоокислению гораздо сильнее, чем одна повторная переработка [45].

При старении вторичного ПЭ (ВПЭ) существенным становится не только распад карбонильных соединений на свободные радикалы, но и распад, приводящий к разрыву цепи [36, 42].

Используемый для вторичной переработки ВПЭНП, получаемый из отходов сельскохозяйственной пленки, характеризуется не только наличием окисленных участков, содержащих гидропероксидные и карбонильные группы, но и наличием нерастворимой гель-фракции. Содержание ее не является постоянным и меняется от партии к партии (от 0,5 до 46 % и более), что зависит от условий старения изделий [31].

Как известно [46], при старении протекают конкурирующие реакции деструкции и структурирования. Следствием первой является образование низкомолекулярных продуктов, второй – нерастворимой гель-фракции. Скорость образования низкомолекулярных продуктов максимальна в начале старения. Этот период характеризуется низким содержанием геля и снижением физико-механических показателей.

В дальнейшем скорость образования низкомолекулярных продуктов снижается, наблюдается резкое возрастание содержания геля и уменьшение относительного удлинения, что свидетельствует о протекании процесса структурирования. Затем (после достижения максимума) содержание геля в ВПЭ при его фотостарении снижается, что совпадает с полным израсходованием винилиденовых групп в полимере и достижением предельно допустимых значений относительного удлинения. Такой эффект объясняется вовлечением образовавшихся пространственных структур в процессе деструкции, а также растрескиванием по границе морфологических образований, что приводит к снижению физико-механических характеристик и ухудшению оптических свойств [36].

Скорость изменения физико-механических характеристик ВПЭ практически не зависит от содержания в нем гель-фракции. Однако содержание геля необходимо всегда учитывать как структурный фактор при выборе способа повторной переработки, модификации и при определении областей использования полимера.

Характеристики свойств ПЭНП до и после старения в течение трех месяцев и ВПЭНП, полученного экструзией из состаренной пленки, приведены в табл. 1.1.

**1.1. Характеристики свойств ПЭНП  
до и после старения в течение трех месяцев и ВПЭНП,  
полученного экструзией из состаренной пленки**

Характеристики	ПЭНП		ВПЭНП
	исходный	после эксплуатации	экструзионный
Содержание групп С-О, моли	0,1	1,6	1,6
Содержание низкомолекулярных продуктов, %	0,1	6,2	6,2
Содержание геля, %	0	20	20
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	15	11,4	10
Относительное удлинение при разрыве, %	780,5	27	505
Стойкость к растрескиванию, ч	8	-	1
Светостойкость, сут	90	-	50

Характер изменения физико-механических характеристик для ПЭНП и ВПЭНП неодинаков: у первичного полимера наблюдается монотонное снижение прочности и относительного удлинения, которые составляют 30 и 70 % соответственно после старения в течение пяти месяцев. Для вторичного ПЭНП характер изменения этих показателей несколько отличается: разрушающее напряжение практически не изменяется, а относительное удлинение уменьшается на 90 %. Причиной этого может быть наличие гель-фракции во ВПЭНП, которая выполняет функцию активного наполнителя полимерной матрицы. Наличие такого «наполнителя» – причина появления значительных напряжений, следствием чего является повышение хрупкости материала, резкое снижение относительного удлинения (вплоть до 10 % от значений для первичного ПЭ), стойкости к растрескиванию, прочности при растяжении (10...15 МПа), эластичности, повышение жесткости.

В ПЭ при старении происходит не только накопление кислородосодержащих групп, в том числе кетонных, и низкомолекулярных продуктов, но и значительное снижение физико-механических характеристик, которые не восстанавливаются после вторичной переработки состаренной полиолефиновой пленки. Структурно-химические превращения в ВПЭНП происходят в основном в аморфной фазе. Это приводит к ослаблению межфазной границы в полимере, в результате чего материал теряет прочность, становится хрупким, ломким и подверженным дальнейшему старению как при повторной переработке в изделия, так и при эксплуатации таких изделий, которые характеризуются низкими физико-механическими показателями и сроком службы.

Для оценки оптимальных режимов переработки вторичного полиэтиленового сырья большое значение имеют его реологические характеристики [32]. Для ВПЭНП характерна низкая текучесть при малых напряжениях сдвига, которая повышается при увеличении напряжения, причем рост текучести для ВПЭ больше, чем для первичного. Причиной этого является наличие геля во ВПЭНП, который значительно повышает энергию активации вязкого течения полимера. Текучесть можно регулировать, также изменяя температуру при переработке – с увеличением температуры текучесть расплава увеличивается.

Ввиду того, что физико-механические показатели ВПЭ ниже, чем у первичного, уровень равновесных напряжений во вторичном полимере должен быть также ниже. Поэтому изготовленные из него изделия необходимо эксплуатировать при более низких нагрузках, чем такие же изделия из первичного полимера, и в течение более короткого времени. Это необходимо учитывать при разработке номенклатуры изделий, изготавливаемых из вторичных термопластов, а также при расчете их несущей способности [47].

Итак, на вторичную переработку поступает материал, предыстория которого оказывает весьма существенное влияние на его физико-механические и технологические свойства. В процессе вторичной переработки полимер подвергается дополнительным механохимическим и термоокислительным воздействиям, причем изменение его свойств зависит от кратности переработки. При многократных переработках во время периодического контакта полимера с кислородом воздуха вследствие образования большего количества гидропероксидов увеличивается число разрывов цепей, и степень сшивания уменьшается. В отличие от непрерывной переработки, которая протекает при недостатке кислорода и приводит к сшиванию полимера, многократная переработка вторичного сырья приводит к автокаталитическому росту содержания гидропероксидов, которые оказывают катастрофическое воздействие на фотостабильность полимера и соответственно на срок службы получаемых из него изделий [45].

При исследовании влияния кратности переработки на свойства получаемых изделий показано, что 3–5-кратная переработка оказывает незначительное влияние (гораздо меньше, чем первичная). Заметное снижение прочности начинается при 5–10-кратной переработке. В процессе повторных переработок ВПЭНП рекомендуется повышать температуру литья на 3...5 % или число оборотов шнека при экструзии на 4...6 % [48] для разрушения образующегося геля. Необходимо отметить, что в процессе повторных переработок, особенно при воздействии кислорода воздуха, происходит снижение молекулярной массы полиолефинов, которое приводит к резкому повышению хрупкости материала. Многократная переработка другого полимера из класса полиолефинов – ПП приводит обычно к увеличению показателя текучести расплава (ПТР), хотя при этом прочностные характеристики материала не претерпевают значительных изменений. Поэтому отходы, образующиеся при изготовлении деталей из ПП, а также сами детали по окончании срока эксплуатации могут быть повторно использованы в смеси с исходным материалом для получения новых деталей [30].

Из всего сказанного выше следует, что вторичное ПО сырье следует подвергать модификации с целью улучшения качества и повышения срока службы изделий из него.

### 1.2.2. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНОГО ПОЛИОЛЕФИНОВОГО СЫРЬЯ В ГРАНУЛЯТ

Для превращения отходов термопластов в сырье, пригодное для последующей переработки в изделия, необходима его предварительная обработка. Выбор способа предварительной обработки зависит в основном от источника образования отходов и степени их загрязненности. Так, однородные отходы производства и переработки ПЭНП

обычно перерабатывают на месте их образования, для чего требуется незначительная предварительная обработка – главным образом, измельчение и грануляция.

Отходы в виде вышедших из употребления изделий требуют более основательной подготовки. Предварительная обработка отходов сельскохозяйственной ПЭ пленки, мешков из-под удобрений, отходов из других компактных источников, а также смешанных отходов включает следующие этапы: сортировка (грубая) и идентификация (для смешанных отходов), измельчение, разделение смешанных отходов, мойка, сушка. После этого материал подвергают грануляции.

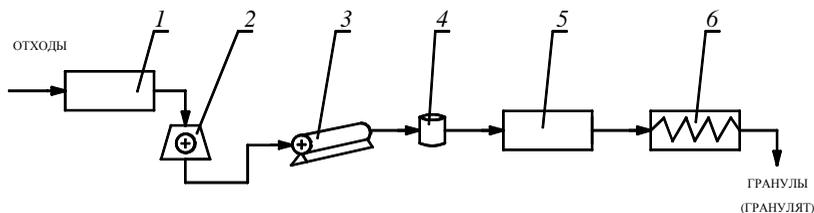
Предварительная сортировка предусматривает грубое разделение отходов по различным признакам: цвету, габаритам, форме и, если это нужно и возможно, – по видам пластмасс. Предварительную сортировку производят, как правило, вручную на столах или ленточных конвейерах; при сортировке одновременно удаляют из отходов различные посторонние предметы и включения.

Разделение смешанных (бытовых) отходов термопластов по видам проводят следующими основными способами: флотационным, разделением в тяжелых средах, аэросепарацией, электросепарацией, химическими методами и методами глубокого охлаждения [49]. Наибольшее распространение получил метод флотации, который позволяет разделять смеси таких промышленных термопластов, как ПЭ, ПП, полистирол (ПС) и поливинилхлорид (ПВХ). Разделение пластмасс производится при добавлении в воду поверхностно-активных веществ, которые избирательно изменяют их гидрофильные свойства.

В некоторых случаях эффективным способом разделения полимеров может оказаться растворение их в общем растворителе или в смеси растворителей. Обработывая раствор паром, выделяют ПВХ, ПС и смесь полиолефинов; чистота продуктов – не менее 96 %.

Методы флотации и разделения в тяжелых средах являются наиболее эффективными и экономически целесообразными из всех перечисленных выше. Однако экономически более выгодно использовать смешанные отходы без разделения. Но термодинамическая несовместимость полимеров приводит к тому, что их смеси обладают более низкими показателями физико-механических свойств по сравнению с индивидуальными полимерами или их отходами. Поэтому оптимальным решением при совместном использовании таких отходов является удаление ПВХ из смеси и его самостоятельная переработка. В смесь рекомендуется вводить различные вещества, повышающие совместимость ингредиентов в смешанных отходах [50].

Вторичная переработка ПО в гранулы в настоящее время в основном производится по схеме, показанной на рис. 1.1.



**Рис 1.1. Схема вторичной переработки полиолефинов в гранулы:**

1 – узел сортировки отходов; 2 – дробилка; 3 – моющая машина;  
4 – центрифуга; 5 – сушильная установка; 6 – гранулятор

Вышедшие из употребления ПО отходы с содержанием посторонних примесей, не более 5 %, со склада сырья поступают на узел сортировки отходов 1, в процессе которой из них удаляют случайные инородные включения и выбраковывают сильно загрязненные куски. Отходы, прошедшие сортировку, измельчают в ножевых дробилках 2 мокрого или сухого измельчения до получения рыхлой массы с размером частиц 2...9 мм [51].

Производительность измельчительного устройства определяется не только его конструкцией, числом и длиной ножей, частотой вращения ротора, но и видом отходов. Так, самая низкая производительность при переработке отходов пенопластов, которые занимают очень большой объем и которые трудно компактно загрузить. Более высокая производительность достигается при переработке отходов пленок, волокон, выдувных изделий.

Для всех ножевых дробилок характерной особенностью является повышенный шум, который связан со спецификой процесса измельчения вторичных полимерных материалов. Для снижения уровня шума измельчитель вместе с двигателем и вентилятором заключают в шумозащитный кожух, который может выполняться разъемным и иметь специальные окна с заслонками для загрузки измельчаемого материала.

Измельчение – очень важный этап подготовки отходов к переработке, так как степень измельчения определяет объемную плотность, сыпучесть и размеры частиц получаемого продукта. Регулирование степени измельчения позволяет механизировать процесс переработки, повысить качество материала за счет усреднения его технологических характеристик, сократить продолжительность других технологических операций, упростить конструкцию перерабатывающего оборудования.

Весьма перспективным способом измельчения является криогенный, который позволяет получать порошки из отходов со степенью дисперсности от 0,5 до 2 мм [52, 53]. Использование порошковой технологии [54, 55] имеет ряд преимуществ: снижение продолжительно-

сти смешения, сокращение расхода энергии и затрат рабочего времени на текущее обслуживание смесителей, лучшее распределение компонентов в смеси, уменьшение деструкции макромолекул и др.

Из известных методов получения порошкообразных полимерных материалов, используемых в химической технологии, для измельчения отходов термопластов наиболее приемлемым является способ механического измельчения. Механическое измельчение можно осуществлять двумя путями: криогенным способом (измельчение в среде жидкого азота или другого хладагента [53]) и при обычных температурах в среде дезагломерирующих ингредиентов, которые являются менее энергоемкими.

Далее измельченные отходы подают на отмывку в моечную машину 3 (рис. 1.1). Отмывку ведут в несколько приемов специальными моющими смесями. Отжатую в центрифуге 4 массу с влажностью 10...15 % подают на окончательное обезвоживание в сушильную установку 5, до остаточного содержания влаги 0,2 % [51].

Для сушки отходов применяют сушилки различных типов: полочные, ленточные, ковшевые, с «кипящим» слоем, вихревые и т.д.

За рубежом выпускают установки, в которых есть устройства и для мойки, и для сушки производительностью до 350...500 кг/ч. В такой установке измельченные отходы загружают в ванну, которую заполняют моющим раствором. Пленка перемешивается лопастной мешалкой, при этом грязь оседает на дно, а отмытая пленка всплывает. Обезвоживание и сушку пленки осуществляют на вибросите и в вихревом сепараторе. Остаточная влажность составляет менее 0,1 %.

Грануляция является заключительной стадией подготовки вторичного сырья для последующей переработки в изделия. Эта стадия особенно важна для ВПЭНП в связи с его низкой насыпной плотностью и трудностью транспортирования. В процессе гранулирования происходит уплотнение материала, облегчается его дальнейшая переработка, усредняются характеристики вторичного сырья, в результате чего получают материал, который можно перерабатывать на стандартном оборудовании.

Для пластикации измельченных и очищенных отходов ПО наиболее широкое применение нашли одночервячные экструдеры 6 длиной шнека 25...30 D, оснащенные фильтром непрерывного действия и имеющие зону дегазации. На таких экструдерах довольно эффективно перерабатываются практически все виды вторичных термопластов при насыпной плотности измельченного материала от 50 до 300 кг/м<sup>3</sup>. Однако для переработки загрязненных и смешанных отходов необходимы червячные прессы специальных конструкций, с короткими мно-

гозаходными червяками (длиной 3,5...5 D), имеющими цилиндрическую насадку в зоне выдавливания [56].

Для переработки отходов термопластов многие зарубежные фирмы выпускают специализированное оборудование [56], например, японское оборудование системы Reverser.

Основным блоком этой системы является экструдер с мощностью привода 90 кВт, диаметром шнека 253 мм и отношением  $L/D = 3,75$ . На выходе экструдера сконструирована гофрированная насадка диаметром 420 мм. Благодаря выделению тепла при трении и сдвиговым воздействиям на полимерный материал он плавится за короткий промежуток времени, причем обеспечивается быстрая гомогенизация расплава. Изменяя зазор между конусной насадкой и кожухом, можно регулировать усилие сдвига и силу трения, изменяя при этом режим переработки. Поскольку плавление происходит очень быстро, термодеструкции полимера не наблюдается. Система снабжена узлом дегазации, что является необходимым условием при переработке вторичного полимерного сырья.

Вторичные гранулированные материалы получают в зависимости от последовательности процессов резки и охлаждения двумя способами: грануляцией на головке и подводным гранулированием. Выбор способа гранулирования зависит от свойств перерабатываемого термопласта и, особенно, от вязкости его расплава и адгезии к металлу.

При грануляции на головке расплав полимера выдавливается через отверстие в виде цилиндрических жгутов, которые отрезаются скользящими по фильерной плите ножами. Полученные гранулы ножом отбрасываются от головки и охлаждаются. Резание и охлаждение можно производить в воздушной среде, воде, либо резанием в воздушной среде, а охлаждение – в воде. Для ПО, которые имеют высокую адгезию к металлу и повышенную склонность к слипанию, в качестве охлаждающей среды применяют воду.

При использовании оборудования с большой единичной мощностью применяют так называемое подводное гранулирование. При этом способе расплав полимера выдавливается в виде стренгов через отверстия фильерной плиты на головке сразу в воду и разрезается на гранулы вращающимися ножами. Температура охлаждающей воды поддерживается в пределах 50...70 °С, что способствует более интенсивному испарению остатков влаги с поверхности гранул; количество воды составляет 20...40 м<sup>3</sup> на 1 т гранулята.

Чаще всего в головке грануляторов формируются стренги или ленты, которые гранулируются после охлаждения в водяной ванне. Диаметр получаемых гранул составляет 2...5 мм.

Охлаждение должно проводиться при оптимальном режиме, чтобы гранулы не деформировались, не слипались, и чтобы обеспечивалось удаление остатков влаги.

Существенное влияние на распределение гранул по размерам оказывает температура головки. Для обеспечения равномерной температуры расплава между экструдером и выходными отверстиями головки располагают решетки. Число выходных отверстий в головке – от 20 до 300.

Производительность процесса гранулирования зависит от вида вторичного термопласта и его реологических характеристик [9].

Исследования гранулята ВПЭ свидетельствуют о том, что его вязкотекучие свойства практически не отличаются от свойств первичного ПЭ, т.е. его можно перерабатывать при тех же режимах экструзии и литья под давлением, что первичный ПЭ. Однако получаемые изделия характеризуются низкими качеством и долговечностью.

Из гранулята получают упаковки для товаров бытовой химии, вешалки, детали строительного назначения, сельскохозяйственные орудия, поддоны для транспортировки грузов, вытяжные трубы, облицовку дренажных каналов, безнапорные трубы для мелиорации и другие изделия. Эти изделия получают из «чистого» вторичного сырья. Однако более перспективным является добавление вторичного сырья к первичному в количестве 20...30 %. Введение в полимерную композицию пластификаторов, стабилизаторов, наполнителей позволяет увеличить эту цифру до 40...50 %. Это повышает физико-механические характеристики изделий, однако их долговечность (при эксплуатации в жестких климатических условиях) составляет всего 0,6...0,75 от долговечности изделий из первичного полимера. Более эффективный путь – модификация вторичных полимеров, а также создание высоконаполненных вторичных полимерных материалов.

### 1.2.3. СПОСОБЫ МОДИФИКАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ

Результаты исследования механизма процессов, протекающих при эксплуатации и переработке ПО, и их количественное описание, позволяет сделать вывод о том, что получаемые из вторичного сырья полупродукты должны содержать не более 0,1...0,5 моля окисленных активных групп, иметь оптимальные молекулярную массу и ММР (макро-молекулярный разброс), обладать воспроизводимыми физико-механическими и технологическими показателями. Только в этом случае полупродукт можно использовать для производства изделий с гарантированным сроком службы взамен дефицитного первичного ПО сырья. Однако получаемый в настоящее время гранулят этим требованиям не удовлетворяет.

Надежным путем решения проблемы создания качественных полимерных материалов и изделий из вторичных ПО является модификация гранулята, цель которой – экранирование функциональных групп и активных центров химическими или физико-химическими способами и создание однородного по структуре материала с воспроизводимыми свойствами.

Методы модификации вторичного ПО сырья можно разделить на химические (сшивание, введение различных добавок, главным образом органического происхождения, обработка кремнийорганическими жидкостями и др.) и физико-механические (наполнение минеральными и органическими наполнителями).

Например, максимальное содержание гель-фракции (до 80 %) и наиболее высокие физико-механические показатели шитого ВПЭНП достигаются при введении 2...2,5 % пероксида дикумила на вальцах при 130 °С в течение 10 мин. Относительное удлинение при разрыве такого материала – 210 %, показатель текучести расплава составляет 0,1...0,3 г/10 мин. Степень сшивания уменьшается с повышением температуры и увеличением продолжительности вальцевания в результате протекания конкурирующего процесса деструкции. Это позволяет регулировать степень сшивания, физико-механические и технологические характеристики модифицированного материала.

Разработан метод формирования изделий из ВПЭНП путем введения пероксида дикумила непосредственно в процессе переработки и получены опытные образцы труб и литевых изделий, содержащих 70...80 % гель-фракции.

Введение воска и эластопласта (до 5 масс. ч.) значительно улучшает перерабатываемость ВПЭ, повышает показатели физико-механических свойств (особенно относительное удлинение при разрыве и стойкость к растрескиванию – на 10 % и с 1 до 320 ч соответственно) и уменьшают их разброс, что свидетельствует о повышении однородности материала.

Модификация ВПЭНП малеиновым ангидридом в дисковом экструдере также приводит к повышению его прочности, теплостойкости, адгезионной способности и стойкости к фотостарению. При этом модифицирующий эффект достигается при меньшей концентрации модификатора и меньшей продолжительности процесса, чем при введении эластопласта.

Полученные данные легли в основу разработки технологии получения компонента герметиков на основе бутилкаучука для наклеивания линолеума, керамической плитки, а также клеев-расплавов с относительно невысокой температурой плавления для склеивания кожевенных, текстильных и других материалов.

Перспективным способом повышения качества полимерных материалов из вторичных ПО является термомеханическая обработка кремнийорганическими соединениями [57]. Этот способ позволяет получать изделия из вторичного сырья с повышенными прочностью, эластичностью и стойкостью к старению. Механизм модификации заключается в образовании химических связей между силоксановыми группами кремнийорганической жидкости и неопределенными связями и кислородосодержащими группами вторичных ПО.

Технологический процесс получения модифицированного материала включает следующие стадии: сортировка, дробление и отмывка отходов; обработка отходов кремнийорганической жидкостью при  $90 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 4...6 ч; сушка модифицированных отходов методом центрифугирования; перегрануляция модифицированных отходов.

Расчет экономической эффективности при выпуске дренажных труб из полученного таким способом полимера взамен керамических показал целесообразность этого метода модификации ВПЭНП. Кроме труб из модифицированного полимера могут быть получены также различные емкости, тара, детали вентиляторов, упаковочные и защитные пленки и другие изделия.

Помимо твердофазного способа модификации предложен способ модификации ВПЭ в растворе, который позволяет получать порошок ВПЭНП с размером частиц не более 20 мкм. Этот порошок может быть использован для переработки в изделия методами ротационного формования и для нанесения покрытий методом электростатического напыления.

Вторичный ПЭ, полученный из отходов сельскохозяйственной пленки, сам может служить модифицирующей добавкой при создании полимерных материалов типа попролин. Это материалы на основе ПП (попролин-1), а также ПП и ВПЭНП (попролин-2) [58].

Предпосылкой для разработки композиций на основе ПП с использованием ВПЭНП послужили результаты работ по созданию попролина-1, который представляет собой модифицированный щелочным сульфатным лигнином – отходом целлюлозно-бумажной промышленности – полимерный материал на основе ПП. Для повышения морозостойкости в него вводили низкомолекулярный пластификатор – диоктилсебацат (ДОС). Прочностные характеристики такого полимера сохраняются на уровне прочности ПП, а в некоторых случаях даже превышают ее. Морозостойкость и стойкость к старению попролина-1 в несколько раз выше, чем ПП. Изучение реологических свойств попролина-1 показало, что его можно перерабатывать при более «мягких» режимах и с меньшими энергетическими затратами, чем ПП.

В попролине-2 вместо низкомолекулярного легко выпотевающего пластификатора ДОС содержится ВПЭНП, который играет роль высоко-

комолекулярной пластифицирующей добавки, хорошо совмещающейся с основным полимером [59]. Полученные результаты позволили рекомендовать для переработки попролина-2 в изделия технологические режимы, аналогичные тем, которые используется при переработке попролина-1. Попролин-2 предназначается для производства тары (ящиков) для мясных и молочных продуктов.

Разработка подобных композиций продиктована потребностями различных отраслей промышленности, главным образом производящих продукты питания, которые широко используют полимерные материалы для производства тары.

Большой научный и практический интерес представляет создание наполненных полимерных материалов на основе вторичного полиэтиленового сырья. Использование полимерных материалов из вторичного сырья, содержащих до 30 % наполнителя, позволит высвободить до 40 % первичного сырья и направить его на производство изделий, которые нельзя получать из вторичного (напорные трубы, упаковочные пленки, транспортная многооборотная тара и др.). Это в значительной степени сократит дефицит первичного полимерного сырья.

Для получения наполненных полимерных материалов из вторичного сырья можно использовать дисперсные и армирующие наполнители минерального и органического происхождения, а также наполнители, которые можно получать из полимерных отходов (измельченные отходы реактопластов и резиновая крошка). Наполнению можно подвергать практически все отходы термопластов, а также смешанные отходы, которые для этой цели использовать предпочтительней и с экономической точки зрения.

Например, целесообразность применения лигнина связана с наличием в нем фенольных соединений, способствующих стабилизации ВПЭНП при эксплуатации; слюды – с получением изделий, обладающих низкой ползучестью, повышенной тепло- и атмосферостойкостью, а также характеризующихся небольшим износом перерабатывающего оборудования и низкой стоимостью. Каолин, ракушечник, сланцевая зола, угольные сферы и железо применяются как дешевые инертные наполнители.

При введении в ВПЭ мелкодисперсного фосфогипса, гранулированного в полиэтиленовом воске, получены композиции, имеющие повышенное удлинение при разрыве. Этот эффект можно объяснить пластифицирующим действием полиэтиленового воска. Так, прочность при разрыве ВПЭ, наполненного фосфогипсом, на 25 % выше, чем у ВПЭ, а модуль упругости при растяжении – больше на 250 %.

Усиливающий эффект при введении во ВПЭ слюды связан с особенностями кристаллического строения наполнителя, высоким характеристическим отношением (отношением диаметра чешуйки к толщине

не), причем применение измельченного, порошкообразного ВПЭ позволило сохранить строение чешуек при минимальном разрушении.

У композиций с отходами эластомерного сырья относительное удлинение при разрыве выше в 2–2,5 раза по сравнению с этим показателем для ВПЭ. Это обеспечивает возможность их использования для изготовления изделий, подвергающихся значительным изгибающим или растягивающим напряжениям [60].

