А.С. Клинков, П.С. Беляев, Д.Л. Полушкин

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВОГО АГРЕГАТА И СОВМЕЩЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ

Москва, 2012

УДК 621.929.3
ББК Л710.514
К493

Р е ц е н з е н т ы:
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Полимерсервис» ФГБОУ ВПО
«Московский государственный университет инженерной экологии»
В.К. Скуратов

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

Генеральный директор ООО «КомЭк»
И.Х. Блюм

Клинков А.С., Беляев П.С., Полушкин Д.Л.

К493 Разработка конструкции валково-шнекового агрегата и совмещенного технологического процесса утилизации полимерной тары и упаковки. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 160 с. – 400 экз.

ISBN 978-5-4442-0020-9

В представленной работе решены задачи расчета интегрального критерия качества – величины суммарной деформации сдвига, которая характеризует влияние конструктивных и технологических параметров оборудования на физико-механические свойства получаемого вторичного материала. Установлено, как влияют основные режимные параметры процесса вальцевания и конструктивные параметры оборудования на физико-механические показатели получаемого вторичного материала.

Предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами вторичной переработки отходов пластмасс, а также аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области утилизации полимерных материалов (в том числе отходов полимерной тары и упаковки).

УДК 621.929.3
ББК Л710.514

ISBN 978-5-4442-0020-9

© Клинков А.С., Беляев П.С.,
Полушкин Д.Л., 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……. 4
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ……. 7
1.1. Классификация отходов …….. 7
1.2. Способы активной борьбы с полимерным «мусором» …… 11
1.3. Особенности переработки некоторых видов пластмасс …….. 23
1.4. Постановка задачи исследования ……... 32
2. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВЫМ МЕТОДОМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ……. 34
2.1. Технологический процесс утилизации полимерной тары и упаковки валково-шнековым методом …….. 34
2.2. Описание экспериментальной установки …….. 35
2.3. Расчет геометрических размеров шнекового отборочного устройства 38
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ЗАДАННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ……... 43
3.1. Определение величины суммарной деформации сдвига при вальцевании термопластов …… 43
3.2. Определение величины суммарной деформации сдвига в каналах отборочно-шнекового устройства и формующего инструмента …… 50
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ 53
4.1. Исследование свойств вторичного термопластичного материала при переработке на валковых машинах ……... 53
4.2. Исследование свойств вторичного термопластичного материала при переработке в шнековых машинах …… 61
4.3. Исследование свойств вторичного термопластичного материала, полученного в процессе валково-шнековой утилизации ……..... 62
4.4. Изучение структурных изменений полученного вторичного термопластичного материала …….. 67
4.5. Сравнительная оценка производительности, удельной мощности и свойств вторичного термопластичного материала при использовании бокового отборочно-гранулирующего устройства и валково-шнекового агрегата ……. 74
5. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ ……. 76
5.1. Расчет параметров процесса и оборудования при проектировании валково-шнекового агрегата …….. 76
5.2. Расчет параметров процесса и оборудования при оснащении вальцов шнековым отборочным устройством ……. 81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……... 84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …….. 86
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ……. 90
ПРИЛОЖЕНИЯ …….. 92

ВВЕДЕНИЕ

Общий федеральный закон о промышленных и бытовых отходах, который носит название «Об отходах производства и потребления», был принят Государственной думой в 1998 г. Закон «определяет правовые основы обращения с отходами производства и потребления в целях предотвращения вредного воздействия отходов производства и потребления на здоровье человека и окружающую природную среду, а также вовлечения таких отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья».

В мире наблюдается стремительный рост потребления полимерных материалов. В России его темпы составляют 5…6 % ежегодно и к 2010 г., по прогнозам, общий объем производств достиг 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].

Россия занимает огромную территорию со значительным количеством небольших населенных пунктов, в которых перспектива цивилизованного решения проблемы утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) достаточна далека от совершенства.

На городских свалках даже среднего города ежегодно скапливаются сотни тысяч тонн бытовых отходов, превращаясь в серьезную опасность для окружающей среды и человека. Дымящиеся свалки, кучи выброшенного хлама, переполненные мусорные баки – в России такие картины знакомы многим городским жителям. Подсчитано, что каждый год в стране скапливается только твердых бытовых отходов 140 млн. кубометров, а к 2005 г. эта цифра возросла до 190 млн. Значительную долю ТБО составляют отходы пластмасс, которые, с одной стороны, являются ценным сырьем для вторичного использования, а с другой – длительно разлагающимися материалами, существенно загрязняющими природную среду (в России предположительно к 2010 г. полимерные отходы составят больше 1 млн. т. [2]).

Проблему уничтожения такой огромной массы полимерных отходов, бесспорно, можно отнести к категории экологических, с другой стороны, она самым тесным образом связана с решением сложных технических и экономических вопросов [3, 4].

Повышенный интерес к использованию вторичного сырья в развитых странах мира определяется наряду с экономическими соображениями также и жестким экологическим законодательством в отношении переработки отходов производства и потребления. Все большую роль играют международные соглашения по охране природы, особенно в тех направлениях, которые координируют отношения по обращению с отходами. Например, для стран-членов ЕС требуется обязательность наличия планов создания рынка вторичного сырья, введение нормирования использования наиболее распространенных отходов (макулатуры, стекла, металлической и пластиковой упаковки) [5]. Вот почему «героями дня» становятся эффективные, безотходные, а главное – экологически чистые технологии промышленной переработки твердых бытовых отходов (ТБО).