Композиции, содержащие лигнин, сланцы, каолин, сферы, отходы сапропеля, обладают сравнительно невысокими физико-механическими показателями, зато они являются наиболее дешевыми и могут найти применение при производстве гидроизоляционных настилов, плит, торцевого паркета [61] и других изделий строительного назначения.

### **1.3. УТИЛИЗАЦИЯ И ВТОРИЧНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА, ПОЛИСТИРОЛЬНЫХ ПЛАСТИКОВ, ПОЛИАМИДОВ, ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА**

Поливинилхлорид – один из наименее стабильных карбоцепных промышленных полимеров. Реакция деструкции ПВХ – дегидрохлорирование начинается уже при температурах выше 100 °С, а при 160 °С реакция протекает очень быстро. В результате термоокисления ПВХ происходят агрегативные и дезагрегативные процессы – сшивание и деструкция.

Важной характеристикой, определяющей принципиальную возможность вторичной переработки ПВХ отходов (допустимое время переработки, срок службы вторичного материала или изделия), а также необходимость дополнительного усиления стабилизирующей группы, является время термостабильности [62].

Основными видами отходов на основе ненаполненных ПВХ являются нежелатинизированный пластизол, технологические отходы и бракованные изделия. На предприятиях легкой промышленности России действует следующая технология переработки отходов пластизола методами литья под давлением. Процесс включает измельчение отходов пленок и листов, приготовление пасты ПВХ в пластикаторе, формование нового изделия методом литья.

Нежелатинизированный пластизол при очистке дозатора, смесителя собирали в емкости, подвергали желатинизации, далее смешивали с технологическими отходами и бракованными изделиями на вальцах, полученные листы подвергали переработке на измельчителях роторного типа. Полученную таким образом пластизольную крошку перерабатывали методом литья под давлением. Пластизольная крошка в количестве от 10 до 50 масс.ч. может быть использована в композиции с каучуком для получения резиновых смесей, причем это позволяет исключить из рецептур мягчители.

Введение пластизольной крошки до 50 масс.ч. практически не сказывается на прочности композиций и сопротивлении истиранию, приводя к повышенной твердости [63].

Для переработки отходов наполненных ПВХ-пластиков в общем случае предлагается следующая схема.

Предварительно рассортированные отходы ИК (искусственные кожи) измельчают на ножевых дробилках, вводят в них необходимые добавки и в процессе регрануляции гомогенизируют и уплотняют смесь. Регрануляты перерабатывают на литьевых машинах, получая защитные покрытия для педалей, грязезащитные полотна для грузовых автомобилей и т.д. Изделия обладают гладкой поверхностью, которая может быть окрашена, а также достаточной стойкостью к истиранию и образованию трещин [64].

Для переработки отходов методом литья под давлением, как правило, применяют машины, работающие по типу интрузии, с постоянно вращающимся шнеком, конструкция которого обеспечивает самопроезвальный захват и гомогенизацию отходов.

В настоящее время одним из наиболее эффективных способов переработки отходов полимерных материалов на основе ПВХ с целью их утилизации является метод упруго-деформационного диспергирования, основанный на явлении множественного разрушения в условиях комбинированного воздействия на материал высокого давления и сдвиговой деформации при повышенной температуре. Сущность метода заключается в том, что энергия, запасенная в материале при приложении давления, под воздействием сдвиговой деформации способствует образованию новой поверхности [65, 66].

Для переработки полимерных комбинированных материалов, в том числе ИК, отходов кабельной изоляции, термопластичных покрытий на бумажной основе и других могут быть использованы способы, основанные на комбинации экструзионной подготовки и формования методом прессования. Для реализации этого метода предлагается агрегат, состоящий из двух машин, впрыск каждой из которых 10 кг. Доля присутствующих в отходах, специально введенных в них неполимерных материалов, может составлять до 25 %, причем даже содержание меди может достигать 10 %.

Также применяется метод совместной экструзии свежего термопласта, образующего пристенные слои, и полимерных отходов, составляющих внутренний слой, в результате может быть получено трехслойное изделие (например, пленка). Другой метод – раздувное формование предложен в [67]. В разработанной конструкции экструзионно-раздувной установки в качестве генератора расплава предусмотрен червячно-дисковый экструдер с раздувным приводом. Экструзи-

зией с раздувом из смеси первичного и вторичного ПВХ изготавливают бутылки, емкости и другие полые изделия.

Проблема регенерации отходов ПВХ-пластиков в настоящее время интенсивно разрабатывается, однако имеется немало трудностей, связанных, прежде всего, с наличием наполнителя. Некоторые разработчики пошли по пути выделения полимера из композита с последующим его использованием. Однако зачастую эти технологические варианты неэкономичны, трудоемки и пригодны для узкого ассортимента материалов.

Известные способы прямого термоформования либо требуют высоких дополнительных затрат (подготовительные операции, добавка первичного полимера, пластификаторов, использование специального оборудования), либо не позволяют перерабатывать высоконаполненные отходы, в частности, ПВХ-пластиков.

Отходы полистирола накапливаются в виде вышедших из употребления изделий из ПС и его сополимеров (хлебницы, вазы, сырницы, различная посуда, решетки, банки, вешалки, облицовочные листы, детали торгового и лабораторного оборудования и т.д.), а также в виде промышленных (технологических) отходов ПС общего назначения, ударопрочного ПС (УПС) и его сополимеров.

Вторичное использование полистирольных пластиков может идти по следующим путям:

- утилизация сильно загрязненных промышленных отходов;
- утилизация технологических отходов УПС и АБС-пластика методами литья под давлением, экструзии и прессования;
- утилизация изношенных изделий;
- утилизация отходов пенополистирола (ППС);
- утилизация смешанных отходов.

Сильно загрязненные промышленные отходы образуются в производстве ПС и полистирольных пластиков при чистке реакторов, экстракторов и технологических линий в виде кусков различной величины и формы [68]. Эти отходы вследствие загрязненности, неоднородности и низкого качества в основном уничтожают путем сжигания. Возможна их утилизация деструкцией, с использованием получаемых жидких продуктов в качестве топлива.

Технологические отходы ПС (так же, как и ПО) по своим физико-механическим и технологическим свойствам не отличаются от первичного сырья. Эти отходы являются возвратными и в основном используются на тех предприятиях, где они образуются. Их можно добавлять к первичному ПС или использовать в качестве самостоятельного сырья при производстве различных изделий [69].

Значительно более сложная ситуация наблюдается в области утилизации изношенных изделий из ПС, в том числе вспененных пластиков. За рубежом основными путями их утилизации являются пиролиз, сжигание, фото- или биоразложение, захоронение. Амортизированные изделия культурно-бытового назначения, а также промышленности полимерных строительных, теплоизоляционных материалов и других можно подвергать повторной переработке в изделия. В основном это касается изделий из ударопрочного ПС.

Для превращения отходов полистирольных пленок во вторичное полимерное сырье их подвергают агломерированию в роторных агломераторах. Низкое значение ударной вязкости ПС обуславливает быстрое измельчение (по сравнению с другими термопластами). Однако высокая адгезионная способность ПС приводит, во-первых, к слипанию частиц материала и образованию крупных агломератов до того (80 °С), как материал становится пластичным (130 °С), и, во-вторых, к прилипанию материала к перерабатываемому оборудованию. Это значительно затрудняет агломерирование ПС по сравнению с ПЭ, ПП и ПВХ.

Отходы ППС можно растворять в стироле, а затем полимеризовать в смеси, содержащей измельченный каучук и другие добавки. Полученные таким способом сополимеры характеризуются достаточно высокой ударной прочностью.

В настоящее время перед перерабатывающей промышленностью стоит проблема переработки смешанных отходов пластмасс. В смешанных бытовых отходах термопластов содержится от 5 до 15 % изношенных изделий из ПС, который можно выделять флотацией. Имеется опыт переработки смешанных бытовых отходов пластмасс, содержащих 60 % ПЭ, 15...20 % ПС и 15 % ПВХ [70]. Технология переработки смешанных отходов включает сортировку, помол, промывку, сушку и гомогенизацию. Полученный из смешанных отходов вторичный ПС обладает высокими физико-механическими показателями, его можно в расплавленном состоянии добавлять в асфальт и битум. При этом снижается их стоимость, и прочностные характеристики возрастают, примерно, на 20 %.

Значительное место среди твердых полимерных отходов занимают отходы полиамидов (ПА), образующиеся в основном при производстве и переработке в изделия волокон (капрон и анид), а также вышедшие из употребления изделия. Так как ПА дорогостоящий материал, обладающий рядом ценных химических и физико-механических свойств, рациональное использование его отходов приобретает особую важность.

Основными направлениями переработки и использования отходов ПА можно назвать измельчение; термоформование из расплава; депо-

лимеризацию с целью получения мономеров, пригодных для производства волокна и олигомеров с последующим их использованием в производстве клеев, лаков и других продуктов; переосаждение из раствора с получением порошков для нанесения покрытий; различные методы модификации и текстильную обработку с получением материалов волокнистой структуры [9, 71 – 73].

Переработка лавсановых волокон и изношенных изделий из ПЭТФ аналогична вторичной переработке полиамидных отходов.

За более чем 10 лет массового потребления в России напитков в упаковке из ПЭТФ на полигонах твердых бытовых отходов накопилось по некоторым оценкам более 2 млн. т использованной пластиковой тары, являющейся ценным химическим сырьем.

Существует несколько методов переработки использованных бутылок. Одной из интересных методик является глубокая химическая переработка вторичного ПЭТФ с получением диметилтерефталата в процессе метанолиза или терефталевой кислоты и этиленгликоля в ряде гидролитических процессов. Однако такие способы переработки имеют существенный недостаток – дороговизна процесса деполимеризации. Поэтому в настоящее время чаще применяются довольно известные и распространенные механохимические способы переработки, в процессе которых конечные изделия формируются из расплава полимера. Разработан значительный ассортиментный ряд изделий, получаемых из вторичного бутылочного полиэтилентерефталата. Основным крупнотоннажным производством является получение лавсановых волокон (в основном штапельных), производство синтепонов и нетканых материалов. Большой сегмент рынка занимает экструзия листов для термомоформования на экструдерах с листовальными головками, и, наконец, наиболее перспективным способом переработки повсеместно признано получение гранулята, пригодного для контакта с пищевыми продуктами, т.е. получение материала для повторной отливки преформ.

Бутылочный полупродукт может быть использован в технических целях: в процессе переработки в изделия вторичный ПЭТФ можно добавлять в первичный материал; компаундирование – вторичный ПЭТФ можно сплавлять с другими пластиками (например, с поликарбонатом, с ВПЭ [74]) и наполнять волокнами для производства деталей технического назначения; получение красителей (суперконцентратов) для производства окрашенных пластиковых изделий.

В любом случае исходным сырьем для деполимеризации или переработки в изделия являются не бутылочные отходы, которые могли пролежать какое-то время на свалке, и представляющие собой бесформенные сильно загрязненные объекты, а чистые хлопья ПЭТФ.

Процесс переработки бутылок в чистые хлопья ПЭТФ рассмотрен в работе [75].

Перспективным способом вторичной переработки ПЭТФ является производство бутылок из бутылок.

Главными стадиями классического процесса рециклинга для реализации схемы «бутылка к бутылке» являются: сбор и сортировка вторичного сырья, пакетирование вторичного сырья, измельчение и промывка, выделение дробленки, экструзия с получением гранул, обработка гранул в шнековом аппарате с целью увеличения вязкости продукта и обеспечения стерилизации продукта для возможности прямого контакта с пищевыми продуктами [76]. Но для реализации этого процесса необходимы серьезные капитальные вложения, так как невозможно проведение данного процесса на стандартном оборудовании.

#### **1.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Эффективным решением проблемы переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов может стать технология, разработанная на кафедре «Переработка полимеров и упаковочное производство» Тамбовского государственного технического университета.

Целью работы является разработка валкового оборудования и технологии процесса непрерывной переработки отходов пленочных термопластов.

В данной работе исследовался непрерывный процесс переработки отходов пленочных термопластов на валковой установке с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров.

В соответствии с этим в работе решались следующие задачи:

- анализ современного состояния утилизации и вторичной переработки отходов полимерных материалов;
- рассмотрение существующих технологий переработки отходов пленочных термопластов;
- разработка технологического процесса и валкового оборудования непрерывного действия для вторичной переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов;
- создание экспериментальной валковой установки непрерывного действия по изучению процесса переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров;
- исследование влияния технологических параметров процесса вальцевания (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины фрикции, величины «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров оборудования (конструкции

отборочно-гранулирующего устройства, геометрических размеров фильеры) на свойства (показатель текучести расплава, предел прочности и относительное удлинение при разрыве) и производительность получаемого гранулята с целью выбора параметров управления;

– разработка математической модели и программного обеспечения для расчета суммарной величины сдвига характеризующей влияние различных технологических и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого гранулята;

– разработка методики инженерного расчета основных параметров непрерывного процесса вальцевания и конструкции валковых пластикаторов-грануляторов непрерывного действия с учетом заданного качества получаемого гранулята.

Из анализа ситуации, сложившейся в области переработки отходов полимерных материалов, можно сделать следующие выводы:

1. Существующие методы вторичной переработки отходов полимерных материалов имеют значительные недостатки, в частности, захоронение и сжигание приводят к загрязнению окружающей среды и сокращению земельных угодий, термические методы и создание био-разрушаемых полимеров требуют больших финансовых затрат, сложны технологически.

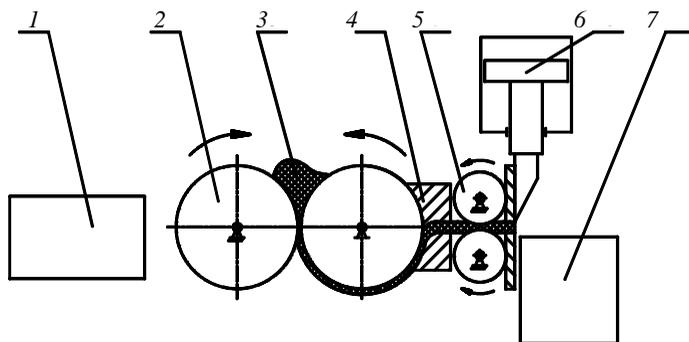
2. Имеющаяся технология переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов, включающая в себя: сортировку отходов, их измельчение, промывку, сушку и гранулирование требует значительных затрат электроэнергии, трудовых затрат, увеличение производственных площадей, что приводит к увеличению себестоимости получаемого гранулята.

3. Внедрение технологии переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов на валковом оборудовании непрерывного действия позволит снизить энергозатраты, трудовые затраты, сократить производственные площади, что приведет к уменьшению себестоимости получаемого гранулята.

## 2. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

### 2.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО НЕПРЕРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Разработанный технологический процесс (рис. 2.1) вторичной переработки пленочных 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 3 непрерывно загружаются через загрузочный бункер, с левой стороны валцов, на рабочие поверхности валков 2. На валцах происходит плавление отходов, удаление летучих компонентов, пластикация, возможно модифицирование различными добавками и окрашивание расплава. Для гранулирования вальцуемого материала расплав полимера продавливается через отборочно-гранулирующее устройство 4 установленное с правой стороны валцов на рабочие поверхности валков, с образованием прутков (стренгов) заданного поперечного сечения. Полученные стренги сохраняют свой размер за счет установки тянущего устройства 5, далее они режутся ножом 6, после чего полученные гранулы собираются в емкости 7.



**Рис. 2.1. Схема технологического процесса вторичной переработки пленочных отходов термопластов:**

- 1 – участок сортировки отходов; 2 – валцы; 3 – отходы полимеров;
- 4 – отборочно-гранулирующее устройство; 5 – тянущее устройство;
- 6 – нож; 7 – емкость для гранул

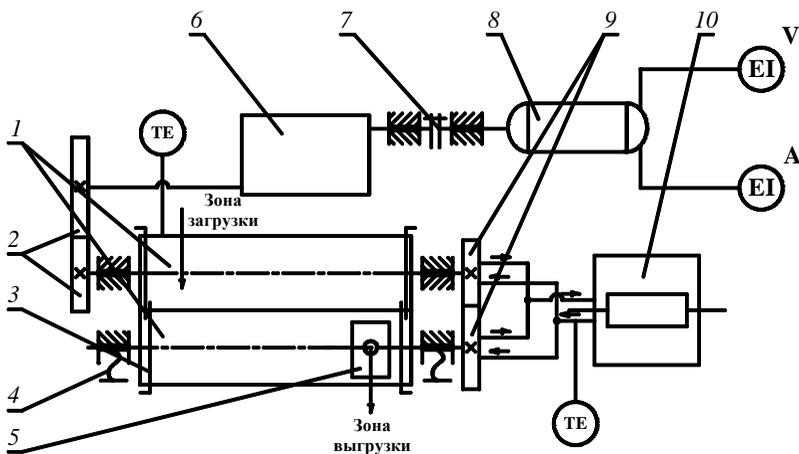
По данной технологии могут перерабатываться не только пленочные отходы термопластов производственного и общественного потребления, но и различные технологические отходы термопластов [77 – 82].

## 2.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для осуществления разработанного технологического процесса вторичной переработки отходов полимерных материалов была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (ЭУ) на базе вальцов СМ 200 80/80 (рис. 2.2).

Экспериментальная установка представляет собой вальцы с полыми валками 1 диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм. Валки расположены в горизонтальной плоскости и вращаются навстречу друг другу. Регулировка частоты вращения валков осуществляется реостатным способом. Валки вальцов смонтированы в подшипниках скольжения и установлены в корпусах на станинах. Передача вращающего момента осуществляется от вала электродвигателя постоянного тока 8 типа 4ПБМ160МГМ04 через редуктор 6, передаточные 2 и фрикционные шестерни 9 [83].

Число оборотов валков: задний валок 0...40,8 об/мин; передний валок 0...30 об/мин; фрикция между валками 1:1; 1:1,2; 1:1,36.



**Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – валки вальцов; 2 – передаточные шестерни; 3 – стрелы ограничительные;  
 4 – механизм регулировки зазора; 5 – отборочно-гранулирующее устройство;  
 6 – редуктор; 7 – муфта; 8 – электродвигатель; 9 – фрикционные шестерни;  
 10 – термостат; ТЕ – термодатчики; А – амперметр; V – вольтметр

Приводные и фрикционные шестерни заключены в кожухи, нижняя часть которых представляет собой масляные ванны для смазки пар. Каждая из двух станин сверху стянута поперечиной и установлена на фундаментной плите. Корпуса подшипников заднего вала закреплены в станинах неподвижно. Корпуса подшипников переднего вала установлены так, что имеют возможность перемещаться в станинах с целью регулировки зазора между валками 1 (рис. 2.2). Механизм регулировки зазора 4 позволяет перемещать подшипники переднего вала по направляющим станины и фиксировать их в заданном положении. Регулировка зазора производится при помощи пары винт–гайка, расположенных по обе стороны переднего (рабочего) вала. На каждой из станин вальцов, со стороны рабочего вала, имеются указатели величины зазора для устранения перекоса валков. Механизм регулировки зазора снабжен предохранительным устройством. При переработке отходов полимеров выставленная величина зазора проверялась прокатыванием между валками с левой и правой стороны свинцовых полос и измерением ее толщины ручным калиброммером с точностью до  $\pm 0,05$  мм. Для поддержания заданного температурного режима вторичной переработки отходов полимерных материалов валки вальцов снабжены устройствами для подвода теплоносителя. Подогрев теплоносителя осуществляется в термостате 10 типа ТС-16.

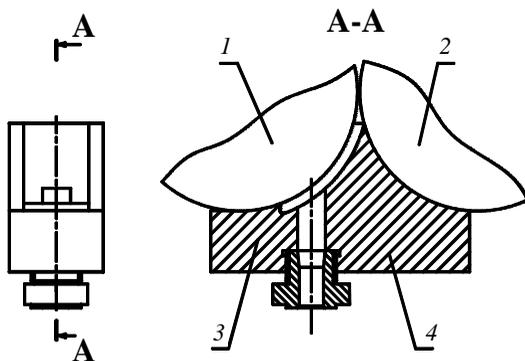
Замер температуры поверхности валков производился с применением лучковой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 до и после опыта. Измерение температуры вальцуемого материала осуществлялось посредством игольчатой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 в процессе всего опыта.

С целью предотвращения попадания обрабатываемого материала в подшипники валков установлены стрелы ограничительные 3. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала достигается установкой на вальцах аварийного устройства. В экспериментальной установке применено электродинамическое торможение. Для смазки поверхностей трущихся пар вальцы снабжены системой смазки. Для обеспечения непрерывной переработки отходов вальцы снабжены загрузочным бункером и отборочно-гранулирующим устройством 5. Отборочно-гранулирующее устройство выполнено двух различных видов.

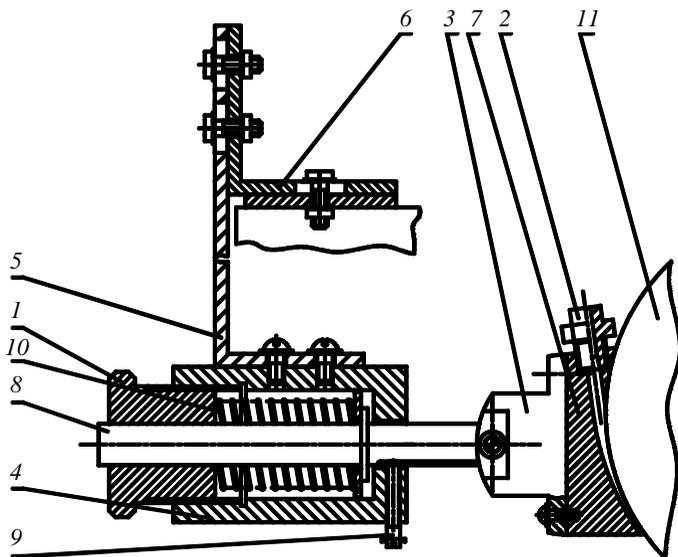
Нижнее отборочно-гранулирующее устройство показано на рис. 2.3.

Расплав полимера из зазора между валками поступает в канал плоскощелевого типа между передним валком 1 и башмаком 4 отборочно-гранулирующего устройства, далее расплав продавливается через канал башмака круглого сечения, и окончательное оформление заданного поперечного сечения стренга осуществляется в сменной фильере 2. Фильеры выполнены диаметром 4, 5, 6 мм.

Боковое отборочно-гранулирующее устройство показано на рис. 2.4.



**Рис. 2.3. Нижнее отборочно-гранулирующее устройство:**  
 1 – передний валок; 2 – задний валок; 3 – фильера; 4 – башмак



**Рис. 2.4. Боковое отборочно-гранулирующее устройство:**  
 1 – крышка; 2 – фильера сменная; 3 – опорная пята; 4 – стакан;  
 5, 6 – уголок; 7 – экструзионная приставка; 8 – шток;  
 9 – винт; 10 – пружина; 11 – передний валок

Крышка, шток и демпфирующая пружина обеспечивают необходимую давление прижима экструзионной приставки к поверхности валка.

Экспериментальная установка оснащена датчиками и приборами для измерения мощности расходуемой на процесс вальцевания и дат-

чиками для измерения температуры вальцуемой смеси и поверхности валков. На щите расположены вольтметр – для измерения напряжения; амперметр – для измерения тока нагрузки двигателя.

Измерение потребляемой мощности ЭУ проводили с помощью вольтамперной характеристики [84]:

$$N = I_n U, \quad (2.1)$$

где  $N$  – мощность, расходуемая на процесс вальцевания, Вт;  $I_n$  – ток нагрузки двигателя;  $U$  – напряжение двигателя, В.

### 2.3. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Для того чтобы обеспечить заданную производительность процесса необходимо определить, при каких геометрических размерах каналов отборочно-гранулирующего устройства, выполняется неравенство

$$P_{вх} \geq \Delta P_{вхк} + \Delta P_k + \Delta P_{вхф} + \Delta P_\phi, \quad (2.2)$$

где  $P_{вх}$  – давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство;  $\Delta P_{вхк}$  – перепад давления на входе в канал круглой формы;  $\Delta P_k$  – перепад давления в канале круглой формы;  $\Delta P_{вхф}$  – перепад давления на входе в канал фильеры;  $\Delta P_\phi$  – перепад давления в канале фильеры.

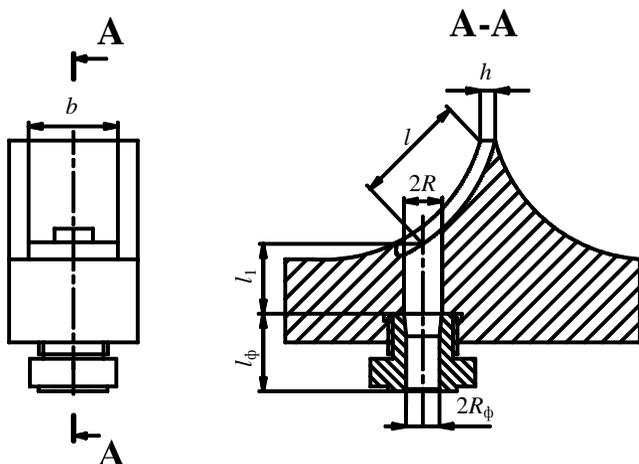


Рис. 2.5. К расчету геометрических размеров отборочно-гранулирующего устройства

**1. Определение давления на входе в отборочно-гранулирующее устройство.** Расчет ведем как для процесса экструзии. Считаем, что плоскощелевой канал, образованный рабочей поверхностью переднего валка и поверхностью отборочно-гранулирующего устройства, есть не что иное как экструдер, где поверхность отборочно-гранулирующего устройства является разверткой поверхности впадин нарезки червяка, а поверхность валка движется относительно поверхности отборочно-гранулирующего устройства, как развертка поверхности цилиндра экструдера. Объем жидкости, протекающей в единицу времени через участок шириной  $b$  сечения потока, определяется интегрированием произведения скорости на площадь экспериментального участка  $F$  высотой  $dy$  [85]:

$$Q = \int_{-1}^1 \frac{bm\tau_{np}^n h^2}{n+1} F dy, \quad (2.3)$$

где  $n$  и  $m$  – реологические константы;  $\tau_{np}$  – предельное напряжение сдвига;  $h$  – высота канала.

$$F = \int_{-1}^1 (1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1} dy. \quad (2.4)$$

После интегрирования

$$F = \frac{(1+X)^{n+2} - (X-1)^{n+2}}{n+2} - 2(1-X)^{n+1}. \quad (2.5)$$

Скорость стенки канала (переднего валка) определяется по формуле

$$u = \frac{m\tau_{np}^n h}{n+1} \Phi, \quad (2.6)$$

где  $\Phi = (1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1}$ . (2.7)

Введем обозначения:

$$q = \frac{u}{m\tau_{np}^n h} = \frac{\Phi}{n+1} = \frac{(1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1}}{n+1}; \quad (2.8)$$

$$u_1 = \frac{Q}{bm\tau_{np}^n h^2} = \frac{(1+X)^{n+2} - (X-1)^{n+2} - 2(n+2)(1-X)^{n+1}}{(n+1)(n+2)}; \quad (2.9)$$

$$\bar{u} = \frac{u_1}{q} = \frac{Q}{bhu} = \frac{(1+X)^{n+2} - (X-1)^{n+2} - 2(n+2)(1-X)^{n+1}}{(n+2)((1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1})}. \quad (2.10)$$

Давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство, определяется по формуле [85]:

$$P_{\text{вх}} = \frac{\tau_{\text{пр}} l}{h}, \quad (2.11)$$

где  $l$  – длина канала.

Для определения  $\tau_{\text{пр}}$  необходимо знать  $X$ . Задавая значение  $X$  и подставляя его в формулу (2.10), получим  $\bar{u}$ . С другой стороны, при заданной производительности  $Q$  значение  $\bar{u}$  является постоянной величиной и определяется по формуле

$$\bar{u} = \frac{Q}{bhu}, \quad (2.12)$$

где  $u$  – скорость вращения переднего вала.

Построив графическую зависимость  $\bar{u} = f(X)$ , найдем  $X$ , при котором значение  $\bar{u}$  как функции от  $X$  будет равняться значению  $\bar{u}$ , найденному по формуле (2.12).

Найденное значение  $X$  подставляем в выражение (2.8) и находим  $q$ .

Из уравнения (2.8) получим формулу для определения  $\tau_{\text{пр}}$ :

$$\tau_{\text{пр}}^n = \left[ \frac{u}{mqh} \right]^{1/n}. \quad (2.13)$$

Подставляя значение  $\tau_{\text{пр}}$  в выражение (2.11), находим давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство.

## 2. Определение перепада давления на входе в канал круглой формы.

Перепад давления на входе в канал круглой формы определяется по формуле [86]:

$$\Delta P_{\text{вхк}} = \left[ \frac{Q(n+3)}{\pi R^3 m} \right]^{1/n} \frac{S}{n+3}, \quad (2.14)$$

где  $Q$  – заданная производительность;  $n$  и  $m$  – реологические константы;  $R$  – радиус канала круглой формы;  $S$  – постоянная величина.

**3. Определение перепада давления в канале круглой формы.** Перепад давления в канале круглой формы определяется по формуле [86]:

$$\Delta P_{\text{к}} = \left[ \frac{Q(n+3)}{\pi R^{(n+3)} m} \right]^{1/n} 2l_1, \quad (2.15)$$

где  $l_1$  – длина канала круглой формы.

**4. Определение перепада давления на входе в канал фильеры.** Поскольку канал фильеры имеет круглую форму, то перепад давления на входе в канал фильеры определяется по формуле [87]:

$$\Delta P_{\text{вхф}} = \left[ \frac{Q(n+3)}{\pi R_{\text{ф}}^3 m} \right]^{1/n} \frac{S}{n+3}, \quad (2.16)$$

где  $Q$  – заданная производительность;  $n$  и  $m$  – реологические константы;  $R_{\text{ф}}$  – радиус канала фильеры,  $S$  – постоянная величина.

**5. Определение перепада давления в канале фильеры.** Перепад давления в канале фильеры определяется по формуле [87]:

$$\Delta P_{\text{ф}} = \left[ \frac{Q(n+3)}{\pi R_{\text{ф}}^{(n+3)} m} \right]^{1/n} 2l_{\text{ф}}, \quad (2.17)$$

где  $l_{\text{ф}}$  – длина канала фильеры.

Если давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство  $P_{\text{вх}}$ , получится меньше суммы перепадов давлений  $\Delta P_{\text{вхк}}$ ,  $\Delta P_{\text{к}}$ ,  $\Delta P_{\text{вхф}}$ ,  $\Delta P_{\text{ф}}$ , то необходимо изменить геометрические размеры каналов и повторить расчет.

## 2.4. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования принят непрерывный процесс вальцевания пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления, а также первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020 на ЭУ. Пленочные отходы ПЭНП производственного и общественного потребления выбраны для исследования в связи с тем, что они составляют 30 % от всего объема пленочных отходов термопластов (табл. 2.1, 2.2).

**2.1. Свойства первичного ПЭНП  
(марка 15803-020, натуральный, сорт – высший)**

Наименование показателя	Значение
1. Размер гранул, мм	2...5
2. Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,919 ± 0,01
3. Показатель текучести расплава с доп. в %, $I$ , г/10 мин	1,8 ± 6
4. Предел текучести при растяжении $\sigma_t$ , Па (кГс/см <sup>2</sup> )	93·105 (95)
5. Прочность при разрыве $\sigma_p$ , Па (кГс/см <sup>2</sup> )	150·105 (153)
6. Относительное удлинение при разрыве $\epsilon$ , %	780,5
7. Реологические свойства при температуре переработки ( $t = 130$ °С)	
– индекс течения $n$	0,2
– коэффициент консистенции $K$ , МПа·с	0,2

**2.2. Требования, предъявляемые к перерабатываемым пленочным отходам ПЭНП**

Наименование показателя	Значение
1. Допускаемое загрязнение, %, не более	3...5
2. Количество включений стекла, металла, резины, машинного масла	не допускается
3. Время эксплуатации и пребывания на свалке, лет, не более	3
4. Включения других термопластичных полимерных материалов, %, не более	2...3

В качестве объекта исследования также могут быть выбраны пленочные отходы ПЭВП и ПП производственного и общественного потребления, так как они сходны с отходами ПЭНП по технологическим и физико-механическим свойствам.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛЬЦАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

---

Целью экспериментальной работы является исследование влияния различных технологических параметров процесса вальцевания (величины минимального зазора между валками, величины фрикции, частоты вращения валков, величины «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров оборудования (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, геометрических размеров фильеры) на свойства и производительность получаемого гранулята с целью выбора параметров управления.

#### **3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОЧНЫХ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ**

Реологические свойства пленочных отходов полиэтилена низкой плотности определяли методом капиллярной вискозиметрии.

Для определения реологических констант:  $K$  – коэффициента консистентности и  $n$  – индекса течения, который указывает на степень отклонения течения исследуемой жидкости от ньютоновского течения, использовали грузовой капиллярный вискозиметр ИИРТ-М, который соответствует ГОСТ 11645–73. В зависимости от вида исследуемого полимера в соответствии с ГОСТ был выбран длинный капилляр длиной 30 мм и короткий капилляр длиной 20 мм, диаметр обоих капилляров равен 2 мм. В зависимости от температуры переработки выбрали температуру испытания 130 °С, использовали грузы массой 3, 5 – 8, 10 и 17,95 кг. Перед испытаниями вискозиметр прогревали в течение одного часа. После этого устанавливали в камеру прибора длинный капилляр, заполняли камеру гранулами и вводили в нее поршень с грузом 3,8 кг. Устанавливали ножку индикатора часового типа так, чтобы она касалась поверхности грузов. Через 10 мин (время прогрева термопласта) освобождали груз, под действием которого полимер начал продавливаться через капилляр. С помощью секундомера засекали время, за которой стрелка индикатора делает 10 оборотов, что соответствует ходу поршня 10 мм. После этого устанавливали следующий груз массой 5 кг и проводили измерения в той же последовательности как для груза массой 3,8 кг, и так для всех грузов. Далее заменяли длинный капилляр коротким, и проводили на коротком капилляре те же измерения, что и на длинном для всех грузов.

После этого проводили обработку экспериментальных данных и определяли реологические константы  $K$  и  $n$  по методике, включающей в себя:

1. Расчет давления под поршнем  $P_n$  ( $\text{Н/м}^2$ ) по формуле

$$P_n = \frac{4mg}{\pi D^2}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – масса груза, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $D$  – диаметр поршня, равный  $9,54 \cdot 10^{-3}$  м.

2. Расчет объемного секундного расхода  $Q_v$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) по формуле

$$Q_v = \frac{\pi D^2 h_n}{4t_n}, \quad (3.2)$$

где  $h_n$  – путь, пройденный поршнем за время работы секундомера,  $h_n = 1 \cdot 10^{-2}$  м;  $t_n$  – время, регистрируемое секундомером, с.

3. Построение графической зависимости  $Q_v$  от  $P_n$  для короткого и длинного капилляров.

4. Определение для четырех значений  $Q_v$  величин  $\Delta P_n$ , соответствующих длине короткого и длинного капилляров и построение графика зависимости  $Q_v$  от  $\Delta P_n$ .

5. Расчет напряжения сдвига на стенке капилляра  $\sigma_R$  по формуле

$$\sigma_R = R_k \frac{P_{n2} - P_{n1}}{2(l_{k2} - l_{k1})} = R_k \frac{\Delta P_n}{2l_k}, \quad (3.3)$$

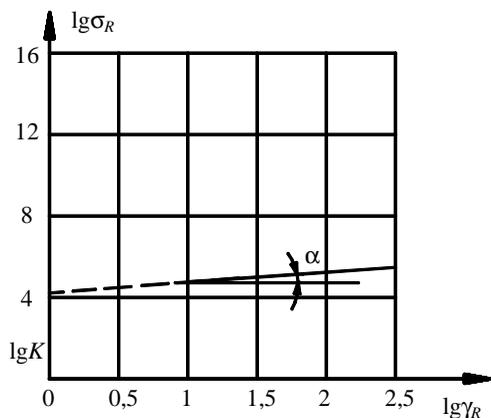
где  $R_k$  – радиус капилляра, м;  $P_{n1}$  и  $P_{n2}$  – перепады давлений, соответственно, в коротком и длинном капиллярах при равных расходах,  $\text{Н/м}^2$ ;  $l_{k1}$  и  $l_{k2}$  – длины соответственно короткого и длинного капилляров, м.

6. Расчет истинной скорости сдвига  $\gamma_R$  на стенке капилляра, исходя из уравнения Рабиновича по формуле

$$\gamma_R = \frac{1}{\pi R^3} \left( 3Q_v + \Delta P_n \frac{dQ_v}{d\Delta P_n} \right), \quad (3.4)$$

где величина  $dQ_v/d\Delta P_n$  находится графическим дифференцированием зависимости  $Q_v$  от  $\Delta P_n$ . Величина  $dQ_v/d\Delta P_n$  представляет собой тангенс угла наклона касательных к графику  $Q_v$  от  $\Delta P_n$  в точках  $Q_{v1} - Q_{v5}$ .

7. Построение кривой течения в координатах  $\lg \sigma_R - \lg \gamma_R$  (рис. 3.1) и вычисление значений реологических констант  $K$  и  $n$ .



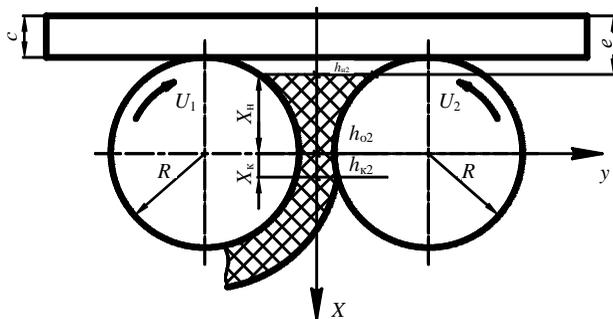
**Рис. 3.1. Зависимость напряжения сдвига  $\sigma_R$  от скорости сдвига  $\gamma_R$  в логарифмических координатах**

Величина  $\lg K$  определяется как отрезок, отсекаемый на оси ординат при  $\lg \gamma_R = 0$ . Величина  $n$  определяется как тангенс угла наклона к кривой течения.

В результате расчета были найдены реологические свойства плечочных отходов полиэтилена низкой плотности производственного и общественного потребления:  $n = 0,22$ ;  $K = 0,11$  МПа·с.

### **3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КООРДИНАТ СЕЧЕНИЯ ВХОДА $X_n$ И ВЫХОДА $X_k$**

Измерение координаты сечения входа  $x_n$  производили следующим образом. После выхода на заданный, установившийся режим вальцевания вальцы останавливали и проводили измерение величин  $c$  и  $e$ , показанных на рис. 3.2.



**Рис. 3.2. Определение координаты сечения входа  $x_n$**

Величина координаты сечения входа  $x_n$  определяется следующим образом:

$$x_n = R + c - e. \quad (3.5)$$

Величина безразмерной координаты сечения входа  $X_n$  определяется по формуле [88]:

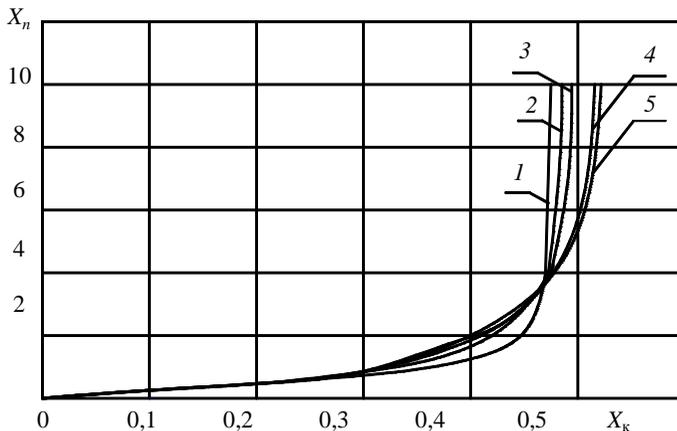
$$X_n = \frac{x_n}{\sqrt{2Rh_{02}}}. \quad (3.6)$$

Между безразмерными координатами входа  $X_n$  и выхода  $X_k$  существует связь, данная в работе [88]:

$$\int_{X_n}^{X_k} \frac{(X_k^2 - X^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} - \int_{X_k}^{-X_k} \frac{(X - X_k^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} = 0. \quad (3.7)$$

Решая это интегральное уравнение численными методами, находим при каждом значении индекса течения  $n$  безразмерную координату сечения входа  $X_n$ , которой соответствует единственное значение безразмерной координаты сечения выхода  $X_k$ . На рисунке 3.3 дана зависимость  $X_k$  от  $X_n$  при различных значениях  $n$ .

Для определения оптимального объема материала на валках необходимо знать, при какой величине безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки  $X_{nn}$  величина удельной мощности  $P$ ,



**Рис. 3.3.** Зависимость безразмерной координаты сечения выхода  $X_k$  от безразмерной координаты сечения входа  $X_n$  при различных значениях  $n$ :  
 $1 - n = 1$ ;  $2 - n = 0,5$ ;  $3 - n = 0,38$ ;  $4 - n = 0,2$ ;  $5 - n = 0,125$

характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал будет максимальной. Удельная мощность  $P$  рассчитывается по формулам [89, 90]:

$$P = \frac{N_n}{V} = \mu \left( \frac{U_1}{h_{02}} \right)^{n+1} \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n F_0 \left( X_k, n, \frac{R}{h_{02}} \right), \quad (3.8)$$

где  $N_n$  – технологическая мощность, расходуемая на деформацию обрабатываемого материала в зазоре валков вальцов, работающих по непрерывному режиму, кВт;  $V$  – величина объема материала, находящегося на валках вальцов, м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость материала, Па·с;  $U_1$  – частота вращения переднего валка, об/мин;  $h_{02}$  – половина величины минимального зазора между валками, м;  $R$  – радиус валка, м.

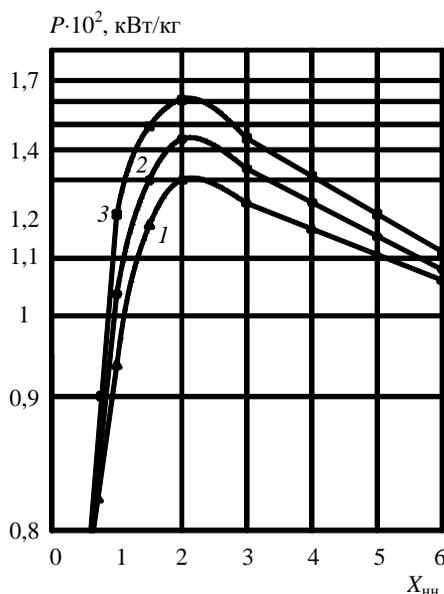
$$F_0 \left( X_k, n, \frac{R}{h_{02}} \right) = \frac{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \int_{X_k}^{X_H} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)^n}{(1+X^2)^{2n}} \Psi(X_k) dX dX_k}{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1+X_k^2) \left[ \frac{R}{h_{02}} + (1+X_k^2) \right] - \right.}, \quad (3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} & - (1+X_k^2)(X_k + X_H) + X_H + X_k + \\ & \left. + \frac{1}{3}(X_H^3 + X_k^3) \right\} \Psi(X_k) dX_k} \end{aligned}$$

где  $\Psi(X_k) = \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1+X_k^2)^2} \times$

$$\begin{aligned} & \times (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + \\ & + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ & - 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ & - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\ & + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Построены графические зависимости удельной мощности  $P$  от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки  $X_{\text{вн}}$  (для трех различных значений  $R/h_{02}$ ), показанные на рис. 3.4.



**Рис. 3.4.** Зависимость удельной мощности  $P$  от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки  $X_{нн}$  для трех различных значений  $R/h_{02}$  при  $n = 0,2$ :  
 1 –  $R/h_{02} = 80$ ; 2 –  $R/h_{02} = 53,3$ ; 3 –  $R/h_{02} = 40$

Анализ рис. 3.4 показывает наличие максимума в области  $X_{нн} = 2,1$ . Следовательно, существует такой оптимальный объем материала на валках, при котором работа, затрачиваемая на его деформацию, будет максимальной. Поэтому ведение непрерывного процесса вальцевания пленочных отходов термопластов с таким объемом загрузки будет наиболее рационально с точки зрения интенсивности механического воздействия на обрабатываемый материал.

### 3.3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовательская работа выполнена на описанной выше экспериментальной установке. На данной установке осуществляли изотермический режим непрерывного процесса вальцевания первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020, а также пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления. Переработку проводили при изменении в широком диапазоне частоты вращения валков, диаметра фильеры, величины минимального зазора между валками, величины фрикции.

Эксперименты проводили следующим образом: включали питание ЭУ; устанавливали заданный минимальный зазор между валками  $h_0$ ; монтировали отборочно-гранулирующее устройство с фильерой заданного диаметра  $d_f$ ; устанавливали фрикцию между валками  $f$ ; разогревали до заданной температуры поверхности валков; устанавливали частоту вращения переднего валка  $u = 5$  об/мин; непрерывно загружали с левой стороны вальцов первичный полиэтилен низкой плотности; вальцевали полиэтилен, проверяли точность зазора между валками и измеряли температуру расплава; после выхода на заданный, установившийся режим гранулирования регистрировали показания амперметра, вес полученных гранул за определенный промежуток времени с целью определения производительности; полученные гранулы собирали в емкости для последующего определения показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве. Затем валковую установку останавливали, и валки полностью очищали от материала. После этого устанавливали частоту вращения переднего валка  $u = 10$  об/мин и проводили действия такие же, как при  $u = 5$  об/мин. Такой же порядок действий при  $u = 15; 20; 25; 30$  об/мин.

Показатель текучести расплава гранул, полученных при непрерывном процессе вальцевания, определяли по следующей методике.

Для определения показателя текучести расплава использовали грузовой капиллярный вискозиметр ИИРТ-М, который соответствует ГОСТ 11645–73. В зависимости от вида исследуемого полимера в соответствии с ГОСТ выбрали капилляр диаметром 2 мм, температуру испытания 190 °С, груз массой 2,16 кг. Перед испытаниями вискозиметр прогревали в течение одного часа. После этого заполняли камеру прибора гранулами и вводили в нее поршень с грузом. Через 10 мин (время прогрева термопласта) освобождали груз, под действием которого полимер начинал продавливаться через капилляр. При истечении полимера через капилляр срезали прутки (до 10 шт.) за установленный промежуток времени – 60 с, который засекали по секундомеру. Прутки, которые содержали пузырьки воздуха, забраковывали. На аналитических весах определяли массу срезанных прутков с точностью до 0,001 г.

Показатель текучести расплава  $I$  (г/10 мин) определяли по формуле

$$I = 600m/t, \quad (3.11)$$

где  $m$  – масса прутка, г;  $t$  – время истечения прутка, с.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных определений для каждого эксперимента.

Предел текучести при растяжении, прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве гранул, полученных по непрерывному процессу вальцевания, определяли по следующей методике.

Гранулы закладывались в пресс-форму, которую устанавливали в пресс. Гранулы прессовали при температуре 160 °С при давлении 100 кГс/см<sup>2</sup> в течение 15 мин. Из полученных прессованием пластин вырубались образцы, показанные на рис. 3.5.

Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 11262–68. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, раковин и других дефектов. Образцов для каждого опыта было не менее пяти.

Испытания проводились на разрывной машине СМГИ-Ц-250. Скорость раздвижения захватов в испытательной машине 28 мм/мин. Перед испытанием измеряли толщину и ширину образцов в их рабочей части с точностью до 0,01 мм не менее чем в трех местах. Образцы, у которых результаты измерений толщины и ширины рабочей части различались больше, чем на 0,2 мм, заменялись другими.

Перед испытанием на образец наносили метки, ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Нанесение меток не должно приводить к изменению свойств образца и к его разрушению по меткам. Образец закрепляли в захваты разрывной машины по меткам, определяющим положение кромок захватов на образце, так, чтобы исключить его скольжение в процессе испытания; при этом разрушение его не должно происходить в месте закрепления. Продольная ось образца должна совпадать с осью захватов и направлением движения подвижного захвата (табл. 3.1).

В момент достижения предела текучести и разрушения измеряли нагрузку и удлинение. В расчет принимали результаты, полученные на образцах, разрушившихся в пределах рабочей части.

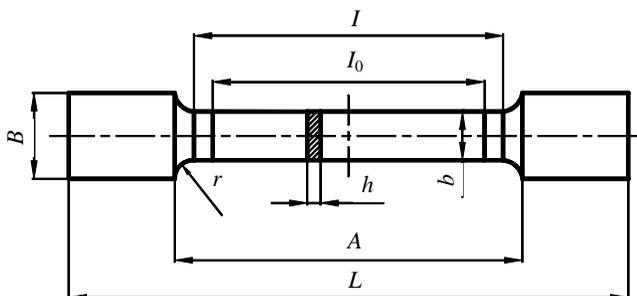


Рис. 3.5. Образец для испытания на растяжение

### 3.1. Размеры образцов для испытания на растяжение

Название размеров	Обозначение	Величина в мм
Общая длина	$L$	40
Ширина головки	$B$	7
Длина рабочей части	$l$	18
Ширина рабочей части	$b$	3,5
Размеры закруглений	$r$	3
Расстояние между метками	$A$	21
Толщина рабочей части	$h$	2
Начальная база образца	$l_0$	16

Предел текучести при растяжении  $\sigma_T$ , и прочность при разрыве  $\sigma_p$  вычисляли по формулам

$$\sigma_T = P_T/bh; \quad (3.12)$$

$$\sigma_p = P_p/bh, \quad (3.13)$$

где  $P_T$  – нагрузка в момент достижения предела текучести, кГс;  $P_p$  – нагрузка при которой образец разрушился, кГс;  $b$ ,  $h$  – ширина и толщина рабочей части образца, см.

Относительное удлинение при разрыве  $\epsilon$  вычисляли по формуле

$$E = \Delta l/l_0 \cdot 100, \quad (3.14)$$

где  $\Delta l$  – приращение образца при разрыве, мм.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных определений для каждого эксперимента.

### 3.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВОЙСТВ ГРАНУЛЯТА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЖНЕГО ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

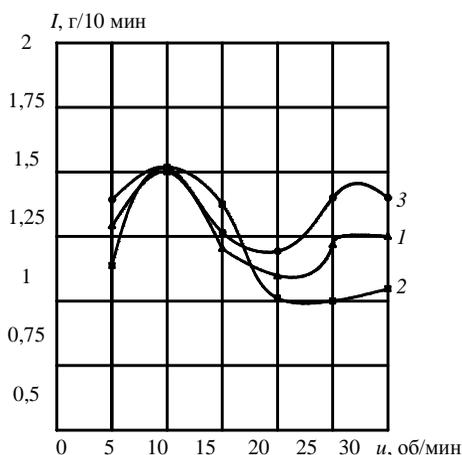
Первоначально проводили эксперименты по определению зависимости показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, предела прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от частоты вращения переднего валка при различных диаметрах фильеры, величине минимального зазора между валками, трения [91, 92]. Исследовали непрерывный процесс переработки на вальцах первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. Использовали нижнее отборочно-гранулирующее устройство (рис. 2.3).

По описанной выше методике проводили эксперименты при диаметрах фильеры  $d_{\phi} = 4$  мм,  $d_{\phi} = 5$  мм и  $d_{\phi} = 6$  мм; величинах минимального зазора между валками  $h_0 = 1$  мм,  $h_0 = 1,5$  мм и  $h_0 = 2$  мм; величинах фрикции между валками  $f = 1:1$ ;  $f = 1:1,2$  и  $f = 1:1,36$ .

После обработки экспериментальных данных были получены графические зависимости, показанные на рис. 3.6 – 3.14.