Москва является одним из крупнейших промышленных центров России, на территории которого сосредоточено более 5 тыс. крупных предприятий. В настоящее время в городе ежегодно образуется около 1 млн. промышленных отходов, среди которых объем образования твердых отходов полимерных материалов порядка 300 тыс. т в год. При этом, по оценкам, перерабатывается не более 10 тыс. т (8…16 %), остальная же огромная часть в виде мусора вывозится на свалки [3]. Доля переработки в Санкт-Петербурге составляет 25…30 %, по России – 4 %. В среднем по Евросоюзу – до 40 %.

В наши дни, как никогда прежде, люди планеты задумались над огромным засорением Земли непрерывно возрастающими отходами, в том числе пластиков. Огромное количество пластиков используется для изготовления упаковки пищевых продуктов (из всех выпускаемых пластиков 41 % используется в упаковке; из этого количества 47 % расходуется на упаковку пищевых продуктов [6, 7]). Удобство и безопасность, низкая цена и высокая эстетика являются определяющими условиями ускоренного роста использования пластических масс при изготовлении упаковки.

Проблем, связанных с утилизацией полимерных отходов, достаточно много. Они имеют свою специфику, но их нельзя считать неразрешимыми. Однако решение невозможно без организации раздельного 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 полимерного вторсырья.

Наибольшие трудности связаны с переработкой и использованием смешанных отходов. Причина этого в несовместимости термопластов,

входящих в состав бытового мусора, что требует их раздельного сбора и сортировки. Во многих западных странах организован раздельный сбор твердых бытовых отходов, что значительно упрощает доставку их на предприятия по переработке и их сортировку. К сожалению, в Российской Федерации этот вопрос не решен и требует от муниципалитетов организационной работы с населением по раздельному сбору ТБО.

Одним из быстроразвивающихся направлений использования пластмасс является упаковка. Уже с 1975 г. полимеры вышли на третье место после стекла, бумаги и картона по применению для упаковки [8]. Наиболее остро в настоящее время стоит вопрос вторичной переработки отходов полимерной тары и упаковки.

Цель работы – разработка конструкции валково-шнекового агрегата и совмещенного технологического процесса утилизации полимерной тары и упаковки на валково-шнековом оборудовании.

В соответствии с этим в данной работе решались следующие ***задачи***:

– анализ современного состояния в области утилизации полимерной тары и упаковки;

– создание лабораторного экспериментального стенда валково-шнекового агрегата по изучению непрерывного процесса утилизации полимерной тары и упаковки;

– разработка непрерывной технологии совмещенных процессов вальцевания и экструзии для утилизации полимерной тары и упаковки, позволяющей снизить энергетические и трудовые затраты, сократить производственные площади, что приведет к уменьшению себестоимости получаемого вторичного материала;

– разработка методики расчета и программного обеспечения для определения величины суммарной деформации сдвига совмещенного процесса валково-шнековой переработки, характеризующей влияние различных геометрических размеров валково-шнекового оборудования и технологических параметров процесса утилизации на физико-механические показатели получаемого вторичного термопластичного материала (предел прочности и относительное удлинение при разрыве);

– определение значения величины суммарной деформации сдвига совмещенного процесса утилизации, соответствующего заданным физико-механическим показателям вторичного материала;

– исследование влияния конструктивных и технологических параметров валково-шнекового оборудования и процесса валково-шнековой утилизации на физико-механические показатели получаемого вторичного материала;

– создание методики инженерного расчета геометрических размеров валково-шнекового оборудования и технологических параметров совмещенного процесса утилизации с учетом заданных физико-механических показателей получаемого вторматериала.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Отходы потребления и промышленные отходы, пригодные к дальнейшей переработке, называют вторичным полимерным сырьем (ВПС), к которому относятся изделия из полимерных и других материалов, а также смесевых композиций (композиционных материалов), утративших свои потребительские свойства в результате физического или морального износа и предназначенные для переработки и использования в народном хозяйстве.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ

Полимерный «мусор» (как и другие виды отходов) традиционно подразделяется на промышленный и бытовой. Иногда в отдельную категорию выделяют медицинские отходы – использованные шприцы, капельницы, подгузники, одноразовые клеенки и т.д. (Не так давно на рассмотрение парламента депутатом Госдумы Михаилом Рокицким был внесен проект закона о медицинских отходах.)

По классификации видов отходов, представленной в приказе № 527 от 27 ноября 1997 г. «О федеральном классификационном каталоге отходов» Госкомитета по охране окружающей среды, зарегистрированном в Минюсте Российской Федерации 29 декабря 1997 г. под № 1445, отходы подразделяются на [9]:

1. Отходы органические природного происхождения (животного и растительного).
2. Отходы минерального происхождения.
3. Отходы химического производства, в том числе:
   - отходы полимерных материалов и резины;
   - затвердевшие отходы пластмасс;
   - отходы незатвердевших пластмасс, формовочных масс и компонентов;
   - шламы и эмульсии полимерных материалов.
4. Отходы коммунальные (включая бытовые отходы), в том числе:
   - твердые бытовые отходы;
   - отходы из жилищ;
   - мусор уличный;
   - медицинские отходы (больниц и лечебно-оздоровительных учреждений).

Классификация полимерных отходов.

Полимерные отходы разделяют на отходы производства (технологические) и потребления. Отходы потребления образуются в жилом

секторе, на предприятиях, в торговых центрах, где происходит упаковка и распаковка различных товаров и грузов.

Рассмотрим три типа классификации отходов.