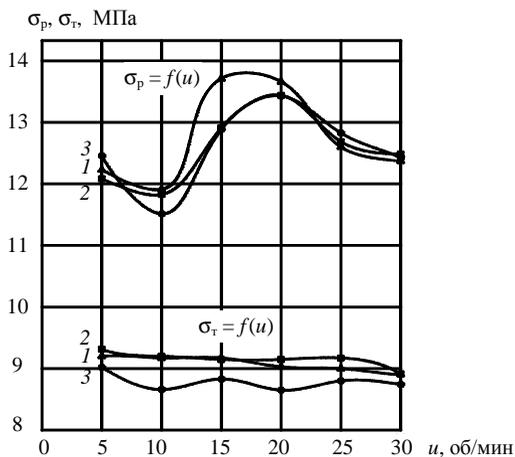
Анализ графических зависимостей (рис. 3.6 – 3.8) дает возможность сделать вывод, что изменение диаметра фильеры существенно не влияет на свойства получаемого гранулята, а поскольку максимальный размер гранул по ГОСТу должен быть не более 5 мм, то в дальнейших исследованиях используем фильеру с диаметром 5 мм. Изменения величины зазора между валками (рис. 3.9 – 3.11) и величины фрикции (рис. 3.12 – 3.14) также не оказывают существенного влияния на физико-механические показатели гранулята. Основным параметром, оказывающим влияние, является частота вращения валка.

Из графических зависимостей (рис. 3.6 – 3.14) видно, что наилучшие свойства переработанного первичного полиэтилена достигаются при частоте вращения переднего валка  $u = 20$  об/мин, диаметре фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм, величине минимального зазора между валками  $h_0 = 1,5$  мм, величине фрикции  $f = 1:1,2$ .

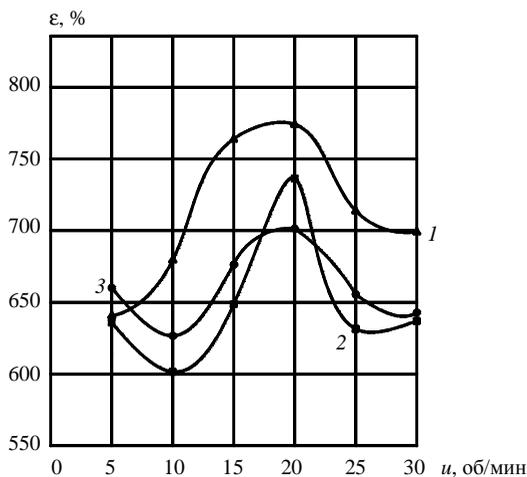


**Рис. 3.6. Зависимость показателя текучести расплава полимера  $I$  от частоты вращения  $u$  при различной величине диаметра фильеры (ниже отборочно-гранулирующее устройство; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):**

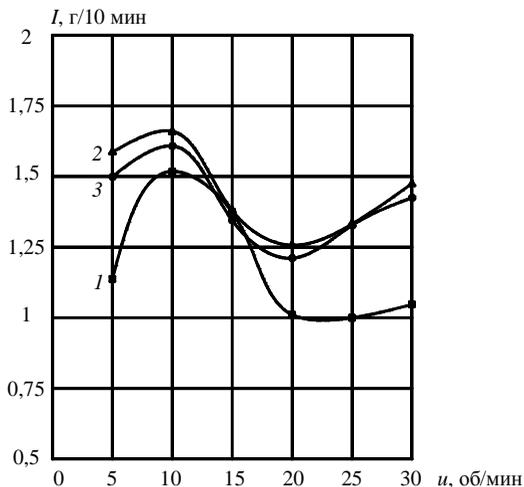
$1 - d_{\phi} = 4$  мм;  $2 - d_{\phi} = 5$  мм;  $3 - d_{\phi} = 6$  мм



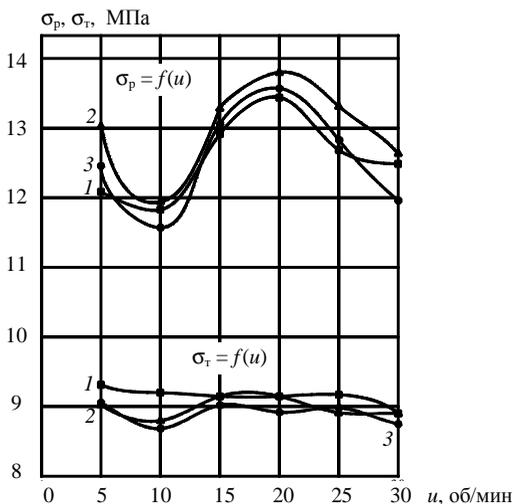
**Рис. 3.7.** Зависимость предела прочности при разрыве  $\sigma_p$  и предела текучести  $\sigma_r$  при растяжении от частоты вращения  $u$  при различной величине диаметра фильеры (нижнее отборочно-гранулирующее устройство; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1$  мм; величина фрикции  $f = 1; 1,2$ ):  
 1 –  $d_\phi = 4$  мм; 2 –  $d_\phi = 5$  мм; 3 –  $d_\phi = 6$  мм



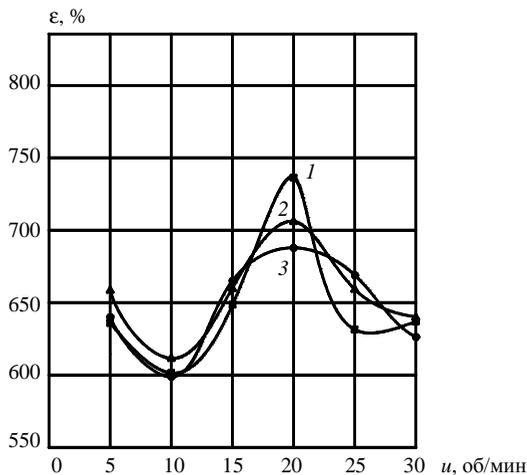
**Рис. 3.8.** Зависимость относительного удлинения при разрыве  $\epsilon$  от частоты вращения  $u$  при различной величине диаметра фильеры (нижнее отборочно-гранулирующее устройство; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1$  мм; величина фрикции  $f = 1; 1,2$ ):  
 1 –  $d_\phi = 4$  мм; 2 –  $d_\phi = 5$  мм; 3 –  $d_\phi = 6$  мм



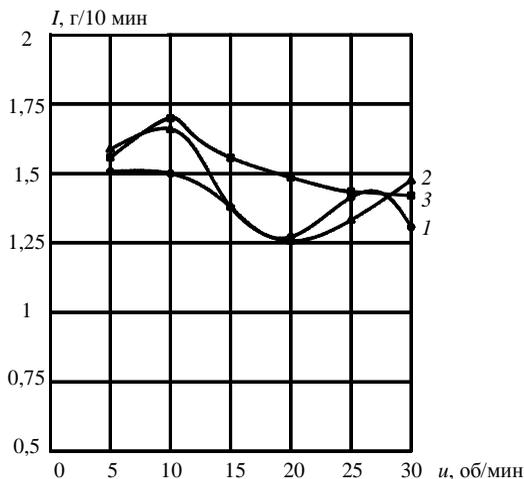
**Рис. 3.9. Зависимость показателя текучести расплава полимера  $I$  от частоты вращения  $u$  при различной величине минимального зазора между валками**  
 (нижнее отборочно-гранулирующее устройство;  
 диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):  
 $1 - h_0 = 1$  мм;  $2 - h_0 = 1,5$  мм;  $3 - h_0 = 2$  мм



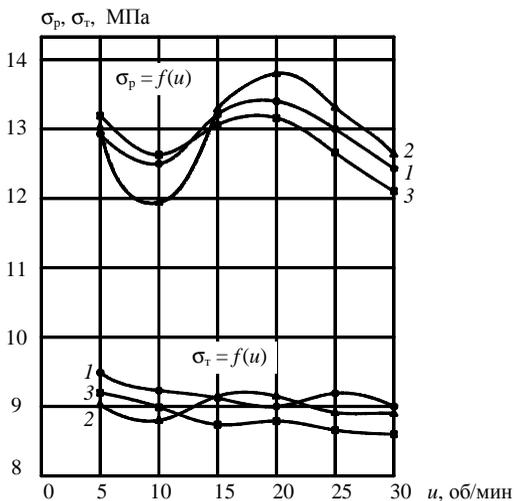
**Рис. 3.10. Зависимость предела прочности при разрыве  $\sigma_p$  и предела текучести  $\sigma_t$  при растяжении от частоты вращения  $u$  при различной величине минимального зазора между валками**  
 (нижнее отборочно-гранулирующее устройство;  
 диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):  
 $1 - h_0 = 1$  мм;  $2 - h_0 = 1,5$  мм;  $3 - h_0 = 2$  мм



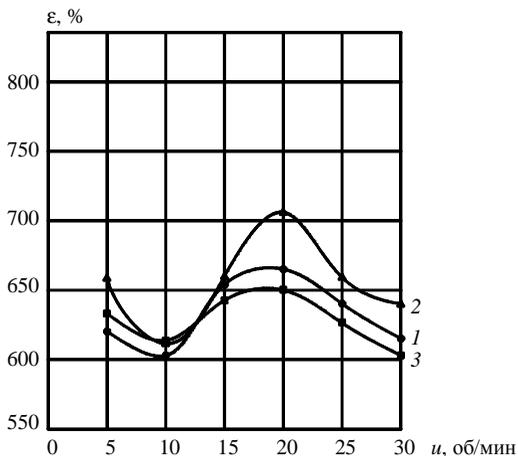
**Рис. 3.11. Зависимость относительного удлинения при разрыве  $\epsilon$  от частоты вращения  $u$  при различной величине минимального зазора между валками**  
 (нижнее отборочно-гранулирующее устройство;  
 диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):  
 $1 - h_0 = 1$  мм;  $2 - h_0 = 1,5$  мм;  $3 - h_0 = 2$  мм



**Рис. 3.12. Зависимость показателя текучести расплава полимера  $I$  от частоты вращения  $u$  при различной величине фрикции**  
 (нижнее отборочно-гранулирующее устройство;  
 диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм):  
 $1 - f = 1:1$ ;  $2 - f = 1:1,2$ ;  $3 - f = 1:1,36$



**Рис. 3.13.** Зависимость предела прочности при разрыве  $\sigma_p$  и предела текучести  $\sigma_r$  при растяжении от частоты вращения  $u$  при различной величине фрикции (нижнее отборочно-гранулирующее устройство; диаметр фильеры  $d_\phi = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм):  
 $1 - f = 1:1$ ;  $2 - f = 1:1,2$ ;  $3 - f = 1:1,36$



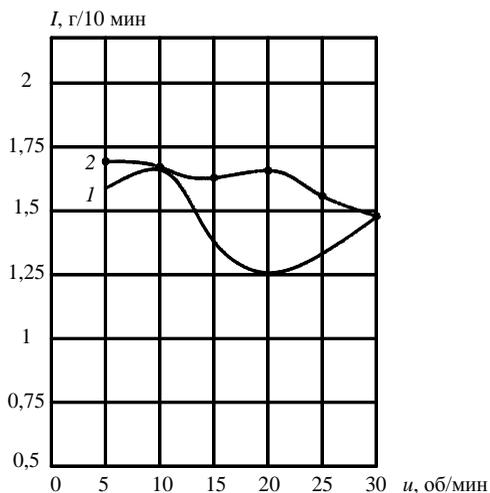
**Рис. 3.14.** Зависимость относительного удлинения при разрыве  $\epsilon$  от частоты вращения  $u$  при различной величине фрикции (нижнее отборочно-гранулирующее устройство; диаметр фильеры  $d_\phi = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм):  
 $f = 1:1$ ;  $2 - f = 1:1,2$ ;  $3 - f = 1:1,36$

### 3.5. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВОЙСТВ ГРАНУЛЯТА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БОКОВОГО ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Проведены эксперименты по определению зависимости показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от частоты вращения переднего валка при различных диаметрах фильеры, величине минимального зазора между валками, фрикции. Исследовали непрерывный процесс переработки на вальцах первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. Использовали боковое отборочно-гранулирующее устройство (рис. 2.4).

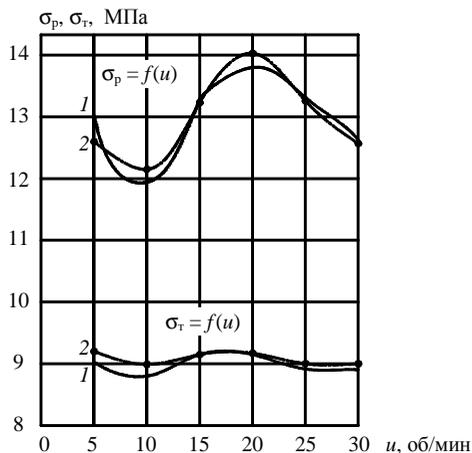
Эксперименты проводили в такой же последовательности, как при использовании нижнего отборочно-гранулирующего устройства.

После обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости (рис. 3.15 – 3.19), на которых приводится сравнение свойств переработанного полиэтилена, производительности процесса, удельной мощности, затрачиваемой на 1 кг продукции при использовании нижнего и бокового отборочно-гранулирующих устройств.

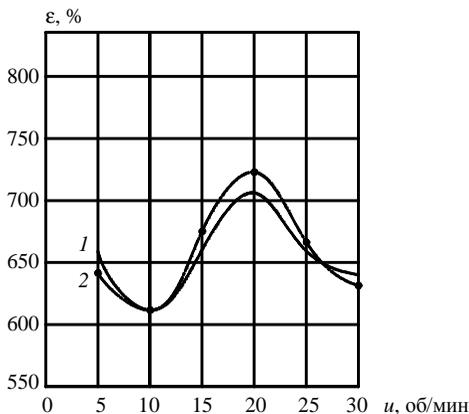


**Рис. 3.15.** Зависимость показателя текучести расплава полимера  $I$  от частоты вращения  $u$  при использовании нижнего (1) и бокового (2) отборочно-гранулирующих устройств

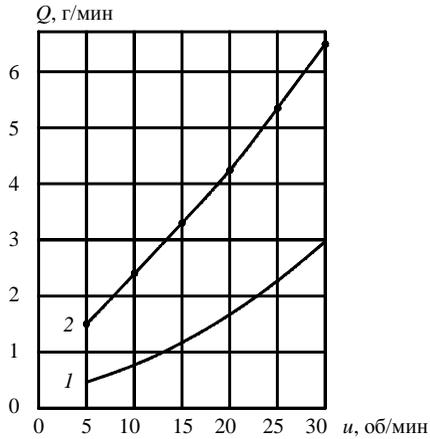
(диаметр фильеры  $d_f = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ )



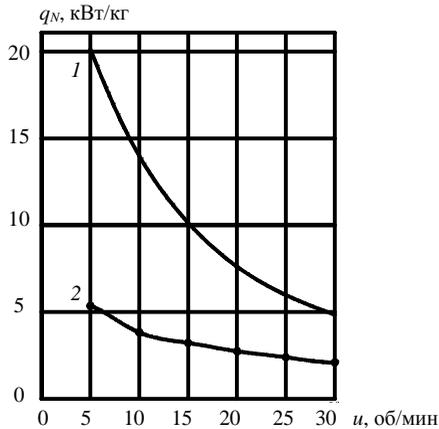
**Рис. 3.16.** Зависимость предела прочности при разрыве  $\sigma_p$  и предела текучести  $\sigma_\tau$  при растяжении от частоты вращения  $u$  при использовании нижнего (1) и бокового (2) отборочно-гранулирующих устройств (диаметр фильеры  $d_\phi = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ )



**Рис. 3.17.** Зависимость относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_r$  от частоты вращения  $u$  при использовании нижнего (1) и бокового (2) отборочно-гранулирующих устройств (диаметр фильеры  $d_\phi = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ )



**Рис. 3.18.** Зависимость производительности  $Q$  от частоты вращения  $u$  при использовании нижнего (1) и бокового (2) отборочно-гранулирующих устройств (диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ )



**Рис. 3.19.** Зависимость удельной мощности  $q_N$ , затрачиваемой на 1 кг продукции, от частоты вращения  $u$  при использовании нижнего (1) и бокового (2) отборочно-гранулирующих устройств (диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ )

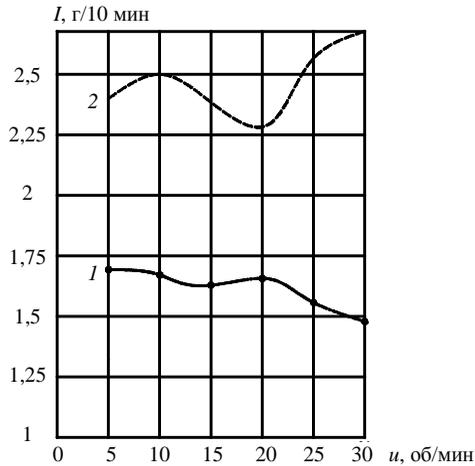
Из анализа этих зависимостей можно сделать вывод, что использование нижнего или бокового отборочно-гранулирующего устройства не оказывает существенного влияния на свойства получаемого гранулята. Однако при использовании бокового отборочно-гранулирующего устройства производительность возрастает в 2,2 раза, а удельная мощность уменьшается в 2,4 раза по сравнению с этими же показателями при использовании нижнего отборочно-гранулирующего устройства.

### **3.6. СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ГРАНУЛЯТА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ПЕРВИЧНОГО И ПЛЕНОЧНЫХ ОТХОДОВ ПЭНП ПРИ НАЙДЕННЫХ РЕЖИМАХ ПЕРЕРАБОТКИ**

Исследовался непрерывный процесс переработки на ЭУ пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления при найденном оптимальном режиме гранулирования: диаметре фильеры  $d_f = 5$  мм, величине минимального зазора между валками  $h_0 = 1,5$  мм, фрикции  $f = 1:1,2$ . Использовали боковое отборочно-гранулирующее устройство (рис. 2.4).

Проведены эксперименты по определению зависимости показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от частоты вращения переднего валка. Эксперименты проводили в такой же последовательности, как при исследовании непрерывного процесса переработки на ЭУ первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. После обработки экспериментальных данных построены графические зависимости (рис. 3.20 – 3.22), на которых приводится сравнение свойств гранул полученных из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления и гранул, полученных из первичного ПЭНП марки 15803-020.

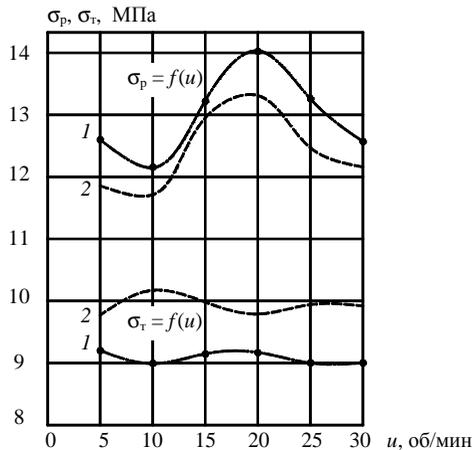
Из анализа графических зависимостей (рис. 3.20 – 3.22) можно сделать вывод, что максимальные физико-механические показатели гранул, полученных из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления, и гранул, полученных из первичного ПЭНП марки 15803-020, достигаются при одинаковой частоте вращения валков. Ухудшение прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве, увеличение показателя текучести расплава гранул полученных из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления вызвано влиянием различных факторов на материал при его первичной переработке, эксплуатации и хранении (температура, влажность, воздействие солнечного излучения и т.д.).



**Рис. 3.20. Зависимость показателя текучести расплава полимера  $I$  от частоты вращения  $u$**

(боковое отборочно-гранулирующее устройство; диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):

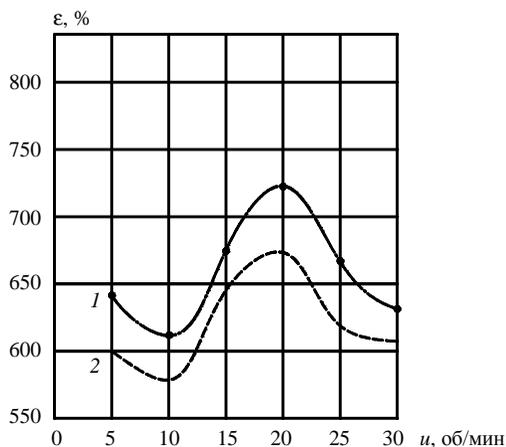
1 – переработанный первичный полиэтилен;  
2 – переработанные отходы полиэтилена



**Рис. 3.21. Зависимость предела прочности при разрыве  $\sigma_r$  и предела текучести  $\sigma_t$  при растяжении от частоты вращения  $u$**

(боковое отборочно-гранулирующее устройство; диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):

1 – переработанный первичный полиэтилен;  
2 – переработанные отходы полиэтилена



**Рис. 3.22. Зависимость относительного удлинения при разрыве  $\epsilon$  от частоты вращения  $i$**

(боковое отборочно-гранулирующее устройство; диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм; минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм; величина фрикции  $f = 1:1,2$ ):

- 1 – переработанный первичный полиэтилен;
- 2 – переработанные отходы полиэтилена

### **3.7. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПЛЕНОЧНЫХ ОТХОДОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

В настоящее время наибольшее количество отходов пленочных термопластичных полимерных материалов перерабатывается по двум технологиям: а) экструзионным методом; б) с использованием дискового агломератора.

В работе проведено сравнение свойств гранул, получаемых из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия со свойствами гранул, получаемых по двум указанным выше технологиям.

Свойства гранулята приведены в табл. 3.2.

Анализируя данные, указанные в табл. 3.2, можно сделать вывод, что разрушающее напряжение при растяжении вторичного полиэтилена, полученного на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия, в 1,3 раза выше, чем разрушающее напряжение вторичного полиэтилена полученного экструзионным методом, и в 1,4 раза выше, чем разрушающее напряжение вторичного полиэтилена, полученного с использованием дискового агломератора. Относительное удлинение

### 3.2. Свойства гранулята

Характеристики	ВПЭНП		
	полученный экструзионным методом	полученный на дисковом агломераторе	полученный на валковом пластикаторе- регрануляторе непрерывного действия
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	10	9,7	13,31
Относительное удлинение при разрыве, %	505	425	673,3
Показатель текучести расплава, г/10 мин	2,4	2,7	2,3
Удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции, кВт/кг	0,25	0,22	0,19

при разрыве вторичного полиэтилена, полученного на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия, в 1,3 раза выше, чем относительное удлинение при разрыве вторичного полиэтилена, полученного экструзионным методом, и в 1,6 раза выше, чем относительное удлинение при разрыве вторичного полиэтилена, полученного с использованием дискового агломератора. Удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции вторичного полиэтилена, полученного на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия, в 1,3 раза ниже, чем удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции вторичного полиэтилена, полученного экструзионным методом, и в 1,15 раз ниже, чем удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции вторичного полиэтилена, полученного с использованием дискового агломератора.

Следовательно, наиболее экономичной с точки зрения затрачиваемой мощности и обеспечивающей лучшие свойства вторичного полиэтилена является технология переработки отходов ПЭНП производственного и общественного потребления на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия.

## 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

### 4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТОВ

При вальцевании существенное влияние на качественные показатели получаемого гранулята (предел прочности, относительное удлинение при разрыве) оказывает суммарная величина сдвига, которая зависит от различных технологических (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, трения, «запаса» материала на валках) и конструктивных (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, диаметра и длины фильеры) параметров процесса.

#### 4.1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ВДОЛЬ ОСИ X

Средняя удельная деформация сдвига, реализуемая за один проход при вальцевании с трением, определяется выражением [88, 93, 94]:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_x = & \left\{ 1,5 \left[ (1 - X_k^2) \operatorname{arctg} \frac{X_k - X_n}{1 - X_n X_k} + \frac{1 + X_k^2 X_n - X_k^2}{1 + X_n^2} \right] \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda(1 + X_k^2)} + \right. \\ & \left. + \frac{1 - 2\lambda^2(1 + X_k^2)}{2(1 + X_k^2) [1 - \lambda^2(1 + X_k^2)]} \left( \frac{X_k}{1 + X_k^2} - \frac{X_n}{1 + X_n^2} + \operatorname{arctg} \frac{X_k - X_n}{1 - X_n X_k} \right) \right\} \times \\ & \times [2,8h_{02} l_b (1 + X_k^2)(X_k - X_n)]^{-1}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\text{где} \quad X_n = \frac{x_n}{\sqrt{2Rh_{02}}}, \quad X_k = \frac{x_k}{\sqrt{2Rh_{02}}}; \quad (4.2)$$

$x_n$  – величина координаты сечения входа, м;  $x_k$  – величина координаты сечения выхода, м;  $R$  – радиус валка, м;  $h_{02}$  – половина величины зазора между валками, м;  $\lambda = (U_1 - U_2)/2U_0$ , где  $U_2$  – окружная скорость заднего валка, м/с;  $U_1$  – окружная скорость переднего валка, м/с;  $U_0 = (U_1 + U_2)/2$  – среднее значение окружной скорости валков;  $l_b$  – длина рабочей части валка вальцов, м.

Величина сдвига вдоль оси  $X$  определяется по формуле [88, 93, 94]:

$$\gamma_x = \tilde{\gamma}_x i(t), \quad (4.3)$$

где  $i(t)$  – число проходов:

$$i(t) = \frac{U_0 t(1 + X_k^2)}{(X_k - X_n)\sqrt{2Rh_{02}}}, \quad (4.4)$$

где  $t$  – продолжительность (время) вальцевания.

#### 4.1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА

Для определения суммарной величины сдвига вдоль оси  $X$  и вдоль оси  $Z$  (непрерывный режим работы валкового оборудования) сделаны следующие допущения:

1. Разбиваем длину валка на множество элементарных участков  $z_j$  (рис. 4.1), соответствующих  $j$ -му проходу.