I. По сложности и цене утилизации.

1. С хорошими свойствами – чистые отходы производства (литники, обрезки, облой, брак), условно чистые отходы потребления, получаемые в местах, где сбор и сортировка или отлажены, или не требуются (медицинские одноразовые изделия и системы, пленка, пластмассовые ящики, ПЭТ-бутылки). Утилизация обеспечивает сравнительно высокую рентабельность их переработки. Процент от общего количества полимерных отходов – 5…12 %. Использование – 70…90 %.

2. Со средними свойствами – те же виды отходов производства и потребления, содержащие допустимое количество загрязнений, а также отходы от производств пищевого назначения. Сбор и переработка таких отходов связана с издержками по сортировке, мойке и использованием более сложного оборудования по переработке и производству изделий. Однако их использование может быть рентабельным. Процент от общего количества полимерных отходов – 10…25 %. Использование – 20…30 %.

3. Трудноутилизируемые отходы – сильно загрязненные и смешанные отходы производства и потребления, отходы из композиционных материалов, детали бытовой и автомобильной техники. Сбор и переработка трудноутилизируемых отходов, как правило, не может быть рентабельной. Именно поэтому в России данные отходы практически не собираются и не перерабатываются. Для покрытия издержек на утилизацию таких отходов необходимы внешние финансовые ресурсы (налоговые льготы, целевые вложения, субсидии) и внеэкономические меры. Процент от общего количества полимерных отходов – 60…85 %. Утилизация (кроме закапывания) – до 3 %.

II. По видам и типам полимеров отходы можно разбить на две группы.

1. Отходы крупнотоннажных и конструкционных пластиков. Эти отходы имеют развитый рынок сбыта вторичных материалов внутри России, частично обеспечены (технологические отходы) оборудованием для переработки во вторичные материалы:

1) полиэтилен низкой и высокой плотности (ПЭНП, ПЭВП): пленка и кусковые отходы;

2) полипропилен (ПП): кусковые отходы и пленка, отходы производства одноразовой посуды, волокна;

3) стирольные пластики (ПС, АБС): кусковые отходы, листы, отходы производства одноразовой посуды;

4) полиамиды (ПА), поликарбонат (ПК);

5) полиэтилентерафталат (ПЭТФ);

6) ПВХ пластифицированный (отходы первичного производства);

7) ПВХ жесткий (отходы первичного производства).

2. Отходы упаковки, мебельного производства, строительства: в настоящее время не имеют развитого рынка сбыта, оборудование для их переработки во вторичные материалы в России и СНГ практически не производится:

1) использованная тара из ПЭТФ;

2) двух- или многослойные пленки для упаковки пищевых продуктов: ПП/ПА, ПП/ПЭТФ, ПЭ/ПЭТФ;

3) вспененные полимерные материал (ПЭНП вспененный, ПС вспененный) – одноразовая посуда «фаст-фуд», упаковочные, теплоизоляционные материалы;

4) смешанные отходы ПС, ПП, ПЭНП, ПЭВП;

5) смешанные отходы ПЭТФ, АБС, ПА, ПК;

6) ПВХ пластифицированный – старая обувь, использованный кабель;

7) ПВХ жесткий – старые рамы, вагонка, сайдинг, трубы, профили;

8) пенополиуретан.

III. По способу образования отходы можно разделить на 3 группы:

а) Технологические отходы производства, которые возникают при синтезе и переработке термопластов. Они делятся на неустранимые и устранимые технологические отходы. Неустранимые – 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 % [10]. Неустранимые 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.

Такие отходы перерабатывают преимущественно по двум направлениям:

1) с целью производства того же продукта, в процессе изготовления которого образовался данный вид отходов, или продукта аналогичной рецептуры;

2) для изготовления изделий менее ответственного назначения.

При переработке по первому направлению отходы обычно используют непосредственно после их образования на отдельных установках. В ряде случаев их собирают и подают в устройства для измельчения, после чего смешивают с основным сырьем и направляют в

приемные устройства экструдеров и различных формовочных установок. Содержание отходов в сырье обычно составляет 5…10 %, но может достигать 20 % и более.

Второе направление переработки различного вида технологических отходов заключается в их сортировке (отделение посторонних примесей и разбраковка), измельчении и гранулировании с последующим изготовлением на их основе изделий широкого потребления (тары, подстилок, сувениров, игрушек и т.п.). В целом, переработка технологических отходов производства пластмассовых изделий облегчена концентрированием их в рамках отдельных производств и возможностью предохранения от загрязнений.

Сокращению технологических отходов, образующихся при изготовлении деталей из пластмасс, способствуют следующие мероприятия:

1. Правильное распределение имеющейся номенклатуры изделий по оборудованию таким образом, чтобы суммарные отходы были минимальны, учитывая, что потери сырья при переходах с одного изделия на другое на машинах с большой производительностью максимальны.

2. Усовершенствование конструкции оснастки, выбор оптимального формующего инструмента (пресс-форм, дорнов, матриц и т.д.).

3. Оптимизация режимов переработки полимера с целью исключения его термодеструкции и получения бракованных изделий.

4. Уменьшение числа переходов с одного цвета на другой как при изготовлении деталей, так и при переработке отходов.

5. Установка на вентиляционных отсосах дробильных отделений циклонов для улавливания полимерной пыли, образующейся при дроблении отходов.

6. Организация безостановочного цикла работы оборудования.

б) 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.

в) 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.

1.2. СПОСОБЫ АКТИВНОЙ БОРЬБЫ С ПОЛИМЕРНЫМ «МУСОРОМ»

Обезвреживание и использование отходов потребления пластмасс, увеличивающихся из года в год в связи с бурным ростом производства полимерных материалов (начиная с 1960-х гг., производство полимеров, основную часть которых представляют пластмассы, удваивается каждые 5 лет) представляет гораздо большую проблему [11, 12]. Особенную остроту этой проблеме придает исключительная стойкость отходов пластмасс в естественных условиях, что приводит к существенному загрязнению окружающей среды. Так, по зарубежным данным, в 1980 г. в Англии в отходы попадало около 1,35 млн. т пластмасс при производстве 2,145 млн. т, в США – около 2,5 млн. т при производстве 17,5 млн. т. Использование вторичного полимерного сырья в России в абсолютном выражении (тыс. т, числитель) и в процентах от имевшихся ресурсов (знаменатель) составляло в 1986 и 1990 гг. соответственно 128/66 и 158/82.

С отходами пластмасс теряется большое количество ценных органических продуктов, повторное использование которых позволило бы, в частности, сократить потребление естественного сырья (нефти и газа) и загрязнение окружающей среды. Немаловажную роль играет и экономическая сторона вопроса: себестоимость вторичных поливинилхлорида, полиэтилена, полистирола в 2,5 – 6 раз ниже, чем тех же первичных материалов, себестоимость вторичного капрона в 12 раз меньше, чем первичного.

На жителя мегаполиса приходится 250…300 кг твердых отходов в год, этот источник принято называть муниципальным. Ежегодное увеличение объема твердых бытовых отходов в этом секторе составляет 5 %. Муниципальные отходы в России составляют 4 % от всего объема твердых отходов, в том числе сельскохозяйственных и промышленных. Из этого числа 7 % приходится на полимерные изделия различного назначения (для сравнения, в промышленно развитых странах полимерные отходы составляют 18…30 % от общего объема муниципальных отходов). Практически все полимерные отходы можно перерабатывать. Вторичной переработке подлежат полимеры, а также композитные материалы и изделия из них.

Однако есть исключения. Не могут подвергаться рециклингу и должны уничтожаться полимеры, окончательно утратившие «производственные» свойства или такие, которые представляется невозможным отделить друг от друга или от компонентов другого состава.

Способов активной борьбы с полимерным мусором несколько.

Основное количество отходов уничтожают захоронением в почву или сжиганием.

1.2.1. Захоронение (депонирование)

Этот способ является самым неперспективным, поскольку ценное полимерное сырье закапывается, а значительные территории становятся непригодными для сельскохозяйственных и иных нужд. При депонировании на полигонах вместе с пищевыми отходами пластики не разлагаются и наносят огромный вред почвам.

Захоронение ТБО связано с отведением под мусорные свалки значительных земельных участков и отторжением их от полезного использования. В Российской Федерации примерно 90 % ТБО вывозится на свалки, занимающие более 20 тыс. га. Каждая такая свалка «съедает» от 6 до 50 га земельных угодий. Кроме того, на свалки вывозится ценнейшее вторичное сырье (макулатура, пластмассы, стекло, металлы и др.), которое может и должно вовлекаться в полезные производственные циклы.

Ежегодный прирост твердых бытовых отходов (ТБО) приводит к быстрому росту мусорных свалок как разрешенных (зарегистрированных), так и «диких» (незарегистрированных). В настоящее время на таких свалках в Российской Федерации (по данным АО «ИНЭКО») накопилось свыше 55 мегатонн ТБО (из которых от 3,5 до 4,2 мегатонн полимерного сырья).

Свалки приводят к значительному ухудшению окружающей среды: загрязнению воздуха, почвы и грунтовых вод метаном, диоксидом серы, растворителями, 2,3,7,8-тетрахлордибензо-1,4-диоксаном (диоксин), инсектицидами, тяжелыми металлами в виде их солей и другими вредными веществами. Свалки являются причиной просадки грунта, непродуктивного использования земельных участков вместо полезного отведения их под садово-парковые посадки, жилищное строительство или общественно-значимые сооружения и т.д. Свалки способствуют возникновению эпидемиологической опасности, связанной с появлением грызунов и переносу ими различных заболеваний. По мере увеличения свалки «наступают» и постепенно занимают «зеленые» зоны и пригородные места отдыха. Это, в свою очередь, требует увеличения затрат на транспортировку отходов и способствует дальнейшему загрязнению территорий выхлопными газами транспортных средств.

Альтернативным способом является сжигание.

1.2.2. Сжигание

Сжигание отходов пластмасс – наименее эффективный способ их удаления и обезвреживания, так как при этом полностью разрушается дорогостоящий полимер и другие компоненты пластика [13]. Сжигание применяется при переработке отходов пластмасс только в тех случаях, когда другие способы по техническим или экономическим при-

чинам не могут быть использованы. В частности, сжигание отходов пластмасс используют, когда их выделение из смеси других отходов невозможно или слишком дорого.

Конструкции печей, используемых для сжигания отходов пластмасс, могут быть самыми разными, но должны учитывать особенности горения этих материалов. Во время горения отходов пластмасс в печи создается высокая температура, что требует специальных мер защиты. Кроме того, необходимо оснащение печей системами дожигания, очистки и обработки дымовых газов, так как при горении пластмасс образуются такие токсичные газы, как аммиак, оксиды азота, хлористый водород, диоксины и др. Вместе с тем, 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 [14]. Среди продуктов переработки имеются канцерогенные вещества – например, соли тяжелых металлов, попадающие в почву и воду, и ядовитые газы, поступающие в атмосферу; по пищевой цепи эти яды неизбежно поступают к животным и человеку.