Суммарную величину сдвига определяем по формуле

$$\gamma_c = \sum_{j=1}^k \gamma_j, \quad (4.5)$$

где  $\gamma_j$  – величина сдвига за один проход, определяется по формулам

(4.1), (4.2), в которых  $l_b = z_j$ ;  $z_j = \sum_{i=1}^n dz_i$ ;  $dz_i = dl_i \cos\varphi_i$ ;  $\operatorname{tg}\varphi_i = v_{xi} / v_{zi}$ ,

$v_{xi}$  – скорость течения материала вдоль оси  $X$  определяется по формуле (4.6),  $v_{zi}$  – скорость течения материала вдоль оси  $Z$  определяется по

формулам (4.7), (4.8);  $l_{bj} = \sum_{i=1}^n dl_i$ , где  $l_{bj}$  – путь пройденный материалом

за один проход в зоне деформирования;  $dl_i = (X_i - X_{i-1}) / \sin\varphi_i$ ;  $k$  – число

проходов, при котором  $\sum_{j=1}^k z_j = l_b$ , где  $l_b$  – длина рабочей части валка.

$$v_{xi} = -\frac{U_0}{1 + X^2} \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{Y}{H} \right)^2 (X^2 - X_k^2) + \frac{2 - X^2 + 3X_k^2}{2} + \left( \frac{Y}{H} \right)^2 \lambda (1 + X^2) \right], \quad (4.6)$$

где  $H = \frac{h_2}{\sqrt{2Rh_{02}}}$  – безразмерная координата.

$$v_{zi} = \frac{3QW}{4h_{02}\sqrt{2Rh_{02}}}, \quad (4.7)$$

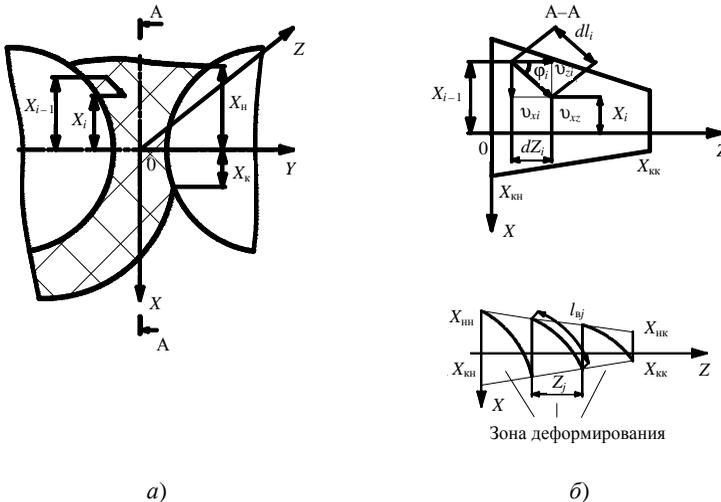
где

$$\begin{aligned}
 W = & (1+X^2) \left[ \left( \frac{Y}{H} \right)^2 - 1 \right] \times \\
 & \times \frac{-2X^2(5+3X^2) - 6X_{\kappa} \operatorname{arctg} X + A}{(1+X^2)^2} - 6X_{\kappa} \operatorname{arctg} X + A \\
 & \times \frac{\left\{ AX - 3,4X_{\kappa} X^2 - AX^3 - 3,34X_{\kappa} X^4 + 0,6AX^5 - 0,86X_{\kappa} X^6 + 0,143AX^7 - \right.}{\left. - 6X_{\kappa} \left[ (X + X^3 + 0,6X^5 + 0,143X^7) \operatorname{arctg} X - 0,23 \ln(1+X^2) \right] \right\} \Big|_{X_H}^{X_{\kappa}}}{}, \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

где  $A = 6X_{\kappa} \operatorname{arctg} X_{\kappa} + \frac{2X_{\kappa}^2(3X_{\kappa}^2 + 5)}{(1+X_{\kappa}^2)^2}$ , где  $Q$  – заданная производительность.

ность.

2. Считаем, что безразмерная координата сечения выхода  $X_{\kappa}$  изменяется от зоны загрузки до зоны выгрузки по линейному закону (рис. 4.1).



**Рис. 4.1.** К расчету  $\gamma_c$ :

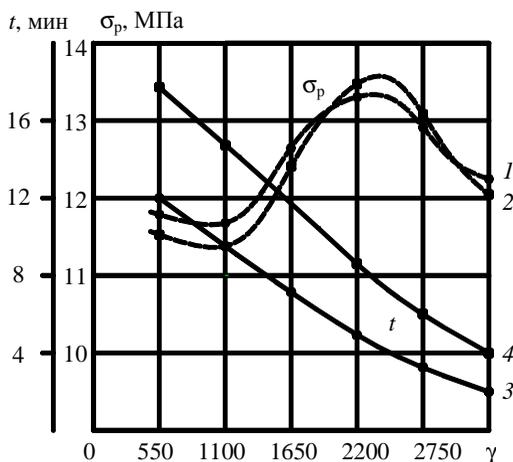
*a* – допущения; *б* – циклограмма движения материала с учетом деформации

## 4.2. ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРАНУЛЯТА ОТ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ И НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ВАЛЬЦОВ

После расчета величины сдвига вдоль оси  $X$  по формулам (4.1) – (4.4) (периодический процесс) и расчета суммарной величины сдвига  $\gamma_c$  по формулам (4.5) – (4.8) (непрерывный процесс) в зависимости от технологических и конструктивных параметров процесса были проведены эксперименты и получены графические зависимости физико-механических свойств гранулята  $\sigma_p$  от величины сдвига, показанные на рис. 4.2.

Анализируя графические зависимости, представленные на рис. 4.2, можно сделать вывод, что лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания в 2,1 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается 2,1 раза.

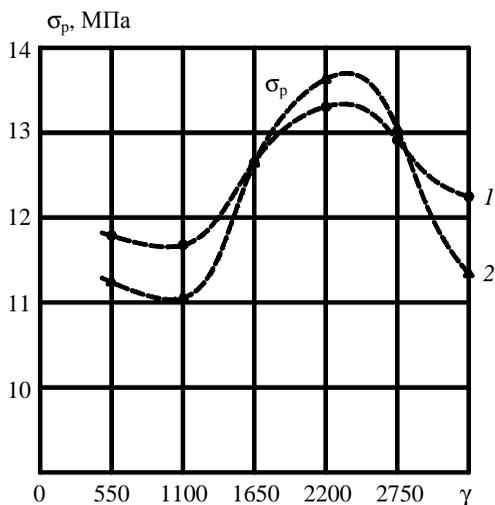
Для проверки адекватности расчета суммарной величины сдвига проведены эксперименты на вальцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной валка 500 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости физико-механических свойств гранулята  $\sigma_p$  от величины сдвига  $\gamma_c$ , показанные на рис. 4.3, в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке.



**Рис. 4.2. Зависимость предела прочности  $\sigma_p$  от величины сдвига  $\gamma$  при периодическом и непрерывном режиме работы вальцов:**

1 – непрерывный режим ( $\sigma_p$ ); 2 – периодический режим ( $\sigma_p$ );

3 – время при непрерывном режиме; 4 – время при периодическом режиме



**Рис. 4.3. Зависимости предела прочности  $\sigma_p$  от величины сдвига  $\gamma_c$  полученные на ЭУ и на промышленных вальцах:**

*1* – экспериментальная установка; *2* – промышленные вальцы

Анализируя графические зависимости, представленные на рис. 4.3, можно сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели гранулята наблюдаются при такой же величине сдвига  $\gamma_c$ , как при опытах на ЭУ. Расхождение между физико-механическими показателями составляет не более 7 %.

## 5. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

В качестве исходных параметров, необходимых для расчета, принимаются:

- 1) реологические константы перерабатываемого материала  $K$  и  $n$ ;
- 2) продолжительность вальцевания –  $t$ ;
- 3) удельная мощность, реализуемая в процессе механической обработки материала на вальцах –  $P$ ;

При расчете основных параметров непрерывного процесса вальцевания могут встретиться два типа задач:

- 1) при заданных геометрических размерах валков вальцов, скоростях вращения и фрикции необходимо определить производительность;
- 2) при заданной производительности необходимо определить основные геометрические размеры валков (диаметр и длину).

### 5.1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПЕРВОМУ ВАРИАНТУ

Для расчета основных параметров процесса и оборудования по первому варианту дополнительно должны быть заданы: скорость вращения переднего валка, величина фрикции и геометрические размеры валков (радиус и длина рабочей части).

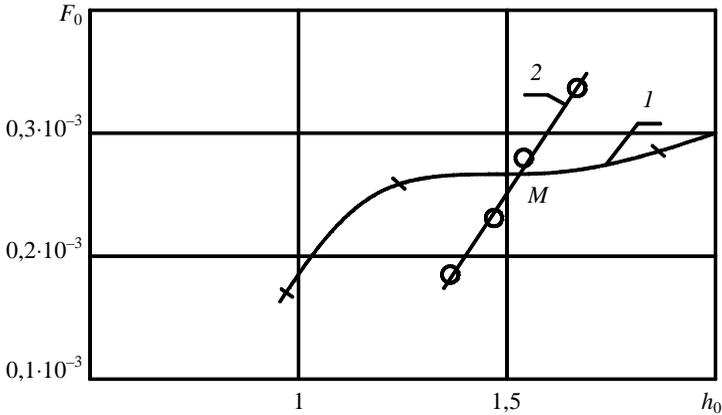
Расчет ведем в следующей последовательности:

1. Находим оптимальную высоту «запаса» материала на валках  $X_{\text{нп}}$  по методике, изложенной в разделе 3.2.

2. Оптимальную величину минимального зазора между валками  $h_0$  находим по методике, изложенной в [90].

По формулам (3.9), (3.10) для различных значений  $R/h_{02}$  вычисляем величину максимального значения функции  $F_0^{\max}$ . По полученным значениям функции  $F_0^{\max}$  строим график зависимости  $F_0^{\max}$  от величины минимального зазора между валками  $h_0$  (кривая 1, рис. 5.1).

Далее по уравнению (3.8) для заданного по условию значения величины удельной мощности  $P$  находим величину функции  $F_0^P(X_{\text{к}}, n, R/h_{02})$  для различных значений величины зазора и строим график



**Рис. 5.1. Зависимость функции  $F_0$  от величины минимального зазора между валками  $h_0$ :**

$$1 - F_0^{\max}; 2 - F_0^P$$

зависимости ее от  $h_0$  (кривая 2, рис. 5.1). Точка пересечения графиков функций  $F_0^{\max}$  и  $F_0^P$  (точка М) определяет оптимальную величину минимального зазора между валками  $h_0$  для заданного значения удельной мощности.

3. Определяем производительность валцов, при непрерывном режиме работы  $Q$  по методике, изложенной в [89, 90].

Значение величины безразмерного комплекса  $Q^*Z$  определяется из выражения [90]:

$$Q^*Z = \frac{2Qz}{U_1 h_{02}^2 R}. \quad (5.1)$$

В то же время производительность валцов непрерывного действия можно выразить как отношение объема материала на валках  $V$  к продолжительности вальцевания  $t$ . Тогда значение комплекса  $Q^*Z$  определится как [90]:

$$Q^*Z = \frac{2Vl_B}{U_1 h_{02}^2 R t}. \quad (5.2)$$

Величина объема материала на валках определяется по уравнению [90]:

$$V = \frac{R h_{02}^3 U_1 \sqrt{2R h_{02}}}{Q} \varphi_1 \left( X_k \frac{R}{h_{02}} \right), \quad (5.3)$$

где

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 = \int_{X_{к0}}^{X_{кк}} & \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1 - X_{к}^2) \left[ \frac{R}{h_{02}} + (1 + X_{к}^2) \right] - (1 + X_{к}^2)(X_{к} + X_{н}) + \right. \\
 & + \left[ X_{н} + X_{к} + \frac{1}{3}(X_{н}^4 + X_{к}^4) \right] \left. \left\{ \left[ \frac{6X_{к}^4 + 10X_{к}^2}{(1 + X_{к}^2)^2} (X_{к} + X_{к}^3 + 0,6X_{к}^5 + \right. \right. \right. \\
 & + 0,143 X_{к}^7 - X_{н} - X_{н}^3 - 0,6X_{н}^5 - 0,144 X_{н}^7) + \\
 & + 6X_{к} \arctg X_{н} (X_{н} + X_{н}^3 + 0,6X_{н}^5 + 0,143 X_{н}^7) - \\
 & - 6X_{к} \arctg X_{к} (X_{н} + X_{н}^3 + 0,6X_{н}^5 + 0,143 X_{н}^7) - \\
 & - X_{к}^3(3,4 + 3,34X_{к}^2 + 0,86X_{к}^4) + X_{к}X_{н}^2(3,4 + 3,34X_{н}^2 + 0,86X_{н}^4) + \\
 & \left. \left. \left. + 1,4X_{к} \ln(1 + X_{к}^2) - 1,4X_{н} \ln(1 + X_{н}^2) \right] \right\} dx. \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Совместное решение (5.1) и (5.2) позволяет определить производительность вальцов при непрерывном режиме их работы по формуле [89, 90]:

$$Q = \sqrt{\frac{Rh_{02}^3 U_1 (2Rh_{02})^{\frac{1}{2}}}{t}} \varphi_1. \quad (5.5)$$

Вследствие некоторой сложности вычисления функции  $\varphi_1$  расчет производительности представляет определенные трудности. Как показано в работе [89], величину объема материала на валках вальцов, работающих по непрерывному режиму, можно вычислить по уравнению

$$\begin{aligned}
 V = 2h_{02} \sqrt{2Rh_{02}} v \times \\
 \times \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1 + X_{к}^2) - (1 + X_{к}^2)(X_{к} + X_{н}) + \left[ X_{н} + X_{к} + \frac{1}{3}(X_{н}^3 + X_{к}^3) \right] \right\}, \quad (5.6)
 \end{aligned}$$

где  $v$  – скорость течения материала, м/с.

Тогда производительность вальцов непрерывного действия может быть определена из выражения [89,90]:

$$Q = \frac{2h_{02}\sqrt{2Rh_{02}}\nu k(R/h_{02}, X_k, X_H)}{t}, \quad (5.7)$$

где

$$k = \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1 + X_k^2) \left[ \frac{R}{h_{02}} + (1 + X_k^2)(X_k + X_H) + \left[ X_H + X_k + \frac{1}{3}(X_H^3 + X_k^3) \right] \right]; \quad (5.8)$$

4. Геометрические размеры каналов отборочно-гранулирующего устройства определяем по методике, изложенной в разделе 2.3.

5. Определяем суммарную величину сдвига по формулам (4.1) – (4.5). Если полученная суммарная величина сдвига отличается от суммарной величины сдвига, обеспечивающей наилучшие показатели перерабатываемого материала по качеству, то вносим корректировку, изменяя  $h_0$ , частоту вращения переднего валька  $u$ , величину фрикции  $f$ , время вальцевания  $t$ , с целью изменения суммарной величины сдвига, приближаясь к наилучшим показателям по качеству для конкретного вальцуемого полимера.

6. Находим силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания (распорное усилие  $F_n$  и технологическую мощность  $N_n$ , а также мощность привода вальцов  $N_n$ ) по методике, изложенной в [89, 90].

Величина распорного усилия  $F_n$  определяется по формуле

$$F_n = \frac{\mu U_1 R^2 h_{02}^2 (1 + f) \left( \frac{U}{h_{02}} \right)^n \left( \frac{1 + 2n}{n} \right)^n}{2Q} f_1(X_k, n), \quad (5.9)$$

где

$$f_1(X_k, n) = \int_{X_{k0}}^0 \int_{X_k}^{X_H} \int_{X_k}^X \left( \frac{\pm X^2 \pm X_k^2}{(1 + X^2)^{2n+1}} \right)^n \left[ \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + \right. \\ + 0,143X_k^7 - X_H + X_H^3 - 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) + 6X_k \arctg X_H \times \\ \times (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + \\ \left. + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - \right. \\ \left. - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2) \right] dX dX dX_k. \quad (5.10)$$

Значение технологической мощности  $N_n$ , необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала определяется по формуле

$$N_n = \frac{\mu U_1^2 R h_{02}^2 \sqrt{2Rh_{02}} \left(\frac{U_1}{h_{02}}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \left(\frac{f+1}{2}\right)}{Q} f_2(X_k, n), \quad (5.11)$$

где

$$f_2(X_k, n) = \int_{X_{k0}}^0 \int_{X_k}^{X_H} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)}{(1+X^2)^{2n}} \left[ \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1+X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + \right. \\ + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + 6X_k \arctg X_H \times \\ \times (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - 6X_k \arctg X_k \times \\ \times (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + \\ \left. + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \right. \\ \left. + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dXdX_k. \quad (5.12)$$

Мощность привода вальцов  $N_d$  определяется по формуле

$$N_d = \frac{N_n}{\eta_{пр}}, \text{ кВт}, \quad (5.13)$$

где  $\eta_{пр}$  – к.п.д. привода машины.

7. Проводим прочностной расчет основных деталей и узлов машины (валков, станины, механизма регулировки зазора и др.) по общепринятой методике.

8. Проводим тепловой расчет процесса непрерывного вальцевания с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов.

## 5.2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ВТОРОМУ ВАРИАНТУ

Первоначально определяем объем единовременной загрузки материала на вальцы  $q_1$  по методике, изложенной в [90].

Объем единовременной загрузки материала на вальцы  $q_1$  определяем по формуле

$$q_1 = \frac{G_n t}{60\rho\alpha}, \text{ дм}^3, \quad (5.14)$$

где  $G_n$  – заданная производительность, кг/ч;  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время вальцевания, мин;  $\alpha = (0,8 \dots 0,9)$  – коэффициент использования машинного времени.

Далее определяем длину  $L$  и диаметр валка  $D$ , дм, с учетом соотношения  $L \sim 3D$  по формуле  $q_1 = (0,0065 \dots 0,0085)DL$ , дм<sup>3</sup>. Полученные значения  $L$  и  $D$  уточняем по ГОСТ 14333–73.

После этого находим оптимальную высоту «запаса» материала на валках  $X_{\text{ин}}$ ; оптимальную величину минимального зазора между валками  $h_0$ ; производительность вальцов, при непрерывном режиме работы  $Q$ ; геометрические размеры каналов отборочно-гранулирующего устройства; суммарную величину сдвига; силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания; проводим прочностной расчет основных деталей и узлов валкового оборудования и тепловой расчет процесса непрерывного вальцевания по методике, как для первого варианта расчета основных параметров процесса и оборудования.

Составляем техническую характеристику спроектированной валковой установки.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

---

1. Выполнен литературный обзор и анализ состояния вторичной переработки полимерных материалов в РФ и за рубежом.

2. Рассмотрены существующие технологии и применяемое оборудование для вторичной переработки отходов различных термопластичных полимерных материалов, и показаны их достоинства и недостатки.

3. Разработан технологический процесс и валковое оборудование непрерывного действия для вторичной переработки пленочных отходов полиэтилена.

4. Разработана и создана экспериментальная валковая установка по изучению процесса переработки отходов с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров.

5. Разработана конструкция и методика расчета геометрических параметров отборочно-гранулирующего устройства при заданной производительности валцов и реологических свойствах полимерного материала.

6. Проведены экспериментальные исследования для определения технологических параметров процесса (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины фрикции, величины «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров оборудования (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, геометрических размеров фильеры), при которых достигаются максимальные прочностные показатели гранулята (предел прочности и относительное удлинение при разрыве), получаемого из пленочных отходов полиэтилена.

7. Разработана математическая модель и программное обеспечение для расчета суммарной величины сдвига характеризующей влияние различных технологических и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого гранулята.

8. Создана методика инженерного расчета основных параметров непрерывного процесса вальцевания и конструкции оборудования по двум вариантам: 1) при заданных геометрических размерах валков, частоте вращения переднего валка и величине фрикции находится производительность; 2) при заданной производительности находятся основные геометрические размеры валков (диаметр и длина).

9. Результаты работы приняты ОАО «НИИРТМаш» к использованию при проектировании промышленных вальцов по переработке отходов пленочных термопластов. Рассчитанный экономический эффект от создания валкового оборудования составляет 225 тыс. р.

10. Гранулы, полученные на экспериментальной установке из отходов ПЭНП промышленного и общественного потребления, используются на НПП ООО «Эласт» в производстве полиэтиленовых труб методом экструзии.

11. Методика инженерного расчета и программное обеспечение на ЭВМ для проектирования валковых пластикаторов-грануляторов внедрены в учебный процесс при подготовке инженеров по специальности 240801, 261201 по дисциплинам «Оборудование для производства тары и упаковки», «Оборудование для переработки полимерных материалов», «Утилизация упаковки» и магистров по программе 150400.26 в дисциплинах «Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов», «Оптимизация режимных и конструктивных параметров технологического оборудования».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

1. Пономарева, В.Т. Использование пластмассовых отходов за рубежом / В.Т. Пономарева, Н.Н. Лихачева, З.А. Ткачик // Пластические массы. – 2002. – № 5. – С. 44 – 48.
2. Гринин А. С. Промышленные и бытовые отходы: хранение утилизация, переработка / А.С. Гринин, В.Н. Новиков. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 336 с.
3. Голуб, О.В. Упаковка и хранение пищевых продуктов : учеб. пособие / О.В. Голуб, С.Б. Васильева. – Кемерово : Кемер. технол. ин-т пищ. пром-ти, 2005. – 215 с.
4. Лукашевич, А.С. Вторичные полимерные ресурсы и эффективность их использования / А.С. Лукашевич // Пластические массы. – 1991. – № 2. – С. 15 – 16.
5. Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика : учеб. пособие / Г.К. Лобачева и др. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 1999. – 180 с.
6. Пластмассовые отходы, их сбор, сортировка, переработка, оборудование : промышленный обзор // Пластические массы. – 2001. – № 12. – С. 3 – 10.
7. Одесс, В.И. Вторичные ресурсы: хозяйственный механизм использования / В.И. Одесс. – М. : Экономика, 1988. – 159 с.
8. Андрейцев, Д.Ф. Технические и экономические проблемы вторичной переработки и использования полимерных материалов / Д.Ф. Андрейцев, Т.Е. Артемьева, С.А. Вильниц. – М. : Химия, 1972. – 83 с.
9. Вторичное использование полимерных материалов : сб. ст. / под ред. Е.Г. Любешкиной. – М. : Химия, 1985. – 192 с.
10. Суворова, А.И. Биоразлагаемые полимерные материалы на основе крахмала / А.И. Суворова, И.С. Тюкова, Е.И. Труфанова // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 5. – С. 494 – 504.
11. Еромолович, О.А. Влияние добавок компатилизатора на технологические и эксплуатационные характеристики биоразлагаемых материалов на основе крахмалонаполненного полиэтилена / О.А. Еромолович, А.В. Макаревич // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79, № 4. – С. 115 – 121.
12. Гоготов, И.Н. Биоразлагаемые полимеры: свойства, практическое использование, утилизация / И.Н. Гоготов // Экология и промышленность России. – 2007. – № 10. – С. 16 – 19.
13. Wang, Jing et al. Huanjing kexue / Jing Wang // Chin. J Environ 1998. – Vol. 19, № 5. – S. 52 – 54.

14. Изменение структуры и свойств наполненного полиамида ПА-6 при длительном хранении в различных климатических зонах / В.И. Суровцев и др. // Пластические массы. – 1989. – № 8. – С. 23 – 26.
15. Ларионов В.Г. Саморазлагающиеся полимерные материалы / В.Г. Ларионов // Пластические массы. – 1993. – № 4. – С. 36 – 39.
16. Казьмина Н.А. Разработка композиционных материалов на основе крахмалсодержащего сырья : дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Казьмина. – М., 2002.
17. Кудрявцева, З.А. Биоразрушаемые полимерные материалы / З.А. Кудрявцева, Ю.Т. Панов, А.А. Алешин // Производственные технологии и качество продукции : материалы науч.-техн. конф. – М. : Новые технологии. – 2003. – С. 142 – 146.
18. Шериева, М.Л. Биоразрушаемые композиции / М.Л. Шериева, Г.Б. Шустов // Химия в технологии и медицине : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Махачкала : Изд-во Дагестан. гос. ун-та, 2001. – С. 165 – 167.
19. Шериева, М.Л. Биоразлагаемые композиции на основе крахмала / М.Л. Шериева, Г.Б. Шустов, Р.А. Шетов // Пластические массы. – 2004. – № 10. – С. 29 – 31.
20. Мономеры для поликонденсации / под ред. Д.М. Стилла. – М. : Мир, 1976. – 253 с.
21. Фомин, В.А. Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования / В.А. Фомин, В.В. Гузеев // Пластические массы. – 2001. – № 2. – С. 42 – 47.
22. Васнев, В.А. Биоразлагаемые полимеры / В.А. Васнев // Высокмолекулярные соединения. – 1997. – Т. 39, № 12. – С. 2073 – 2086.
23. Мухина, Т.Н. Пиролиз углеводородного сырья / Т.Н. Мухина и др. – М. : Химия, 1987. – 240 с.
24. Технологии переработки отходов растительной биомассы, технической резины и пластмассы / Д.В. Аристархов и др. // Инженерно-физический журнал. – 2001. – № 6. – С. 152 – 156.
25. Папынов, Е.К. Утилизация органических отходов с использованием термического крекинга / Е.К. Папынов, Н.П. Шапкин // Химическая технология. – 2009. – Т. 34, № 3. – С. 48 – 52.
26. Каталитический пиролиз полимерных смесей / В.Г. Систер и др. // Журнал физической химии. – 2011. – Т. 85, № 6. – С. 1192 – 1194.
27. Кастнер, Х. Повторная переработка пластиков в исходное сырье / Х. Кастнер, В. Камински // Нефтегазовые технологии. – 1995. – № 6. – С. 42 – 44.
28. Штарке, Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс / Л. Штарке ; под ред. В.А. Брагинского ; пер. с нем. – Л.: Химия, 1987. – 176 с.

29. Полачек, Й. Утилизация отходов пластмасс путем коксования в угольных смесях / Й. Полачек, С. Маховска, З. Вельгош // Пластические массы. – 1998. – № 5. – С. 38 – 43.
30. Бобович, Б.Б. Утилизация отходов полимеров : учеб. пособие / Б.Б. Бобович. – М.: Изд-во Моск. гос. индустр. ун-та, 1998. – 62 с.
31. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол : обзорная информация / М.С. Мингалеев, В.С. Левин, В.В. Черников, Р.И. Ковалева. – М. : НИИТЭХИМ, 1979. – Вып. 1. – С. 40 – 44.
32. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол: обзорная информация / М.С. Акутин, М.Я. Забара, И.Г. Жукова, М.А. Шишкова. – М. : НИИТЭХИМ, 1977. – Вып. 6. – С. 28 – 34.
33. Забара, М.Я. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол: обзорная информация / М.Я. Забара. – М. : НИИТЭХИМ, 1978. – Вып. 10. – С. 26 – 31.
34. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол: обзорная информация / М.Я. Забара и др. – М. : НИИТЭХИМ, 1975. – Вып. 1. – С. 54 – 58.
35. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол: обзорная информация / М.Л. Улановский и др. – М. : НИИТЭХИМ, 1982. – Вып. 3. – С. 7 – 9.
36. Гуняев, Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов / Г.М. Гуняев. – М. : Химия, 1981. – 232 с.
37. Шляпинтох, В.Я. Фотохимические превращения и стабилизация полимеров / В.Я. Шляпинтох. – М. : Химия, 1979. – 344 с.
38. Рэнгби, Б. Фотодеструкция, фотоокисление и фотостабилизация полимеров / Б. Рэнгби, Я. Рабек. – М. : Мир, 1978. – 676 с.
39. Эмануэль, Н.М. Некоторые проблемы химической физики старения и стабилизации полимеров / Н.М. Эмануэль // Успехи химии – 1979. – Т. 48, № 12. – С. 2113 – 2163.
40. Слободецкая, Е.М. Фотоокисление полиолефинов и прогнозирование срока службы / Е.М. Слободецкая // Успехи химии. – 1980. – Т. 49, № 8. – С. 1594 – 1616.
41. Шляпников, Ю.А. Антиокислительная стабилизация полимеров / Ю.А. Шляпников // Успехи химии. – 1981. – Т. 50, № 6. – С. 1105 – 1140.
42. Карпухин, О.Н. Кинетика фотоокисления полиолефинов / О.Н. Карпухин, Е.М. Слободецкая, Т.В. Магомедов // Высокомолекулярные соединения. – 1980. – Т. 22, № 8. – С. 595 – 599.
43. Шляпников, Ю.А. Антиокислительная стабилизация полимеров / Ю.А. Шляпников, С.Г. Кирюшкин, А.П. Марьян. – М. : Химия, 1986. – 256 с.
44. Денисов, Е.Т. Специфика радикальных реакций в твердой фазе и механизм окисления карбоцепных полимеров / Е.Т. Денисов // Высокомолекулярные соединения. – 1977. – Т. 19, №11. – С. 2513 – 2523.

45. Кириллова, Э.И. Старение и стабилизация термопластов / Э.И. Кириллова, Э.С. Шульгина. – Л. : Химия, 1988. – 240 с.
46. Pabiot, J. The change in mechanical behavior of linear polymers during photochemical aging / J. Pabiot, J. Verdu // Polym. Eng. and Sci. – 1981. – Vol. 21, № 1. – S. 32 – 38.
47. Забара, М.Я. Стойкость изделий из вторичного материала к воздействию климатических факторов / М.Я. Забара, Л.Б. Чекарева // Пластические массы. – 1978. – № 5. – С. 29 – 30.
48. Физико-химические свойства наполненных гелей сверхвысокомолекулярного полиэтилена / М.Л. Кербер и др. // Высокомолекулярные соединения. – 1996. – Т. 38, №8. – С. 1334 – 1342.
49. Дуденков, С.В. Повышение эффективности заготовки, обработки, переработки и использования вторичных полимерных материалов: обзорная информация / С.В. Дуденков и др. – М.: НИИТЭХИМ, НИИПМ, 1979. – Вып. 9. – 52 с.
50. Михайлов, Е.В. Разделение полимерных фракций ТБО / Е.В. Михайлов, Д.Е. Быков, Н.В. Рюмина // Экология и промышленность России. – 2007. – № 7. – С. 14.
51. Овчинникова, Г.П. Рециклинг вторичных полимеров: учеб. пособие / Г.П. Овчинникова, С.Е. Артеменко. – Саратов : Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 2000. – 148 с.
52. Вильниц, С.А. Оптимизация процесса низкотемпературного измельчения полимерных материалов / С.А. Вильниц, Ю.М. Вапна // Пластические массы. – 1974. – № 12. – С. 19 – 22.
53. Вильниц, С.А. Получение высокодисперсных порошков полимерных материалов методом низкотемпературного измельчения / С.А. Вильниц, Ю.М. Вапна // Химия и технология высокомолекулярных соединений. – 1980. – № 15. – С. 127 – 160.
54. Гуль, В.Е. Структура и прочность полимеров / В.Е. Гуль. – М. : Химия, 1978. – 328 с.
55. Шварц, О. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф.-В. Эбелинг, Б. Фурт. – СПб. : Профессия, 2005. – 320 с.
56. Ла Мантиа, Ф. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантиа ; под ред. Заикова Г.Е. ; пер. с итал. – СПб. : Профессия, 2006. – 400 с.
57. Чурсина, Т.В. Использование технологических отходов полиэтилена для получения концентрата технического углерода / Т.В. Чурсина, Е.Д. Лебедева, В.С. Осипчик // Пластические массы. – 1996. – № 3. – С. 29 – 30.
58. Любешкина, Е.Г. Лигнины как компонент полимерных композиционных материалов / Е.Г. Любешкина // Успехи химии. – 1983. – Т. 52, № 7. – С. 1196 – 1224.

59. Физико-химические и реологические особенности ПП, модифицированного вторичным ПЭ / Е.Г. Любешкина и др. // Пластические массы. – 1982. – № 1. – С. 19 – 20.

60. Композиционные материалы на основе наполненного вторичного полиэтилена / Н.Р. Дмитриева, Т.И. Волков, Н.М. Михалева и др. // Пластические массы. – 1993. – № 6. – С. 36 – 39.

61. Технология изготовления торцевого паркета из вторичного термопласта и отходов древесины / Е.Б. Раскин и др. // Пластические массы. – 1998. – № 2. – С. 44 – 46.

62. Лебедева, Т.М. Переработка вторичного поливинилхлоридного сырья : монография / Т.М. Лебедева, С.А. Шалацкая. – Л. : ЛДНТП, 1991. – 21 с.

63. Гржималовская, Л.В. Переработка отходов при производстве изделий из пластизоля ПВХ / Л.В. Гржималовская, Л.И. Мурогита. – Л. : Легпромбытиздат, 1988. – 52 с.

64. Wiessenkämper, W. Textilabfälle als Sekundärrohstoff / W. Wiessenkämper // Kunststoffen. – 1978. – Vol. 68, № 5. – S. 299 – 302.

65. Вольфсон, С.А. Твердофазное деформационное разрушение и изменение полимерных материалов / С.А. Вольфсон, В.Г. Никольский // Высокомолекулярные соединения. – 1994. – Т. 36, № 6. – С. 1040 – 1056.

66. Ахметханов, Р.М. Вторичная переработка отходов поливинилхлорида с использованием метода упруго-деформационного диспергирования / Р.М. Ахметханов, Р.Г. Кадыров, К.С. Минскер // Пластические массы. – 2002. – № 4. – С. 45 – 47.

67. Фридман, М.Л. Специфика реологических свойств и переработки вторичных полимерных материалов / М.Л. Фридман // Пути повышения эффективности использования вторичных полимерных ресурсов : тез. докл. I Всесоюзн. конф. – М. : Химия, 1985. – Ч. 1. – С. 73.

68. Кравченко, Б.В. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол : обзорная информация / Б.В. Кравченко, И.Н. Рувинская. – М. : НИИТЭХИМ, 1978. – Вып. 4. – С. 28 – 31.

69. Использование технологических отходов АБС-пластика в автомобилестроении / С.Е. Артеменко, Г.П. Овчинникова, С.Г. Кононенко и др. // Пластические массы. – 1995. – № 3. – С. 44–45.

70. Утилизация полимерной тары и упаковки : учеб. пособие / А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов, И.В. Шашков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 64 с.

71. Модификация полиамидов / С.К. Маленко, Н.А. Уманский, В.С. Левин, В.И. Коростелев // Пластические массы. – 1978. – № 8. – С. 60 – 61.

72. Штурман, А.А. Термообработка изделий из эпоксидных композиций / А.А. Штурман // Пластические массы. – 1991. – № 3. – С. 53.

73. Увеличение ресурса эксплуатации вторичного ПКА путем его модифицирования / Н.Н. Бух, Г.П. Овчинникова, С.Е. Артеменко, Б.Р. Ишанов // Пластические массы. – 1997. – № 1. – С. 37 – 39.

74. Юрханов, В.Б. Конструкционный материал на основе вторичных полиэтилена и полиэтилентерефталата / В.Б. Юрханов и др. // Пластические массы. – 1998. – № 4. – С. 40 – 42.

75. Кузнецов, С.В. Вторичные пластики: переработка отходов ПЭТФ бутылок / С.В. Кузнецов // Пластические массы. – 2001. – № 9. – С. 3 – 8.

76. Биндер, Роберт Ф. Вторичная переработка ПЭТФ / Роберт Ф. Биндер // Пластические массы. – 2003. – № 1. – С. 3–4.

77. Разработка технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов / А.С. Клинков, М.В. Соколов, И.В. Шашков, М.П. Беляев // Природные ресурсы и учение В.И. Вернадского – основа устойчивого развития цивилизации : тез. докл. межрегион. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 194–195.

78. Технология получения полимерпесчаной черепицы из отходов термопластов / С.П. Хрущев, И.В. Шашков, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Полимеры в строительстве : тез. докл. – Казань : Изд-во Казан. гос. архит.-строит. академии, 2004. – С. 110.

79. Вторичная переработка полимерных материалов на вальцах / И.В. Шашков, А.С. Клинков, М.В. Соколов, Д.Л. Полушкин // Полимеры в строительстве : тез. докл. – Казань : Изд-во Казан. гос. архит.-строит. академии, 2004. – С. 111.

80. Клинков, А.С. Разработка технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов / А.С. Клинков, М.В. Соколов, И.В. Шашков // IX науч. конф. ТГТУ : тез. докл. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – С. 80.

81. Современное состояние в области утилизации пленочных полимерных материалов / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов // X науч. конф. ТГТУ : тез. докл. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 55–56.

82. Минимизация технологической мощности вальцов при переработке отходов пластмасс / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов // V Междунар. теплофизическая школа : тез. докл. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Ч. 2. – С. 276–277.

83. Утилизация упаковки из пленочных полимерных материалов на валковых машинах непрерывного действия / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков и др. // Новые технологии получения и переработки полимеров : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ЗАО «Экспоцентр» на Красной Пресне, 2005. – С. 59 – 62.

84. Шашков, И.В. Способы измерения технологической мощности при экструзии резиновой смеси / И.В. Шашков, М.В. Соколов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Вып. 13. – С. 50 – 53.

85. Рябинин, Д.Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д.Д. Рябинин, Ю.Е. Лукач. – М. : Машиностроение, 1965. – 362 с.

86. Балашов, М.М. Исследование течения блочного полистирола «Д» и разработка конструкции реометра / М.М. Балашов, А.Н. Левин // Пластические массы. – 1961. – № 1. – С. 23 – 30.

87. Полушкин, Д.Л. Разработка конструкции и метода расчета гранулирующей приставки к вальцам непрерывного действия / Д.Л. Полушкин, И.В. Шашков, А.Г. Воропаев // Инновации в мире российской науки XXI века : сб. ст. магистрантов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – Вып. II. – С. 54 – 56.

88. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.

89. Клинков, А.С. Исследование непрерывного процесса вальцевания полимерных материалов : дис. ... канд. техн. наук / А.С. Клинков. – М., 1972.

90. Проектирование и расчет валковых машин для полимерных материалов : учеб. пособие / А.С. Клинков, В.И. Кочетов, М.В. Соколов и др. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 128 с.

91. Полушкин, Д.Л. Определение режимов утилизации пленочных полимерных материалов на вальцах / Д.Л. Полушкин, И.В. Шашков, М.В. Соколов // Сб. ст. магистрантов по материалам науч. конф. – Тамбов : ТОГУП «Тамбовполиграфиздат», 2005. – Вып. I. – Ч. 1. – С. 107 – 110.

92. Полушкин, Д.Л. Влияние технологических параметров процесса вальцевания на физико-механические показатели ПЭНП / Д.Л. Полушкин, И.В. Шашков // Инновации в мире российской науки XXI века : сб. ст. магистрантов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – Вып. II. – С. 57 – 60.

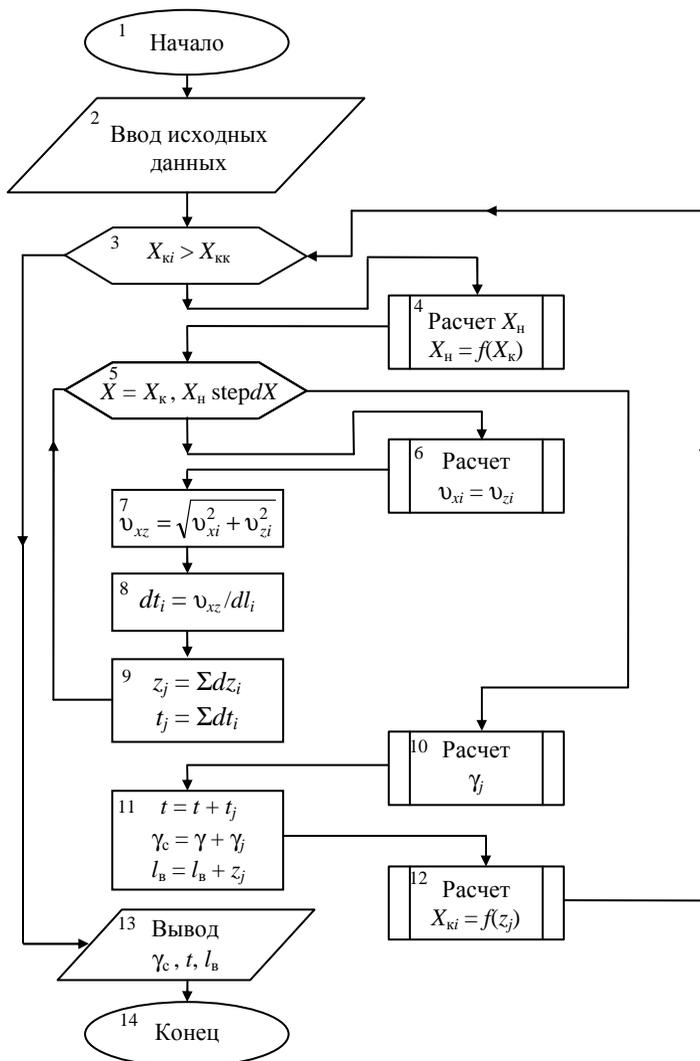
93. Расчет параметра качества гранулята при утилизации отходов термопластов на вальцах непрерывного действия / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов // Наука на рубеже тысячелетий : сб. докл. второй Междунар. заочн. науч.-практ. конф. – Тамбов : Першина, 2005. – С. 130 – 132.

94. Моделирование непрерывного процесса вальцевания отходов полимерных материалов / И.В. Шашков, А.С. Клинков, П.С. Беляев и др. // Авиакосмические технологии «АКТ-2004» – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. – С. 166 – 172.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА (Блок-схема)



## Описание работы программы расчета суммарной величины сдвига

*Блок 1.* Начало.

*Блок 2.* Ввод исходных данных.

*Блок 3.* Выполнять расчет для всех текущих значений безразмерной координаты сечения выхода  $X_{ki}$ , когда выполняется условие  $X_{ki} > X_{kk}$ .

*Блок 4.* Расчет безразмерной координаты сечения входа  $X_n$  в зависимости от  $X_k$ .

*Блок 5.* Задается цикл по оси  $X$  от  $X_k$  до  $X_n$  с шагом  $dX$  для расчета параметров в зоне деформации материала.

*Блок 6.* Расчет скоростей течения материала вдоль осей  $X$  и  $Z$  на участке  $dz_i$ .

*Блок 7.* Расчет результирующей скорости  $v_{xz}$  на участке  $dz_i$ .

*Блок 8.* Расчет времени движения материала  $dt_i$  на участке  $dz_i$ .

*Блок 9.* Расчет времени  $t_j$  и расстояния  $z_j$ , которое проходит материал за один проход.

*Блок 10.* После завершения цикла (*блок 5 – 9*) расчет сдвига за один проход  $\gamma_j$ .

*Блок 11.* Расчет суммы текущих значений величин сдвига  $\gamma_c$ , времени  $t$  и расстояния  $l_b$ .

*Блок 12.* Расчет  $X_{ki}$  для следующего прохода и возврат на *блок 3*.

*Блок 13.* После завершения цикла (*блок 3 – 9*) вывод результатов расчета: величин  $\gamma_c$ ,  $t$ ,  $l_b$ .

*Блок 14.* Конец.

### Текст программы

#### «Расчета суммарной величины сдвига»

```
DECLARE FUNCTION deltaX (dzS, Xkt, Lv)
DECLARE FUNCTION XnXk (Xkt, g, t, Xn)
DECLARE FUNCTION Vxx (Xkt, g, t, Xn, Vx, U0, U1, U2, La, X,
Y, H, VxS)
DECLARE FUNCTION Vzz (Xkt, g, t, Xn, Vz, U0, U1, U2, La, Y, X,
H, VzS, n2)
DECLARE FUNCTION Gamma (n2, dtSdef, dzSdef, XkSr, XnSr,
Gam, U0, h0, R, i)
OPEN "VZ rez" FOR OUTPUT AS #1
CLS : SCREEN 12
go = .915 'плотность материала, г/см3
Pi = 3.14
h0 = .075 'половина межвалкового зазора, см
```

```

Lv = 16 'длина рабочей части валка, см
R = 4 'радиус валка, см
f = 1.2 'фрикция
n = 2
t = 1
FOR n2 = 5 TO 30 STEP 5
' n2 = 25 'частота вращения переднего валка, об/мин
' IF n2 = 5 THEN Tau = 720
' IF n2 = 10 THEN Tau = 490
' IF n2 = 15 THEN Tau = 345
' IF n2 = 20 THEN Tau = 240
' IF n2 = 25 THEN Tau = 170
' IF n2 = 30 THEN Tau = 120
n1 = f * n2 'частота вращения заднего валка, об/мин
U1 = (2 * Pi * n1 * R) / 60 'линейная скорость переднего валка,
см/сек
U2 = (2 * Pi * n2 * R) / 60 'линейная скорость заднего валка, см/сек
U0 = (U1 + U2) / 2 'средняя линейная скорость, см/сек
La = (U1 - U2) / (2 * U0)
Xk0 = .27
Xkk = .43
dXk = -.05
beta = (Xkk - Xk0) / Lv
dX = .02
hXkt = -.05
g = 3
66
SGam = 0
Gam = 0
ipr = 0
it = 0
dtS = 0
dzS = 0
Xkt = Xkk
DO WHILE Xkt > Xk0
it = it + 1
qX = XnXk(Xkt, g, t, Xn)
IF Xn > 5 THEN dXk = dXk + .005: GOTO 44
Kn = SQR(ABS(Xn ^ 2 - R ^ 2))
Kk = SQR(ABS(Xkt ^ 2 - R ^ 2))
alfa(Kn) = ATN(Xn / (SQR(ABS((Xn * SQR(4 * R * h0)) ^ 2 - R ^
2)))) * 180 / Pi

```

```

alfa(Kk) = ATN(Xkt / (SQR(ABS((Xkt * SQR(4 * R * h0)) ^ 2 - R ^
2)))) * 180 / Pi
KNKk = alfa(Kn) + alfa(Kk)
Lokr = 2 * Pi * R
Ldugi = Pi * R * KNKk / 180
dtaui = (Lokr - Ldugi) / U1
dtSdef = 0
dzSdef = 0
FOR X = -Xn TO Xkt STEP dX
H = h0 * (1 + X ^ 2)
qVx = Vxx(Xkt, g, t, Xn, Vx, U0, U1, U2, La, X, Y, H, VxS)
qVz = Vzz(Xkt, g, t, Xn, Vz, U0, U1, U2, La, Y, X, H, VzS, n2)
Vp = SQR(VxS ^ 2 + VzS ^ 2)
alfa = ABS(VxS) / ABS(VzS)
dz = dX / alfa
dS = SQR((dX ^ 2 + dz ^ 2) * SQR(2 * R * h0))
dt = dS / Vp
dzSdef = dzSdef + dz * SQR(2 * R * h0)
dzS = dzS + dz * SQR(2 * R * h0)
dtSdef = dtSdef + dt
dtS = dtS + dt
dSum = dSum + dS
NEXT X
dtSdef = dtSdef + dtaui
Stdef = Stdef + dtSdef
dtS = dtS + dtaui
Xk1 = Xkt
qdeltaX = deltaX(dzS, Xkt, Lv)
XkSr = (Xk1 + Xkt) / 2
Xn1 = Xn
qX = XnXk(Xkt, g, t, Xn)
XnSr = (Xn1 + Xn) / 2
qG = Gamma(n2, dtSdef, dzSdef, XkSr, XnSr, Gam, U0, h0, R, i)
SGam = SGam + Gam
ipr = ipr + i
44
LOOP
PRINT " dzS="; dzS; " dtS="; dtS
PRINT "SGam="; SGam; " n2="; n2
NEXT n2
END
FUNCTION deltaX (dzS, Xkt, Lv)
aa = .26795796#

```

```

b = 2.5275204#
c = -11.109476#
d = -4.1402528#
nt = .00016987554#
Xkt = aa + b / (1 + EXP(-(dzS - c) / d))
EXIT FUNCTION
END FUNCTION
FUNCTION Gamma (n2, dtSdef, dzSdef, XkSr, XnSr, Gam, U0, h0,
R, i)
  XnSr = -1 * XnSr
  g1 = 1.5 * ((1 - (XkSr) ^ 2) * ATN((XkSr - XnSr) / (1 - XnSr *
XkSr)) + ((1 + ((XkSr) ^ 2 * XnSr) / (1 + (XnSr) ^ 2)) - (XkSr) ^ 2)) *
((1 - La) / (1 - L * (1 + (XkSr) ^ 2)))
  g2 = ((1 - 2 * La ^ 2 * (1 + (XkSr) ^ 2)) / 2 * (1 + (XkSr) ^ 2) *
(1 - La ^ 2 * (1 + (XkSr) ^ 2)))
  g3 = (XkSr / (1 + (XkSr) ^ 2)) - XnSr / (1 + (XnSr) ^ 2) + ATN
((XkSr - XnSr) / (1 - XnSr * XkSr))
  g4 = 1 / (2.8 * h0 * dzSdef * (1 + (XkSr) ^ 2) * (XkSr - XnSr))
  gg = (g1 + (g2 * g3)) * g4
  Gam = gg * (n2 / 30)
  Xn = ABS(Xn)
EXIT FUNCTION
END FUNCTION
'**** Расчет скорости Vx*****
FUNCTION Vxx (Xkt, g, t, Xn, Vx, U0, U1, U2, La, X, Y, H, VxS)
CLS : SCREEN 12
Pi = 3.14
h0 = .075 'половина межвалкового зазора, см
R = 4 'радиус валка, см
n = 2
t = 1
dY = .005
77
Yx = 0
Vxi = 0
DO WHILE Yx < H
Nu = Yx / H
q = (2 - X ^ 2 + 3 * Xkt ^ 2) / 2 + Nu * La * (1 + X ^ 2)
Vx = -(U0 / (1 + X ^ 2)) * (3 / 2 * Nu ^ 2 * (X ^ 2 - Xkt ^ 2) + q)
Vxi = Vxi + Vx * dY
Yx = Yx + dY
LOOP
VxS = Vxi / H

```

```

eps = ABS((VxS - VxSi) / VxS)
IF eps < .05 THEN GOTO 78
dY = dY / 2
VxSi = VxS
GOTO 77
END
78
EXIT FUNCTION
END FUNCTION
**** Расчет скорости Vz*****
FUNCTION Vzz (Xkt, g, t, Xn, Vz, U0, U1, U2, La, Y, X, H, VzS, n2)
SCREEN 12
ro = .965 'плотность материала, г/см3
R = 4 'радиус вала, см
h0 = .075 'половина межвалкового зазора, см
n = 2
t = 1
dY = .05
qq = 17
79
Yz = 0
Vzi = 0
DO WHILE Yz < H
Xkt = ABS(Xkt)
A = 6 * Xkt * ATN(Xkt) + 2 * Xkt ^ 2 * (3 * Xkt ^ 2 + 5) / (1 + Xkt ^ 2) ^ 2
w3 = 6 * Xkt * ((X + X ^ 3 + (3 / 5) * X ^ 5 + (1 / 7) * X ^ 7) *
ATN(X) - (8 / 35) * LOG(1 + X ^ 2))
w2 = A * Xkt - 118 / 35 * X * Xkt ^ 2 + A * X ^ 3 - 116 / 35 * Xkt *
X ^ 4 + 3 / 5 * A * X ^ 5 - 6 / 7 * Xkt * X ^ 6 + 1 / 7 * A * X ^ 7 - w3
IF w2 = 0 THEN GOTO 1
w = ((1 + X ^ 2) * ((Yz / H) ^ 2 - 1) * (((-2 * X ^ 2 * (5 + 3 * X ^ 2)) /
(1 + X ^ 2) ^ 2) - (6 * Xkt * ATN(X) + A))) / w2
Vz = (n2 / 30) * 3 * qq * w / 4 * h0 * SQR(2 * R * h0)
Vzi = Vzi + Vz * dY
1 Yz = Yz + dY
LOOP
VzS = Vzi / H
IF ABS(VzS) > (n2 / 30) * 10 THEN VzS = (n2 / 30) * 10
eps = ABS((VzS - VzSi) / VzS)
IF eps < .15 THEN GOTO 80
dY = dY / 2

```

```

VzSi = VzS
GOTO 79
END
80
EXIT FUNCTION
END FUNCTION
FUNCTION XnXk (Xkt, g, t, Xn)
Xk = Xkt
t = 1 / g
e = .009
n = 2
sa1 = 0
**** Расчет интеграла SA ****
n = 2
33
A = Xk
b = -Xk
dX = (b - A) / n
xb = A + dX / 2
sa = 0
FOR i = 0 TO n - 1
Xa = xb + i * dX
IF Xa ^ 2 > Xk ^ 2 THEN af = ((Xa ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + Xa ^ 2) ^
(2 * t + 1))
IF Xa ^ 2 < Xk ^ 2 THEN af = ((Xk ^ 2 - Xa ^ 2) ^ t) / ((1 + Xa ^ 2) ^
(2 * t + 1))
sa = sa + af * dX
epsa = ABS((sa - sa1) / sa)
NEXT i
IF epsa < e THEN GOTO 22 ELSE 11
11 sa1 = sa: n = n ^ 2
GOTO 33
22
**** Расчет интеграла SB ****
eb = .001
sb1 = 0
FOR Xn = .002 TO 10.0002 STEP .05
333
A = Xn
b = Xk
dX = (b - A) / n
xb = A + dX / 2
sb = 0

```

```

FOR i = 0 TO n - 1
  X = xb + i * dX
  IF X ^ 2 > Xk ^ 2 THEN bf = ((X ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^
(2 * t + 1))
  IF X ^ 2 < Xk ^ 2 THEN bf = ((Xk ^ 2 - X ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^
(2 * t + 1))
  sb = sb + bf * dX
  epsb = ABS((sb - sb1) / sb)
NEXT i
IF epsb < eb THEN GOTO 222 ELSE 111
111 sb1 = sb: n = n * 2
GOTO 333
222
eS = .005
IF g = 1 AND Xk < .165 THEN eS = .0001
IF g = 3 THEN eS = .009
epsS = ABS(sa - sb)
IF epsS < eS THEN GOSUB 55 ELSE 56
56
n = 2
NEXT Xn
551 Xkt = Xk
EXIT FUNCTION
55
GOTO 551
END FUNCTION

```

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ЭКСПЕРИМЕНТОВ (к разделу 3)

**П2.1. Определение показателя текучести расплава I**

Температура в цилиндре ИИРТа  $T = 190$  °С. Вес груза  $P = 2,16$  кг.