По результатам последних исследований ученых при сжигании 10 основных видов многотоннажных отходов пластиков выделяется много дыма с частицами размером 0,4…10 и более микрон. Часть из них проходит через фильтры, системы газоочистки и развевается ветром по воздуху, в том числе и летучие оксиды металлов. При сгорании многих изделий – ковров, губок, пенопластов, упаковочных материалов, труб и других – выделяются оксиды азота, серы, хлористый водород, при соединении которых с атмосферной влагой возникают кислотные дожди, губительные для зеленого мира.

Кроме всего, сжигание не является экономически целесообразным:

– сжигание предполагает предварительную сортировку мусора;

– уничтожается ценное сырье;

– стоимость качественных фильтров и иных эффективных систем очистки очень высока;

– мусоросжигательные печи являются сложными и дорогими устройствами;

– установки для сжигания мусора быстро выходят из строя, что тоже влияет на стоимость этого способа утилизации.

Несмотря на значительную тепловую энергию сжигания пластмасс, экономическая эффективность этого процесса является наименьшей по сравнению с другими процессами утилизации пластмассовых отходов. Тем не менее, сравнительная простота организации сжигания определяет довольно широкое распространение этого процесса на практике [15].

1.2.3. Деструктивные методы утилизации полимеров

Пиролиз полимеров. Пиролиз – это термическое разложение органических продуктов в присутствии кислорода или без него с целью получения низкомолекулярного химического сырья. При более низких температурах (до 600 °С) образуются в основном жидкие продукты (пиролизное масло), а выше 600 °С – газообразные (пиролизный газ), вплоть до технического углерода [14, 16].

Применение этой технологии для переработки пластмассовых отходов экономически выгодно. Установка, перерабатывающая 11,3 тыс. т/г. отходов, окупается за три года. Использование этих установок целесообразно лишь в районах с ресурсами отходов не менее 465 тыс. т/г.

Несмотря на ряд недостатков, пиролиз, в отличие от процессов сжигания ТБО, дает возможность получения промышленных продуктов, используемых для дальнейшей переработки.

Чтобы получать высококачественные пиролизные масла постоянного состава, необходимо соблюдать особые требования к исходному сырью. Это преимущественно должны быть отходы с высоким содержанием углеводородов. Для преобразования таких термопластов, как низкомолекулярный полиэтилен или атактический полипропилен, применяют низкотемпературный жидкофазный пиролиз в непрерывно или периодически работающих реакторах. В некоторых случаях в области низких температур находят применение реакторы с псевдоожижженным слоем.

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.) [14, 17, 18].

Низкотемпературный жидкофазный пиролиз. Область рабочих температур в этом случае определяется перерабатываемым продуктом. Например, отходы ПВХ и побочные продукты выше 200 °С отщепляют хлороводород, а при дальнейшей термической обработке (выше 400 °С) разлагаются на технический углерод и углеводороды. Жидкофазный пиролиз полистирола при температурах выше 350 °С ведет к образованию стирола с высоким выходом. Низкомолекулярный полиэтилен пиролизуется при 400…450 °С, при этом получают алифатические богатые олефинами масла и алифатические воски. Атактический полипропилен термически разлагается в области температур 400…500 °С.

Сырье в реактор загружают в расплавленном состоянии или в качестве реакционной среды применяют полиэтиленовые воски, расплав

полиэтилена или полипропилена, высоко кипящие дистилляты. Реакторы с псевдоожиженным слоем продуваются воздухом, поэтому в них протекают окислительные процессы.

Высокотемпературный пиролиз проводят при температурах 600…800 °С. При прямом обогреве и подаче воздуха температура пиролиза может быть более низкой. При высоких температурах пиролиза снижается выход алифатических соединений, а ароматических значительно возрастает. Для этого необходимо, чтобы отходы были сухими и перерабатывались в отсутствие кислорода. Поэтому целесообразнее проводить обогрев в реакторе [14, 17].

В ряде стран разрабатывают барабанные реакторы с псевдоожиженным слоем. В Англии проводятся эксперименты на шахтной печи. Основное внимание уделяется переработке старых шин. Экономическая эффективность пиролиза в значительной степени определяется использованием его продуктов (сейчас во многих случаях это находится на границе рентабельности). Пиролизные масла используются главным образом для отопления. Разделение масел на компоненты очень энергоемко, требует материальных затрат.

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 [14, 19 – 21].

Гидролиз, гликолиз, метанолиз. Поликонденсаты в результате обратимости реакции образования могут снова разлагаться до исходных веществ. К поликонденсационным материалам относятся полиамиды, полиэфиры, поликарбонаты, поликарбамиды, полиуретаны. Для практического использования имеют значение способы расщепления полиэтилентерефталата (ПЭТФ), полиамидов и вспененных полиуретанов. Продукты расщепления используют снова в качестве сырья для проведения процесса поликонденсации или как добавки к первичному материалу. Однако имеющиеся в этих продуктах примеси часто не позволяют получать высококачественные полимерные изделия, например волокна, но чистота их достаточна для изготовления литьевых масс, легкоплавких и растворимых клеев.

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.

Для гидролиза отходов ПЭТФ разработан метод, по которому полимер при температуре 180 °С, давлении 0,6…0,8 МПа и концентрации NaOH 15 % за 6 ч деполимеризуется до терефталевой кислоты. Выход продукта составляет 93…98 %. Если температуру повышают до 250 °С, а давление – до 2 МПа, то процесс завершается уже в течение 1 ч. Реакция ускоряется аминами.

По сравнению с гидролизом для расщепления отходов 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.

В настоящее время все же самым распространенным 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 [14, 17, 22].

1.2.4. Использование биодеградируемых полимеров (материалов с регулируемым сроком службы)

В начале 1970-х гг. прошлого века интенсивно начали развиваться работы по созданию био-, фото- и водоразрушаемых полимеров [23 – 34].

Биодеградируемые пластики со временем самостоятельно разлагаются на безопасные для экологии вещества. Биоразложение полимера является сложным процессом, на скорость и завершенность которого влияют не только строение и свойства полимера, но и окружающие условия, из которых первостепенное влияние оказывают влажность, температура, pH среды, свет, а также такой комплексный фактор как контакт с почвой и тип почвы [15]. Получение разлагаемых полимеров вызвало настоящую сенсацию, и этот способ уничтожения вышедших из строя пластмассовых изделий рассматривался как идеальный. Применение данных материалов для выпуска различных изделий, по мнению ученых, занимающихся их созданием, в будущем способно разрешить если не все, то многие проблемы утилизации упаковки и других изделий из полимеров. 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.

В последние годы возрос интерес к использованию полимеров молочной кислоты – полилактатов (ПЛА), сырьем для производства которых служат кукуруза, сахарный тростник, рис, картофель и пр.

Методом прямой поликонденсациии получают достаточно хрупкие кристаллические ПЛА. Путем полимеризации промежуточного вещества – лактида – с раскрытием цикла можно получать как кристаллические, так и аморфные ПЛА. Изделия из ПЛА характеризуются высокой жесткостью, прозрачностью и блеском, а также большей способностью (на 50 %) сохранять форму после сжатия или кручения по сравнению с ПП. Из ПЛА изготовляют пленку, в том числе ориентированную и усадочную, бутылки для розлива жидкостей, контейнеры для пищевых продуктов, одноразовую посуду. Вместе с тем ПЛА уступают обычным полимерным материалам по теплостойкости, и, как следствие этого, упаковка из ПЛА не может быть заполнена содержимым с температурой 50 °С и выше, так как она начинает деформироваться.

Однако следует отметить, что производство и потребление разлагаемых упаковочных материалов и упаковок практически не решает проблемы охраны среды обитания от использованной и изношенной полимерной упаковки и тары. Причин здесь несколько:

– трудность регулирования скорости распада на свалках под воздействием факторов окружающей среды;

– довольно высокая стоимость вводимых добавок;

– технологические трудности производства;

– экологические трудности, которые связаны с тем, что по данным некоторых исследований, не снижается опасность отрицательного воздействия материалов и продуктов их распада на природу и животных;

– безвозвратная потеря ценных сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, которые при правильном и грамотном решении могли бы приносить достаточно высокую прибыль народному хозяйству.

По этим причинам уничтожение отходов путем создания и применения быстроразлагаемых упаковок должно иметь ограниченное и контролируемое применение [35 – 37].

1.2.5. Повторное применение

Наиболее рациональный способ утилизации отходов пластмасс – это их повторное использование по прямому назначению. При этом не только достигается ресурсосберегающий эффект от повторного вовлечения материальных ресурсов в производственный цикл, но и существенно снижаются нагрузки на окружающую среду. Показано, что капитальные и эксплуатационные затраты по основным способам утилизации отходов не превышают, а в ряде случаев, даже ниже затрат на их уничтожение.

Повторное использование – это основной путь использования отходов пластмасс. 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 амортизованных 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.

Традиционное оборудование при рециклинге отходов – это шнековые и дисково-шнековые машины, агломераторы.

В общем виде последовательность операций при переработке отходов пластмасс с целью их повторного использования представлена на рис. 1.1.

В зависимости от качества и чистоты отходов такая схема может быть реализована в полном или сокращенном объеме. Как правило, промышленные отходы не требуют выполнения всех стадий процесса, показанного на этой схеме. Бытовые полимерные отходы, наоборот, нуждаются в тщательной подготовке. Переработка технологических отходов термопластов должна начинаться с определения степени изменения их свойств и выбора наиболее эффективной технологии их использования.

Высокое качество готовых изделий и стабильность технологического процесса могут быть обеспечены лишь при равномерном дозировании измельченных или гранулированных отходов и хорошем смешении их с исходным сырьем.

В процессе вторичного использования пластмасс необходимо предотвратить или уменьшить ухудшение их физико-механических и реологических свойств вследствие старения, вызываемого напряжением сдвига и нагреванием – термомеханическим воздействием, которому подвергаются полимеры при размоле, расплавлении и формовании.

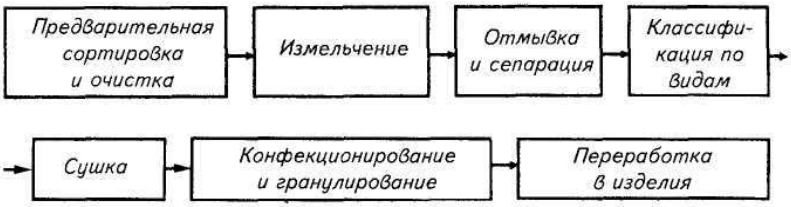


Рис. 1.1. Последовательность операций при переработке отходов термопластов

С этой целью в композиции на основе вторичных полимерных материалов вводят дополнительные стабилизаторы и модификаторы, которые позволяют без изменения технологических свойств полимеров сохранить их эксплуатационные характеристики.

В ряде европейских стран проблема утилизации использованных пластмассовых упаковок неразрывно связана с налаживанием четкой службы их сбора, сортировки и разделения смешанных отходов, поскольку эти операции являются самыми трудоемкими.

Сбор и сортировка отходов пластмасс являются наиболее слабым звеном в процессе организации переработки как технологических отходов, так и в еще большей степени отходов потребления [38].