Время между отбором образцов  $\tau = 60$  с

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
-----------------	---------------	---	-----------------	---------------	---

***Непрерывный процесс переработки на ЭУ первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020***

*Нижнее отборочно-гранулирующее устройство*

Минимальный зазор между валками  $h_0 = 1$  мм

Величина фрикции  $f = 1:1,2$

Диаметр фильеры  $d_\phi = 6$  мм

Частота вращения переднего валка  $u_1 = 5$  об/мин

1	0,1353	1,353	6	0,1381	1,381
2	0,1362	1,362	7	0,1377	1,377
3	0,1400	1,400	8	0,1382	1,382
4	0,1476	1,476	9	0,1388	1,388
5	0,1448	1,448	10	0,1385	1,385

Среднее значение  $I$

1,396

$u_2 = 10$  об/мин

1	0,1619	1,619	6	0,1545	1,545
2	0,1515	1,515	7	0,1519	1,519
3	0,1508	1,508	8	0,1498	1,498
4	0,1462	1,462	9	0,1520	1,520
5	0,1411	1,411	10	0,1550	1,550

Среднее значение  $I$

1,516

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1346	1,346	6	0,1326	1,326
2	0,1395	1,395	7	0,1257	1,257
3	0,1227	1,227	8	0,1227	1,227
4	0,1220	1,220	9	0,1198	1,198
5	0,1201	1,201	10	0,1250	1,250
Среднее значение $I$	1,266				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1243	1,243	6	0,1185	1,185
2	0,1275	1,275	7	0,1166	1,166
3	0,1132	1,132	8	0,1109	1,109
4	0,1156	1,156	9	0,1252	1,252
5	0,1198	1,198	10	0,1205	1,205
Среднее значение $I$	1,196				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1475	1,475	6	0,1423	1,423
2	0,1387	1,387	7	0,1401	1,401
3	0,1316	1,316	8	0,1360	1,360
4	0,1432	1,432	9	0,1450	1,450
5	0,1341	1,341	10	0,1469	1,469
Среднее значение $I$	1,406				

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1386	1,386	6	0,1357	1,357
2	0,1428	1,428	7	0,1465	1,465
3	0,1413	1,413	8	0,1490	1,490
4	0,1353	1,353	9	0,1496	1,496
5	0,1501	1,501	10	0,1450	1,450
Среднее значение $I$	1,435				
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм					
$u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1056	1,056	6	0,1028	1,028
2	0,1135	1,135	7	0,1161	1,161
3	0,1159	1,159	8	0,1174	1,174
4	0,1148	1,148	9	0,1130	1,130
5	0,1198	1,198	10	0,1169	1,169
Среднее значение $I$	1,136				
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1451	1,451	6	0,1487	1,487
2	0,1520	1,520	7	0,1498	1,498
3	0,1536	1,536	8	0,1543	1,543
4	0,1557	1,557	9	0,1572	1,572
5	0,1524	1,524	10	0,1513	1,513
Среднее значение $I$	1,519				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1342	1,342	6	0,1361	1,361
2	0,1387	1,387	7	0,1314	1,314
3	0,1354	1,354	8	0,1438	1,438
4	0,1415	1,415	9	0,1402	1,402
5	0,1469	1,469	10	0,1305	1,305
Среднее значение $I$	1,379				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1023	1,023	6	0,1010	1,010
2	0,0984	0,984	7	0,1056	1,056
3	0,0975	0,975	8	0,0968	0,968
4	0,1049	1,049	9	0,0994	0,994
5	0,1077	1,077	10	0,0966	0,966
Среднее значение $I$	1,011				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,0956	0,956	6	0,0946	0,946
2	0,0987	0,987	7	0,1061	1,061
3	0,1023	1,023	8	0,0925	0,925
4	0,1059	1,059	9	0,0937	0,937
5	0,1014	1,014	10	0,1085	1,085
Среднее значение $I$	1,000				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1026	1,026	6	0,1077	1,077
2	0,1058	1,058	7	0,1041	1,041
3	0,1085	1,085	8	0,1012	1,012
4	0,1039	1,039	9	0,1073	1,073
5	0,1068	1,068	10	0,1019	1,019
Среднее значение $I$	1,049				
Диаметр фильеры $d_\phi = 4$ мм					
$u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1321	1,321	6	0,1262	1,262
2	0,1304	1,304	7	0,1305	1,305
3	0,1287	1,287	8	0,1276	1,276
4	0,1345	1,345	9	0,1323	1,323
5	0,1249	1,249	10	0,1251	1,251
Среднее значение $I$	1,292				
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1486	1,486	6	0,1462	1,462
2	0,1529	1,529	7	0,1537	1,537
3	0,1471	1,471	8	0,1493	1,493
4	0,1515	1,515	9	0,1545	1,545
5	0,1508	1,508	10	0,1456	1,456
Среднее значение $I$	1,500				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1217	1,217	6	0,1245	1,245
2	0,1186	1,186	7	0,1162	1,162
3	0,1171	1,171	8	0,1178	1,178
4	0,1243	1,243	9	0,1204	1,204
5	0,1210	1,210	10	0,1229	1,229
Среднее значение $I$	1,205				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1060	1,060	6	0,1107	1,107
2	0,1098	1,098	7	0,1132	1,132
3	0,1113	1,113	8	0,1040	1,040
4	0,1069	1,069	9	0,1086	1,086
5	0,1075	1,075	10	0,1081	1,081
Среднее значение $I$	1,087				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1210	1,210	6	0,1251	1,251
2	0,1202	1,202	7	0,1187	1,187
3	0,1239	1,239	8	0,1195	1,195
4	0,1176	1,176	9	0,1263	1,263
5	0,1248	1,248	10	0,1259	1,259
Среднее значение $I$	1,223				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_6 = 30$ об/мин					
1		1,287	6		1,271
2		1,262	7		1,284
3		1,215	8		1,299
4		1,248	9		1,233
5		1,220	10		1,206
Среднее значение $I$	1,250				
<i>Нижнее отборочно-гранулирующее устройство</i>					
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм					
Величина фрикции $f = 1:1,2$					
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм					
Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1604	1,604	6	0,1649	1,649
2	0,1592	1,592	7	0,1641	1,641
3	0,1630	1,630	8	0,1612	1,612
4	0,1672	1,672	9	0,1520	1,520
5	0,1483	1,483	10	0,1446	1,446
Среднее значение $I$	1,587				
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1734	1,734	6	0,1803	1,803
2	0,1720	1,720	7	0,1711	1,711
3	0,1688	1,688	8	0,1683	1,683
4	0,1662	1,662	9	0,1583	1,583
5	0,1591	1,591	10	0,1475	1,475
Среднее значение $I$	1,660				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1390	1,390	6	0,1374	1,374
2	0,1330	1,330	7	0,1497	1,497
3	0,1457	1,457	8	0,1518	1,518
4	0,1378	1,378	9	0,1229	1,229
5	0,1306	1,306	10	0,1287	1,287
Среднее значение $I$	1,380				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1352	1,352	6	0,1172	1,172
2	0,1226	1,226	7	0,1120	1,120
3	0,1240	1,240	8	0,1322	1,322
4	0,1355	1,355	9	0,1296	1,296
5	0,1193	1,193	10	0,1266	1,266
Среднее значение $I$	1,257				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1329	1,329	6	0,1424	1,424
2	0,1411	1,411	7	0,1322	1,322
3	0,1354	1,354	8	0,1346	1,346
4	0,1236	1,236	9	0,1251	1,251
5	0,1335	1,335	10	0,1293	1,293
Среднее значение $I$	1,332				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1492	1,492	6	0,1462	1,462
2	0,1388	1,388	7	0,1530	1,530
3	0,1485	1,485	8	0,1374	1,374
4	0,1545	1,545	9	0,1457	1,457
5	0,1506	1,506	10	0,1495	1,495
Среднее значение $I$	1,475				
Минимальный зазор между валками $h_0 = 2$ мм					
$u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1615	1,615	6	0,1510	1,510
2	0,1743	1,743	7	0,1367	1,367
3	0,1375	1,375	8	0,1316	1,316
4	0,1550	1,550	9	0,1410	1,410
5	0,1536	1,536	10	0,1506	1,506
Среднее значение $I$	1,499				
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1574	1,574	6	0,1696	1,696
2	0,1744	1,744	7	0,1712	1,712
3	0,1686	1,686	8	0,1590	1,590
4	0,1433	1,433	9	0,1553	1,553
5	0,1406	1,406	10	0,1638	1,638
Среднее значение $I$	1,608				

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1629	1,629	6	0,1485	1,485
2	0,1344	1,344	7	0,1392	1,392
3	0,1185	1,185	8	0,1250	1,250
4	0,1064	1,064	9	0,1022	1,022
5	0,1425	1,425	10	0,1486	1,486
Среднее значение $I$	1,345				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1004	1,004	6	0,1387	1,387
2	0,1528	1,528	7	0,1061	1,061
3	0,1157	1,157	8	0,1065	1,065
4	0,1042	1,042	9	0,1011	1,011
5	0,1353	1,353	10	0,1325	1,325
Среднее значение $I$	1,211				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1057	1,057	6	0,1253	1,253
2	0,1158	1,158	7	0,1132	1,132
3	0,1264	1,264	8	0,1417	1,417
4	0,1379	1,379	9	0,1363	1,363
5	0,1533	1,533	10	0,1585	1,585
Среднее значение $I$	1,327				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1484	1,484	6	0,1481	1,481
2	0,1468	1,468	7	0,1467	1,467
3	0,1464	1,464	8	0,1422	1,422
4	0,1428	1,428	9	0,1364	1,364
5	0,1333	1,333	10	0,1325	1,325
Среднее значение $I$	1,425				
<i>Нижнее отборочно-гранулирующее устройство</i>					
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм					
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм					
Величина фрикции $f = 1:1$					
Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1602	1,602	6	0,1725	1,725
2	0,1486	1,486	7	0,1374	1,374
3	0,1470	1,470	8	0,1569	1,569
4	0,1394	1,394	9	0,1418	1,418
5	0,1476	1,476	10	0,1542	1,542
Среднее значение $I$	1,509				

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1508	1,508	6	0,1674	1,674
2	0,1726	1,726	7	0,1602	1,602
3	0,1302	1,302	8	0,1377	1,377
4	0,1308	1,308	9	0,1451	1,451
5	0,1447	1,447	10	0,1555	1,555
Среднее значение $I$	1,501				
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1443	1,443	6	0,1685	1,685
2	0,1272	1,272	7	0,1086	1,086
3	0,1522	1,522	8	0,1298	1,298
4	0,1296	1,296	9	0,1358	1,358
5	0,1340	1,340	10	0,1422	1,422
Среднее значение $I$	1,381				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1484	1,484	6	0,1380	1,380
2	0,1214	1,214	7	0,1304	1,304
3	0,1186	1,186	8	0,1168	1,168
4	0,1212	1,212	9	0,1225	1,225
5	0,1257	1,257	10	0,1295	1,295
Среднее значение $I$	1,276				

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1297	1,297	6	0,1417	1,417
2	0,1785	1,785	7	0,1328	1,328
3	0,1513	1,513	8	0,1273	1,273
4	0,1474	1,474	9	0,1178	1,178
5	0,1361	1,361	10	0,1477	1,477
Среднее значение $I$	1,419				
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1433	1,433	6	0,1344	1,344
2	0,1596	1,596	7	0,1290	1,290
3	0,1216	1,216	8	0,1168	1,168
4	0,1180	1,180	9	0,1170	1,170
5	0,1241	1,241	10	0,1375	1,375
Среднее значение $I$	1,308				
Величина фрикции $f = 1:1,36$					
$u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1685	1,685	6	0,1621	1,621
2	0,1409	1,409	7	0,1640	1,640
3	0,1496	1,496	8	0,1450	1,450
4	0,1546	1,546	9	0,1635	1,635
5	0,1505	1,505	10	0,1621	1,621
Среднее значение $I$	1,563				

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1616	1,616	6	0,1614	1,614
2	0,1721	1,721	7	0,1719	1,719
3	0,1740	1,740	8	0,1675	1,675
4	0,1711	1,711	9	0,1801	1,801
5	0,1647	1,647	10	0,1755	1,755
Среднее значение $I$	1,701				
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1701	1,701	6	1,710	1,710
2	0,1604	1,604	7	1,431	1,431
3	0,1436	1,436	8	1,541	1,541
4	0,1523	1,523	9	1,545	1,545
5	0,1539	1,539	10	1,587	1,587
Среднее значение $I$	1,564				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1546	1,546	6	0,1351	1,351
2	0,1329	1,329	7	0,1643	1,643
3	0,1624	1,624	8	0,1381	1,381
4	0,1400	1,400	9	0,1616	1,616
5	0,1453	1,453	10	0,1531	1,531
Среднее значение $I$	1,492				

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1499	1,499	6	0,1601	1,601
2	0,1511	1,511	7	0,1501	1,501
3	0,1411	1,411	8	0,1372	1,372
4	0,1321	1,321	9	0,1275	1,275
5	0,1386	1,386	10	0,1494	1,494
Среднее значение $I$	1,440				
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1412	1,412	6	0,1381	1,381
2	0,1428	1,428	7	0,1399	1,399
3	0,1405	1,405	8	0,1446	1,446
4	0,1437	1,437	9	0,1423	1,423
5	0,1450	1,450	10	0,1419	1,419
Среднее значение $I$	1,420				
<i>Боковое отборочно-гранулирующее устройство</i>					
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм					
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм					
Величина фрикции $f = 1:1,2$					
Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин					
1	0,1676	1,676	6	0,1730	1,730
2	0,1696	1,696	7	0,1690	1,690
3	0,1704	1,704	8	0,1701	1,701

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10мин
4	0,1700	1,700	9	0,1736	1,736
5	0,1696	1,696	10	0,1662	1,662
Среднее значение $I$	1,699				
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,1726	1,726	6	0,1682	1,682
2	0,1696	1,696	7	0,1692	1,692
3	0,1734	1,734	8	0,1635	1,635
4	0,1613	1,613	9	0,1597	1,597
5	0,1639	1,639	10	0,1707	1,707
Среднее значение $I$	1,673				
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,1713	1,713	6	0,1665	1,665
2	0,1671	1,671	7	0,1598	1,598
3	0,1496	1,496	8	0,1747	1,747
4	0,1635	1,635	9	0,1525	1,525
5	0,1622	1,622	10	0,1646	1,646
Среднее значение $I$	1,634				
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,1809	1,809	6	0,1697	1,697
2	0,1592	1,592	7	0,1770	1,770
3	0,1783	1,783	8	0,1740	1,740
4	0,1441	1,441	9	0,1422	1,422

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
5	0,1605	1,605	10	0,1723	1,723
Среднее значение $I$	1,664				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,1574	1,574	6	0,1611	1,611
2	0,1707	1,707	7	0,1588	1,588
3	0,1544	1,544	8	0,1516	1,516
4	0,1468	1,468	9	0,1465	1,465
5	0,1497	1,497	10	0,1625	1,625
Среднее значение $I$	1,561				
$u_6 = 30$ об/мин					
1	0,1510	1,510	6	0,1497	1,497
2	0,1502	1,502	7	0,1467	1,467
3	0,1495	1,495	8	0,1527	1,527
4	0,1466	1,466	9	0,1394	1,394
5	0,1442	1,442	10	0,1524	1,524
Среднее значение $I$	1,483				
<b>Непрерывный процесс переработки на ЭУ пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления</b>					
<i>Боковое отборочно-гранулирующее устройство</i>					
Диаметр фильеры $d_{\phi} = 5$ мм					
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм					
Величина фрикции $f = 1:1,2$					
Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин					
1			0,2386		

Продолжение табл. П2.1

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
2	0,2412	2,412	7	0,2351	2,351
3	0,2379	2,379	8	0,2443	2,443
4	0,2424	2,424	9	0,2410	2,410
5	0,2415	2,415	10	0,2344	2,344
Среднее значение $I$	2,394				
$u_2 = 10$ об/мин					
1	0,2432	2,432	6	0,2456	2,456
2	0,2517	2,517	7	0,2494	2,494
3	0,2489	2,489	8	0,2548	2,548
4	0,2524	2,524	9	0,2524	2,524
5	0,2565	2,565	10	0,2430	2,430
Среднее значение $I$	2,500				
$u_3 = 15$ об/мин					
1	0,2393	2,393	6	0,2378	2,378
2	0,2423	2,423	7	0,2352	2,352
3	0,2390	2,390	8	0,2344	2,344
4	0,2385	2,385	9	0,2426	2,426
5	0,2376	2,376	10	0,2385	2,385
Среднее значение $I$	2,385				

Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин	Номера образцов	Масса $m$ , г	Показатель текучести расплава, $I$ , г/10 мин
$u_4 = 20$ об/мин					
1	0,2291	2,291	6	0,2245	2,245
2	0,2330	2,330	7	0,2280	2,280
3	0,2266	2,266	8	0,2283	2,283
4	0,2294	2,294	9	0,2270	2,270
5	0,2273	2,273	10	0,2296	2,296
Среднее значение $I$	2,283				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	0,2560	2,560	6	0,2566	2,566
2	0,2584	2,584	7	0,2541	2,541
3	0,2533	2,533	8	0,2566	2,566
4	0,2622	2,622	9	0,2543	2,543
5	0,2557	2,557	10	0,2589	2,589
Среднее значение $I$	2,566				
$u_6 = 30$ об/мин					
1		2,721	6		2,704
2		2,648	7		2,652
3		2,675	8		2,719
4		2,697	9		2,636
5		2,660	10		2,624
Среднее значение $I$	2,674				

**П2.2. Определение предела текучести при растяжении  $\sigma_t$ ,  
предела прочности при разрыве  $\sigma_p$ ,  
относительного удлинения при разрыве  $\epsilon$**

Ширина рабочей части  $b = 3,5$  мм; толщина рабочей части  $h = 2$  мм;  
начальная база образца  $l_0 = 16$  мм

Номера образцов	$P_t$ , кГс	$\sigma_t$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
-----------------	-------------	------------------	-------------	------------------	-----------------	----------------

*Непрерывный процесс переработки на ЭУ  
первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020*

*Нижнее отборочно-гранулирующее устройство*

Минимальный зазор между валками  $h_0 = 1$  мм

Величина фрикции  $f = 1:1,2$

Диаметр фильеры  $d_\phi = 6$  мм

Частота вращения переднего валка  $u_1 = 5$  об/мин

1	6,25	8,93	8,3	11,86	103	643,8
2	6,45	9,21	9	12,86	107	668,8
3	6,4	9,14	8,9	12,71	106	662,5
4	6,25	8,93	8,7	12,43	107	668,8
5	6,2	8,86	8,7	12,43	105	656,3
Среднее значение		9,02		12,46		660,1

$u_2 = 10$  об/мин

1	6	8,57	8	11,43	101	631,3
2	6,15	8,79	7,9	11,29	94	587,5
3	6,15	8,79	8,4	12	104	650
4	6	8,57	7,9	11,29	99	618,8
5	6	8,57	8,1	11,57	103	643,8
Среднее значение		8,66		11,52		626,7

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$n_3 = 15$ об/мин						
1	6,2	8,86	8,7	12,43	107	668,8
2	6	8,57	9,1	13	110	687,5
3	6,3	9	9,3	13,29	108	675
4	6,1	8,71	9,1	13	106	662,5
5	6,3	9	8,9	12,71	110	687,5
Среднее значение		8,83		12,89		676,3
$n_4 = 20$ об/мин						
1	6,1	8,71	9,4	13,43	112	700
2	6	8,57	9,5	13,57	114	712,5
3	6	8,57	9,6	13,71	116	725
4	6,1	8,71	9,4	13,43	111	693,8
5	6,1	8,71	9,1	13	109	681,3
Среднее значение		8,65		13,43		702,7
$n_5 = 25$ об/мин						
1	6,1	8,71	8,9	12,71	98	612,5
2	6,3	9	9,1	13	104	650
3	6	8,57	9,4	13,43	110	687,5
4	6,2	8,86	8,7	12,43	105	656,3
5	6,2	8,86	8,8	12,57	107	668,8
Среднее значение		8,8		12,83		655,5
$n_6 = 30$ об/мин						
1	6,2	8,86	8,7	12,43	99	618,8
2	6,1	8,71	8,6	12,29	101	631,3
3	6,2	8,86	8,8	12,57	107	668,8
4	6	8,57	8,5	12,14	102	637,5
5	6,1	8,71	8,9	12,71	105	656,3
Среднее значение		8,74		12,43		642,8

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
Диаметр фильеры $d_\Phi = 5\text{мм}$						
$u_1 = 5$ об/мин						
1	6,55	9,36	8,4	12	105	656,3
2	6,6	9,43	8,2	11,7	94	587,5
3	6,5	9,3	8,6	12,29	107	668,8
4	6,55	9,36	8,7	12,43	104	650
5	6,4	9,14	8,4	12	98	612,5
Среднее значение		9,32		12,09		635,9
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,4	9,14	8	11,43	95	593,8
2	6,5	9,3	8,6	12,29	99	618,8
3	6,4	9,14	8,5	12,14	98	612,5
4	6,6	9,43	8,3	11,86	96	600
5	6,15	8,79	8	11,43	93	581,3
Среднее значение		9,2		11,83		601,5
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,45	9,21	8,4	12	93	581,3
2	6,5	9,3	9,5	13,57	107	668,8
3	6,35	9,07	9,4	13,43	109	681,3
4	6,5	9,3	9	12,86	102	637,5
5	6,2	8,86	8,9	12,71	107	668,8
Среднее значение		9,15		12,91		648,6
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,4	9,14	9,3	13,29	109	681,3
2	6,45	9,21	9,7	13,86	125	781,3
3	6,4	9,14	8,7	12,43	111	693,8
4	6,4	9,14	9,8	14	127	793,8
5	6,4	9,14	9,5	13,57	116	725
Среднее значение		9,15		13,44		736,4

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,45	9,21	9	12,86	100	625
2	6,5	9,3	9,3	13,29	102	637,5
3	6,35	9,07	8,8	12,57	104	650
4	6,4	9,14	8,6	12,29	98	612,5
5	6,4	9,14	8,7	12,43	101	631,3
Среднее значение		9,17		12,69		631,5
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,25	8,93	8,6	12,29	98	612,5
2	6,2	8,86	8,8	12,57	104	650
3	6,2	8,86	9,1	13	108	675
4	6,25	8,93	8,5	12,14	96	600
5	6,25	8,93	8,7	12,43	103	643,8
Среднее значение		8,9		12,49		637
Диаметр фильеры $d_\phi = 4$ мм						
$u_1 = 5$ об/мин						
1	6,55	9,36	8,1	11,57	97	606,3
2	6,35	9,07	8,6	12,29	107	668,8
3	6,45	9,21	8,9	12,71	111	693,8
4	6,45	9,21	8,4	12	96	600
5	6,4	9,14	8,8	12,57	105	656,3
Среднее значение		9,2		12,23		640,6
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,4	9,14	8,1	11,57	105	656,3
2	6,45	9,21	8,3	11,86	106	662,5
3	6,35	9,07	8,1	11,57	106	662,5
4	6,55	9,36	8,9	12,71	116	725
5	6,4	9,14	8,3	11,86	110	687,5
Среднее значение		9,18		11,91		679,5

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,45	9,21	9,5	13,57	121	756,3
2	6,55	9,36	9,5	13,57	119	743,8
3	6,4	9,14	9,45	13,5	122	762,5
4	6,4	9,14	9,8	14	125	781,3
5	6,35	9,07	9,75	13,93	124	775
Среднее значение		9,18		13,71		763,9
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,4	9,14	9,4	13,43	124	775
2	6,2	8,86	9,7	13,86	128	800
3	6,3	9	9,8	14	127	793,8
4	6,4	9,14	9,5	13,57	121	756,3
5	6,3	9	9,4	13,43	119	743,8
Среднее значение		9,03		13,66		774,1
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,25	8,93	8,8	12,57	110	687,5
2	6,35	9,07	9	12,86	117	731,3
3	6,35	9,07	8,7	12,43	113	706,3
4	6,35	9,07	8,9	12,71	116	725
5	6,15	8,79	8,7	12,43	115	718,8
Среднее значение		8,99		12,6		713,9
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,15	8,79	8,6	12,29	111	693,8
2	6,25	8,93	8,9	12,71	115	718,8
3	6,25	8,93	8,6	12,29	110	687,5
4	6,3	9	8,7	12,43	114	712,5
5	6,15	8,79	8,5	12,14	109	681,3
Среднее значение		8,89		12,37		699,2

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
<i>Нижнее отборочно-гранулирующее устройство</i>						
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм						
Величина фрикции $f = 1:1,2$						
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм						
Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин						
1	6,3	9	9,35	13,36	103	643,8
2	6,6	9,43	9,5	13,57	109	681,3
3	6,25	8,93	8,8	12,57	102	637,5
4	6,25	8,93	8,7	12,43	104	650
5	6,25	8,93	9,3	13,29	108	675
Среднее значение		9,05		13,05		657,8
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,25	8,93	8,3	11,86	100	625
2	6,2	8,86	8,15	11,64	99	618,8
3	5,95	8,5	7,9	11,29	87	543,8
4	6,1	8,71	9,1	13	108	675
5	6,3	9	8,4	12	94	587,5
Среднее значение		8,8		11,97		611,6
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,3	9	9,5	13,57	107	668,8
2	6,1	8,71	9	12,86	105	656,3
3	6,3	9	8,95	12,79	105	656,3
4	6,45	9,21	9,25	13,21	109	681,3
5	6,85	9,79	9,8	14	102	637,5
Среднее значение		9,15		13,29		660,2

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,35	9,07	9,35	13,36	106	662,5
2	6,25	8,93	9,9	14,14	119	743,8
3	6,35	9,07	9,9	14,14	118	737,5
4	6,6	9,43	9,75	13,93	111	693,8
5	6,5	9,29	9,4	13,43	108	675
Среднее значение		9,16		13,8		703,3
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,25	8,93	9,7	13,86	111	693,8
2	6,3	9	9,7	13,86	110	687,5
3	6,35	9,07	8,9	12,71	102	637,5
4	6,2	8,86	8,95	12,79	103	643,8
5	6,2	8,86	9,4	13,43	101	631,3
Среднее значение		8,94		13,34		659,3
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,3	9	9	12,86	100	625
2	6,25	8,93	8,7	12,43	101	631,3
3	6,3	9	8,6	12,29	100	625
4	6,3	9	9,2	13,14	107	668,8
5	6	8,57	8,7	12,43	104	650
Среднее значение		8,9		12,63		640,2
Минимальный зазор между вальками $h_0 = 2$ мм						
$u_1 = 5$ об/мин						
1	6,25	8,93	8,4	12	103	643,8
2	6,25	8,93	8,7	12,43	101	631,3
3	6,2	8,86	8,5	12,14	105	656,3
4	6,55	9,36	9,1	13	102	637,5
5	6,5	9,29	8,9	12,71	101	631,3
Среднее значение		9,08		12,46		640,1

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,1	8,71	8,2	11,71	97	606,3
2	6,15	8,79	8,15	11,64	95	593,8
3	6,15	8,79	8,1	11,57	97	606,3
4	6	8,57	7,9	11,29	92	575
5	6,1	8,71	8,2	11,71	98	612,5
Среднее значение		8,71		11,59		598,9
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,15	8,79	8,9	12,71	104	650
2	6,25	8,93	9,3	13,29	107	668,8
3	6,3	9	9,1	13	105	656,3
4	6,35	9,07	9	12,86	106	662,5
5	6,5	9,29	9,4	13,43	110	687,5
Среднее значение		9,02		13,06		665,1
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,3	9	9,4	13,43	107	668,8
2	6,35	9,07	9,3	13,29	105	656,3
3	6,15	8,79	9,6	13,71	112	700
4	6,25	8,93	9,5	13,57	111	693,8
5	6,15	8,79	9,7	13,86	115	718,8
Среднее значение		8,92		13,57		687,9
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,15	8,79	8,8	12,57	103	643,8
2	6,25	8,93	8,9	12,71	108	675
3	6,5	9,29	9,2	13,14	111	693,8
4	6,3	9	8,7	12,43	104	650
5	6,2	8,86	9,3	13,29	109	681,3
Среднее значение		8,98		12,83		669

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,1	8,71	8,3	11,86	99	618,8
2	6,1	8,71	8,8	12,57	100	625
3	6,25	8,93	8,4	12	102	637,5
4	6,1	8,71	8,2	11,71	100	625
5	6,1	8,71	8,15	11,64	100	625
Среднее значение		8,75		11,96		626,3
<i>Нижнее отборочно-гранулирующее устройство</i>						
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм						
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм						
Величина фрикции $f = 1:1$						
Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин						
1	6,7	9,57	8,7	12,43	98	612,5
2	6,6	9,43	8,8	12,57	96	600
3	6,6	9,43	8,9	12,71	99	618,8
4	6,75	9,64	9,6	13,71	105	656,3
5	6,55	9,36	9,25	13,21	98	612,5
Среднее значение		9,49		12,93		620,3
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,65	9,5	8,5	12,14	88	550
2	6,45	9,21	9,2	13,14	106	662,5
3	6,4	9,14	8,7	12,43	93	581,3
4	6,6	9,43	9,1	13	104	650
5	6,2	8,86	8,2	11,71	90	562,5
Среднее значение		9,23		12,5		603

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,2	8,86	8,9	12,71	103	643,8
2	6,5	9,29	9,5	13,57	108	675
3	6,25	8,93	8,7	12,43	99	618,8
4	6,55	9,36	9,4	13,43	106	662,5
5	6,4	9,14	9,7	13,86	107	668,8
Среднее значение		9,12		13,21		654,1
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,4	9,14	9,4	13,43	105	656,3
2	6,3	9	9,6	13,71	108	675
3	6,2	8,86	9,1	13	106	662,5
4	6,3	9	9,5	13,57	109	681,3
5	6,3	9	9,3	13,29	104	650
Среднее значение		9		13,4		665,1
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,6	9,43	9,5	13,57	107	668,8
2	6,45	9,21	8,8	12,57	100	625
3	6,25	8,93	9,1	13	104	650
4	6,5	9,29	8,8	12,57	98	612,5
5	6,35	9,07	9,3	13,29	103	643,8
Среднее значение		9,19		13		640,3
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,15	8,79	8,7	12,43	97	606,3
2	6,5	9,29	8,6	12,29	95	593,8
3	6,3	9	8,9	12,71	102	637,5
4	6,2	8,86	8,7	12,43	99	618,8
5	6,35	9,07	8,6	12,29	99	618,8
Среднее значение		9		12,43		615,2

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
Величина фрикции $f = 1:1,36$						
$u_1 = 5$ об/мин						
1	6,55	9,36	8,9	12,71	95	593,8
2	6,6	9,43	9,1	13	96	600
3	6,35	9,07	9,5	13,57	106	662,5
4	6,3	9	9,5	13,57	105	656,3
5	6,4	9,14	9,2	13,14	104	650
Среднее значение		9,2		13,2		633,2
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,35	9,07	8,8	12,57	97	606,3
2	6,15	8,79	9,1	13	101	631,3
3	6,3	9	8,7	12,43	95	593,8
4	6,2	8,86	9,0	12,86	100	625
5	6,45	9,21	8,6	12,29	98	612,5
Среднее значение		8,99		12,63		613,9
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,0	8,57	8,9	12,71	101	631,3
2	6,05	8,64	9,3	13,29	107	668,8
3	6,25	8,93	9,4	13,43	104	650
4	6,0	8,57	9,1	13	102	637,5
5	6,3	9	9,0	12,86	100	625
Среднее значение		8,74		13,06		642,7
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,2	8,86	9,3	13,29	105	656,3
2	6,35	9,07	9,8	14	110	687,5
3	6,1	8,71	8,9	12,71	105	656,3
4	6,1	8,71	8,7	12,43	98	612,5
5	6,0	8,57	9,3	13,29	102	637,5
Среднее значение		8,79		13,16		650,5

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,2	8,86	8,9	12,71	98	612,5
2	6,2	8,86	8,8	12,57	100	625
3	6,05	8,64	8,7	12,43	99	618,8
4	5,9	8,43	8,6	12,29	100	625
5	5,95	8,5	9,3	13,29	104	650
Среднее значение		8,66		12,66		626,4

$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,3	9	8,4	12	93	581,3
2	6,0	8,57	8,7	12,43	106	662,5
3	5,9	8,43	8,5	12,14	88	550
4	5,8	8,29	8,3	11,86	90	562,5
5	6,1	8,71	8,6	12,29	104	650
Среднее значение		8,6		12,15		603

*Боковое отборочно-гранулирующее устройство*

Диаметр фильеры  $d_\phi = 5$  мм

Минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм

Величина фрикции  $f = 1:1,2$

Частота вращения переднего валка $u_1 = 5$ об/мин						
1	6,6	9,43	8,8	12,57	100	625
2	6,35	9,07	8,9	12,71	105	656,3
3	6,3	9	8,7	12,43	98	612,5
4	6,45	9,21	8,9	12,71	107	668,8
5	6,5	9,29	8,8	12,57	103	643,8
Среднее значение		9,2		12,6		641,6

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_2 = 10$ об/мин						
1	6,4	9,14	8,5	12,14	97	606,3
2	6,2	8,86	8,6	12,29	100	625
3	6,4	9,14	8,3	11,86	95	593,8
4	6,1	8,71	8,5	12,14	98	612,5
5	6,35	9,07	8,6	12,29	99	618,8
Среднее значение		8,99		12,15		611,4
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,5	9,29	9,4	13,43	108	675
2	6,5	9,29	9,4	13,43	110	687,5
3	6,3	9	9,4	13,43	111	693,8
4	6,5	9,29	8,9	12,71	105	656,3
5	6,3	9	9,2	13,14	106	662,5
Среднее значение		9,18		13,23		675,2
$u_4 = 20$ об/мин						
1	6,5	9,29	9,9	14,14	120	750
2	6,35	9,07	9,8	14	115	718,8
3	6,6	9,43	9,7	13,86	113	706,3
4	6,35	9,07	10	14,29	118	737,5
5	6,3	9	9,7	13,86	112	700
Среднее значение		9,17		14,03		722,8
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,35	9,07	9,1	13	105	656,3
2	6,4	9,14	9,4	13,43	110	687,5
3	6,2	8,86	9,3	13,29	102	637,5
4	6,3	9	9,5	13,57	108	675
5	6,3	9	9,1	13	108	675
Среднее значение		9,01		13,26		666,5

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,25	8,93	9,1	13	104	650
2	6,25	8,93	8,8	12,57	100	625
3	6,4	9,14	8,7	12,43	99	618,8
4	6,2	8,86	8,6	12,29	99	618,8
5	6,4	9,14	8,8	12,57	103	643,8
Среднее значение		9		12,57		631,4

**Непрерывный процесс переработки на ЭУ пленочных отходов  
ПЭНП производственного и общественного потребления**

*Боковое отборочно-гранулирующее устройство*

Диаметр фильеры  $d_\phi = 5$  мм

Минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм

Величина фрикции  $f = 1:1,2$

Частота вращения переднего валка  $u_1 = 5$  об/мин

1	6,75	9,64	8,2	11,71	101	631,3
2	7,0	10	8,15	11,64	93	581,3
3	6,9	9,86	8,4	12	88	550
4	6,8	9,71	7,95	11,36	90	562,5
5	6,8	9,71	8,5	12,14	104	650
6	6,75	9,64	8,3	11,86	100	625
7	6,8	9,71	8,4	12	96	600
Среднее значение		9,75		11,82		601

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_2 = 10$ об/мин						
1	7,2	10,29	8,2	11,71	89	556,3
2	6,95	9,93	7,9	11,29	91	568,8
3	6,9	9,86	8,2	11,71	95	593,8
4	7,3	10,43	8,1	11,57	94	587,5
5	7,2	10,29	8,2	11,71	90	562,5
6	7,0	10	8,4	12	93	581,3
7	7,2	10,29	8,3	11,86	94	587,5
Среднее значение		10,16		11,69		577,1
$u_3 = 15$ об/мин						
1	6,9	9,86	8,5	12,14	96	600
2	7,0	10	9,2	13,14	107	668,8
3	7,1	10,14	9,2	13,14	106	662,5
4	7,0	10	8,7	12,43	98	612,5
5	7,0	10	9,1	13	101	631,3
6	7,1	10,14	9,3	13,29	106	662,5
7	6,8	9,71	9,4	13,43	108	675
Среднее значение		9,98		12,95		645,2
$u_4 = 20$ об/мин						
1						
2	6,8	9,71	9,4	13,43	108	675
3	6,9	9,86	9,3	13,29	106	662,5
4	6,95	9,93	8,9	12,71	105	656,3
5	6,75	9,64	9,4	13,43	109	681,3
6	6,8	9,71	9,3	13,29	108	675
7	6,75	9,64	9,3	13,29	107	668,8
	7,0	10	9,6	13,71	111	693,8
Среднее значение		9,78		13,31		673,3

Продолжение табл. П2.2

Номера образцов	$P_T$ , кГс	$\sigma_T$ , МПа	$P_p$ , кГс	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l$ , мм	$\epsilon$ , %
$u_5 = 25$ об/мин						
1	6,9	9,86	8,7	12,43	98	612,5
2	6,95	9,93	8,9	12,71	102	637,5
3	7,0	10	8,8	12,57	101	631,3
4	7,0	10	8,5	12,14	96	600
5	7,0	10	8,7	12,43	97	606,3
6	6,95	9,9,	8,7	12,43	100	625
7	6,9	9,86	8,8	12,57	99	618,8
Среднее значение		9,94		12,47		618,9
$u_6 = 30$ об/мин						
1	6,9	9,86	8,5	12,14	98	612,5
2	6,85	9,79	8,5	12,14	95	593,8
3	7,1	10,14	8,4	12	97	606,3
4	6,9	9,86	8,6	12,29	96	600
5	6,9	9,86	8,5	12,14	102	637,5
6	6,95	9,93	8,7	12,43	98	612,5
7	7,0	10	8,4	12	94	587,5
Среднее значение		9,92		12,16		607,3

### П2.3. Определение производительности $Q$

Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин	Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин
---------------	---------------	---	--------------------------------	---------------	---------------	---	--------------------------------

*Нижнее отборочно-гранулирующее устройство*

Диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм

Минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм

Величина фрикции  $f = 1:1,2$

Частота вращения переднего валка  $u_1 = 5$  об/мин

1	4,8	10	0,48	6	4,8	10	0,48
2	4,6		0,46	7	4,6		0,46
3	4,4		0,44	8	4,5		0,45
4	4,8		0,48	9	4,7		0,47
5	4,7		0,47	10	4,6		0,46
Среднее значение $Q$		0,47					

$u_2 = 10$  об/мин

1	4,5	6	0,75	6	4,4	6	0,73
2	4,5		0,75	7	4,5		0,75
3	4,7		0,78	8	4,6		0,77
4	4,8		0,80	9	4,8		0,80
5	4,6		0,77	10	4,7		0,78
Среднее значение $Q$		0,77					

Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин	Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин
$u_3 = 15$ об/мин							
1	4,8	4	1,20	6	4,6	4	1,15
2	4,6		1,15	7	4,7		1,18
3	4,6		1,15	8	4,6		1,15
4	4,7		1,18	9	4,6		1,15
5	4,5		1,13	10	4,6		1,15
Среднее значение $Q$		1,16					
$u_4 = 20$ об/мин							
1	5,1	3	1,70	6	5,1	3	1,7
2	5,0		1,67	7	4,9		1,63
3	4,8		1,60	8	5,0		1,67
4	4,9		1,63	9	5,2		1,73
5	5,0		1,67	10	4,8		1,60
Среднее значение $Q$		1,66					
$u_5 = 25$ об/мин							
1	4,5	2	2,25	6	4,5	2	2,25
2	4,4		2,20	7	4,6		2,30
3	4,3		2,15	8	4,4		2,20
4	4,6		2,30	9	4,7		2,35
5	4,4		2,20	10	4,5		2,25
Среднее значение $Q$		2,25					

Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин	Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин
---------------	---------------	---	--------------------------------	---------------	---------------	---	--------------------------------

$u_6 = 30$  об/мин

1	5,9	2	2,95	6	5,9	2	2,95
2	6,0		3,00	7	6,2		3,10
3	5,8		2,90	8	6,1		3,05
4	5,7		2,85	9	5,8		2,90
5	6,1		3,05	10	6,0		3,00

Среднее значение  $Q$

2,98

*Боковое отборочно-гранулирующее устройство*

Диаметр фильеры  $d_{\phi} = 5$  мм

Минимальный зазор между валками  $h_0 = 1,5$  мм

Величина фрикции  $f = 1:1,2$

Частота вращения переднего валка

$u_1 = 5$  об/мин

1	10,4	7	1,49	6	10,5	7	1,50
2	10,6		1,51	7	10,4		1,49
3	10,2		1,46	8	10,4		1,49
4	10,4		1,49	9	10,6		1,51
5	10,7		1,53	10	10,8		1,54

Среднее значение  $Q$

1,50

Продолжение табл. П2.3

Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин	Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин
$u_2 = 10$ об/мин							
1	9,7	4	2,43	6	9,5	4	2,38
2	9,5		2,38	7	9,4		2,35
3	9,7		2,43	8	9,5		2,38
4	9,3		2,33	9	9,8		2,45
5	9,4		2,35	10	9,7		2,43
Среднее значение $Q$		2,39					
$u_3 = 15$ об/мин							
1	9,7	3	3,23	6	9,5	3	3,17
2	9,5		3,17	7	9,6		3,20
3	9,9		3,30	8	9,4		3,13
4	9,7		3,23	9	9,4		3,13
5	9,6		3,20	10	9,8		3,27
Среднее значение $Q$		3,20					
$u_4 = 20$ об/мин							
1	8,5	2	4,25	6	8,5	2	4,25
2	8,3		4,15	7	8,4		4,20
3	8,6		4,30	8	8,7		4,35
4	8,4		4,20	9	8,6		4,30
5	8,3		4,15	10	8,4		4,20
Среднее значение $Q$		4,24					

Продолжение табл. П2.3

Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин	Номер образца	Масса $m$ , г	Время, за которое снимались образцы $t$ , мин	Производительность $Q$ , г/мин
$u_5 = 25$ об/мин							
1	10,6	2	5,30	6	10,7	2	5,35
2	10,9		5,45	7	10,6		5,30
3	10,6		5,30	8	10,9		5,45
4	10,5		5,25	9	11,0		5,50
5	10,8		5,40	10	10,7		5,35
Среднее значение $Q$		5,37					
$u_6 = 30$ об/мин							
1	13,2	2	6,60	6	13,1	2	6,55
2	12,8		6,40	7	13,2		6,60
3	13,0		6,50	8	12,9		6,45
4	13,2		6,60	9	13,3		6,65
5	12,9		6,45	10	12,8		6,40
Среднее значение $Q$		6,52					

## П2.4. Определение удельной мощности $q_N$

Номер образца	Ток нагрузки двигателя $I_{н.}$ , А	Напряжение двигателя $U$ , В	Мощность, расходуемая на процесс валцевания $N$ , Вт	Производительность $Q$ , кг/ч	Удельная мощность $Q_N$ , кВт/кг
<i>Нижнее отборочно-гранулирующее устройство</i>					
Диаметр фильеры $d_\phi = 5$ мм					
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5$ мм					
Величина фрикции $f = 1:1,2$					
Частота вращения переднего валка $n_1 = 5$ об/мин					
1	2,6	220	572	0,0282	20,28
2	2,6				
3	2,5				
4	2,7				
5	2,6				
$n_2 = 10$ об/мин					
1	2,9	220	649	0,0462	14,05
2	2,9				
3	3				
4	3				
5	2,95				
$n_3 = 15$ об/мин					
1	3,2	220	717,2	0,0696	10,3
2	3,3				
3	3,3				
4	3,2				
5	3,3				

Номер образца	Ток нагрузки двигателя $I_{нр}$ , А	Напряжение двигателя $U$ , В	Мощность, расходуемая на процесс вальцевания $N$ , Вт	Производительность $Q$ , кг/ч	Удельная мощность $Q_N$ , кВт/кг
$u_4 = 20$ об/мин					
1	3,5	220	765,6	0,0996	7,69
2	3,5				
3	3,4				
4	3,5				
5	3,5				
$u_5 = 25$ об/мин					
1	3,7	220	818,4	0,1350	6,06
2	3,7				
3	3,8				
4	3,7				
5	3,7				
$u_6 = 30$ об/мин					
1	4,0	220	869	0,1788	4,86
2	3,9				
3	3,9				
4	3,95				
5	4,0				

Номер образца	Ток нагрузки двигателя $I_{нр}$ , А	Напряжение двигателя $U$ , В	Мощность, расходуемая на процесс валцевания $N$ , Вт	Производительность $Q$ , кг/ч	Удельная мощность $Q_N$ , кВт/кг
<i>Боковое отборочно-гранулирующее устройство</i>					
Диаметр фильеры $d_{\phi} = 5\text{мм}$					
Минимальный зазор между валками $h_0 = 1,5\text{ мм}$					
Величина фрикции $f = 1:1,2$					
Частота вращения переднего валка $n_1 = 5\text{ об/мин}$					
1	2,1	220	475,2	0,0900	5,28
2	2,2				
3	2,2				
4	2,1				
5	2,2				
$n_2 = 10\text{ об/мин}$					
1	2,5	220	563,2	0,1434	3,93
2	2,6				
3	2,5				
4	2,6				
5	2,6				
$n_3 = 15\text{ об/мин}$					
1	2,9	220	638	0,1920	3,32
2	2,9				
3	2,8				
4	3,0				
5	2,9				

Продолжение табл. П2.4

Номер образца	Ток нагрузки двигателя $I_{нр}$ , А	Напряжение двигателя $U$ , В	Мощность, расходуемая на процесс вальцевания $N$ , Вт	Производительность $Q$ , кг/ч	Удельная мощность $Q_N$ , кВт/кг
$n_4 = 20$ об/мин					
1	3,2	220	690,8	0,2544	2,72
2	3,1				
3	3,1				
4	3,1				
5	3,2				
$N_5 = 25$ об/мин					
1	3,5	220	743,6	0,3222	2,31
2	3,3				
3	3,4				
4	3,3				
5	3,4				
$N_6 = 30$ об/мин					
1	3,6	220	792	0,3912	2,02
2	3,6				
3	3,6				
4	3,6				
5	3,6				

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	6
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	7
1.1. Анализ состояния вторичной переработки полимерных материалов .....	7
1.2. Утилизация отходов полиолефинов .....	10
1.2.1. Структурно-химические особенности вторичного полиэтилена .....	12
1.2.2. Технология переработки вторичного полиолефино- вого сырья в гранулят .....	16
1.2.3. Способы модификации вторичных полиолефинов ....	21
1.3. Утилизация и вторичная переработка отходов поливинил- хлорида, полистирольных пластиков, полиамидов, поли- этилентерефталата .....	25
1.4. Постановка задачи исследования .....	29
2. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ЭКСПЕ- РИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ .....	31
2.1. Технологический процесс вторичной переработки отходов полимерных материалов по непрерывной технологии .....	31
2.2. Описание экспериментальной установки .....	33
2.3. Расчет геометрических размеров отборочно-гранулирующего устройства .....	36
2.4. Объект исследования .....	39
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛЦАХ НЕПРЕ- РЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ .....	41
3.1. Определение реологических свойств пленочных отходов полиэтилена низкой плотности .....	41
3.2. Определение безразмерных координат сечения входа $X_n$ и выхода $X_k$ .....	43

3.3. Методика проведения эксперимента .....	46
3.4. Получение зависимостей свойств гранулята от технологических и конструктивных параметров переработки при использовании нижнего отборочно-гранулирующего устройства .....	49
3.5. Получение зависимостей свойств гранулята от технологических и конструктивных параметров переработки при использовании бокового отборочно-гранулирующего устройства .....	55
3.6. Сравнение свойств гранулята, полученного из первичного и пленочных отходов ПЭНП при найденных режимах переработки .....	58
3.7. Сравнительная характеристика свойств вторичных полимерных материалов, полученных из пленочных отходов по различным технологиям .....	60
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА .....	62
4.1. Определение суммарной величины сдвига при непрерывном режиме процесса вальцевания термопластов .....	62
4.1.1. Определение величины сдвига вдоль оси X .....	62
4.1.2. Определение суммарной величины сдвига .....	63
4.2. Зависимость физико-механических показателей гранулята от величины сдвига при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов .....	65
5. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ .....	67
5.1. Расчет основных параметров процесса и оборудования по первому варианту .....	67
5.2. Расчет основных параметров процесса и оборудования по второму варианту .....	71
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	75
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	82

Научное издание

ШАШКОВ Иван Владимирович,  
КЛИНКОВ Алексей Степанович,  
БЕЛЯЕВ Павел Серафимович,  
СОКОЛОВ Михаил Владимирович

# ВАЛКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Монография

Редактор З.Г. Чернова  
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Подписано в печать 03.04.2012  
Формат 60×84 /16. 7,9 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 137  
Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14