Идеальная сортировка отходов должна обеспечить разделение их не только по видам, маркам, цвету, но и по форме, степени загрязненности, содержанию инородных материалов, физико-механическим свойствам и т.п., что требует больших затрат и делает утилизацию отходов неэффективной.

Наиболее простой и в то же время удовлетворяющей основным требованиям является сортировка, осуществляемая в процессе сбора отходов непосредственно на рабочем месте, т.е. на стадии их образования (так называемый околомашинный сбор отходов).

Околомашинная переработка отходов позволяет добавлять к первичному сырью наиболее близкие по свойствам вторичные материалы. При этом устраняется необходимость их сортировки по цвету, снижается возможность их загрязнения, отпадает необходимость в складских помещениях, проверке качества вторичных материалов, их сушке и т.п.

Наиболее эффективны сбор и сортировка промышленных отходов при полностью замкнутом цикле переработки пластмасс. Конструктивное оформление таких схем предусматривает сбор отходов, их измельчение и добавление в определенной пропорции к исходному сырью.

Если предприятие не перерабатывает отходы, а поставляет их на сторону, их следует сортировать на местах образования, так как переработка нерассортированных отходов у потребителя связана со значительно более высокими затратами на сортировку и дополнительную очистку отходов от загрязнений. Для упрощения сбора и сортировки отходов возможно изготовление некоторых изделий из смесей отходов различных пластмасс.

В США, где особенно велико использование полиэтилентерефталатной тары, принята и реализуется национальная программа, в соответствии с которой к началу XXI столетия уровень вторичной переработки бутылок из ПЭТФ доведен до 25…30 % (по сравнению с 9…10 % в начале 90 гг. XX столетия). Программа предусматривает выполнение четырех этапов:

– организация раздельного сбора использованной тары у населения;

– сортировка собранного сырья;

– переработка (предварительная и окончательная) в изделия народнохозяйственного назначения;

– сбыт получаемых изделий.

Программа предусматривает также создание пунктов сбора по всей стране с привлечением до 50 % всего населения, координационных центров, налаживание различных связей, рекламу, публикацию сведений по сбору отходов, создание банка данных, обучение населения, создание «горячих» линий (до 800) для передачи своевременной информации и другие мероприятия.

В основе вторичной переработки отходов в Германии лежит «Дуальная система» [39 – 41], включающая раздельный сбор, сортировку и переработку отдельных видов вторичного сырья на предприятиях-производителях материалов и упаковки из них. Для облегчения сбора отходов и направления их на переработку создана система, предусматривающая прием использованной упаковки и ее направление на вторичную переработку при наличии экологической маркировки «Зеленая точка» (Der Grune Punkt). Этот знак обозначает, что данная упаковка подлежит вторичной переработке или повторному использованию, и присваивается упаковкам, прошедшим специальный конкурс, что является основным принципом «Дуальной системы».

Переработка пластмассовых отходов по заводской технологии – наиболее оптимальный метод их использования. При всем разнообразии способов переработки общая схема процесса и применяемого при этом оборудования может быть представлена следующим образом (рис. 1.2).

Первая стадия обычно включает раздельный сбор, сортировку отходов по внешнему виду, отделение непластмассовых компонентов, таких как ветошь, остатки бумажной или деревянной тары, металлических предметов и т.д.

Вторая стадия – одна из наиболее ответственных в процессе. В результате одно- или двустадийного измельчения материал приобретает размеры, достаточные для того, чтобы можно было осуществлять его дальнейшую переработку.

На третьем этапе дробленый материал подвергают отмывке от загрязнений органического и неорганического характера различными растворами, моющими средствами и водой, а также отделяют его от неметаллических примесей.

Четвертая стадия зависит от выбранного способа разделения отходов по видам пластмасс. В случае, если предпочтение отдается мокрому способу, сначала производят разделение отходов, а затем их сушку. При использовании сухих способов, вначале дробленые отходы сушат, а затем классифицируют.

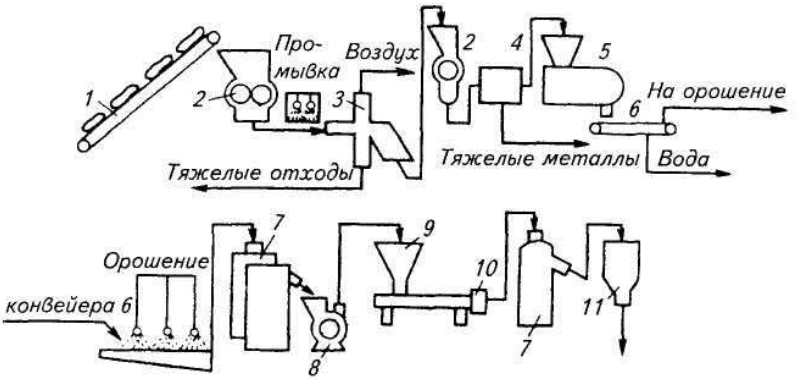


Рис. 1.2. Схема регенерации пластмассовых отходов:
1 – конвейер; *2* – дробилка; *3* – воздушный классификатор;
4 – магнитный сепаратор; *5* – промыватель; *6* – конвейер;
7 – центробежные сушилки; *8* – мельница; *9* – экструдер;
10 – таблетирующее устройство; *11* – бункер для таблеток

Пятая и шестая стадии состоят в том, что высушенные дробленые отходы смешивают при необходимости со стабилизаторами, красителями, наполнителями и другими ингредиентами и гранулируют. Часто на этой же стадии отходы смешивают с товарным продуктом.

Седьмой, заключительной стадией процесса является переработка гранулянта в изделия. Эта стадия практически мало чем отличается от процессов переработки товарного продукта с точки зрения применяемого оборудования, но часто требует специфического подхода к выбору режимов переработки.

Полная реализация описанной схемы на практике является дорогостоящим и трудоемким процессом, поэтому внедрение ее довольно ограничено. Тем не менее известны установки, работающие по данной схеме в г. Фунабаси (Япония) мощностью 1000 т/г. и в Англии – мощностью 2000 т/г.

На установках такого типа перерабатывают, в основном, отходы потребления. Что же касается производственных отходов, то схема процесса их переработки нередко упрощается за счет исключения ряда стадий (особенно 3, 4, 5) и часто сводится к следующей: 1, 2, ..., 6, 7.

В настоящее время вторичная переработка отходов полимерных материалов механическим рециклингом для России является наиболее приемлемым, так как этот способ переработки не требует дорогого специального оборудования и может быть реализован в любом месте накопления отходов.

В секторе упаковки основным считается метод механической и энергетической переработки. Впрочем, выбор предпочитаемых методов варьируется в разных странах. В таблице 1.1 приведены основные методы переработки в странах Европы.

Кроме того, специалисты полагают, что вторичные пластики могут и должны быть дешевле первичных на 20 % и более, что становится возможным при большом объеме и отлаженной системе переработки: чем больше использованных полимеров будет поступать на перерабатывающие предприятия, тем они будут качественнее, чище и дешевле.

В странах ЕС вопросы утилизации отходов упаковки решаются в рамках единого для этих стран закона, направленного на предупреждение нарастания объемов полимерной упаковки и тары, рациональных способов их утилизации, главным образом, вторичной переработкой, организацией рациональной системы сбора и т.д.

На практике переработанные отходы полимеров широко используются в различных отраслях хозяйствования:

– как структурирующие или наполненные материалы в ирригационных работах (дренажные и кабельные трубопроводы), сельском хозяйстве, дорожном строительстве (добавки к бетону, асфальту);

– при производстве строительных материалов (черепица в смесях с неорганическими наполнителями, облицовочные панели для сельскохозяйственных сооружений, плитки для настила полов в промышленных зданиях, катушки для кабелей и др.);

– для изготовления изделий санитарно-технического назначения, химических волокон, автодеталей, потребительских товаров (мебели, одежды, обуви, посудохозяйственных изделий, тканевых покрытий и т.п.) и др.;

– в качестве добавок в полимерные композиции при изготовлении новых упаковочных изделий.

1.1. Обращение с пластиковыми отходами в странах Европы [42]

Страна	Общий объем переработки, %	Переработка для вторичного использования, %	Энергопереработка, %
Дания	85	9	76
Германия	70	51	19
Франция	49	12	37
Италия	22	12	10
Великобритания	17	11	6
Испания	15	9	6
Страны ЕС	38	18	20

1.3. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ПЛАСТМАСС

1.3.1. Переработка отходов полиолефинов

Полиолефины – самый распространенный вид термопластов, который находит широкое применение в различных отраслях промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве. К ним относятся полиэтилен высокой и низкой плотности, полипропилен. Наиболее эффективным способом утилизации отходов полиолефинов является их повторная переработка. Ресурсы вторичных полиолефинов велики: только отходы потребления полиэтилена низкой плотности в 1995 г. достигли 2 млн. т.

Способы переработки отходов полиолефинов зависят от марки полимера и их происхождения. Наиболее просто перерабатываются технологические отходы, т.е. отходы производства, которые не подвергались интенсивному светотепловому воздействию в процессе эксплуатации. Не требуют сложных методов подготовки и отходы потребления из полиэтилена высокой плотности и полипропилена, так как, с одной стороны, изделия, изготавливаемые из этих полимеров, 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 полиэтилен низкой плотности. Такие отходы перед повторным использованием нуждаются только в измельчении и гранулировании [43].

К основным особенностям полиэтиленовых отходов потребления относятся низкая насыпная плотность, пониженные прочностные свойства и высокая вязкость расплава. Изменение физико-механических свойств вторичного полиэтилена, полученного из отходов потребления, является следствием термоокислительного и механохимического воздействия на полимер в процессе переработки и особенно при эксплуатации. Наибольшее изменение свойств происходит именно вследствие протекания фотохимических процессов.

Вторичный полиэтилен низкой плотности, полученный из отработанной сельскохозяйственной пленки, сильно отличается от первичного материала. В таблице 1.2 приведены свойства исходного полиэтилена и этого же материала после повторной переработки и после трехмесячной эксплуатации пленочного материала из него в районе с субтропическим климатом.

Для вторичного полиэтилена низкой плотности, полученного из отходов потребления, характерна низкая текучесть расплава при малых напряжениях сдвига. Однако ее можно регулировать, изменяя

1.2. Изменение свойств полиэтилена низкой плотности при повторной переработке и при старении

Показатели	Полиэтилен		
	исходный	вторичный	вторичный после эксплуатации
Содержание низкомолекулярной фракции, %	0,1	6,2	6,2
Содержание геля, %	0	20,0	20,0
Прочность при растяжении, МПа	15,5	10,0	11,4
Относительное удлинение, %	490,0	125,0	17,0
Стойкость к растрескиванию, ч	8,0	1,0	–
Светостойкость, сут	90,0	50,0	–

температуру и напряжение сдвига. Снижение текучести расплава может служить критерием для ориентировочной оценки свойств отходов и их пригодности для повторного использования совместно с исходным материалом.

Для улучшения свойств вторичного полиолефина в композицию на его основе добавляют минеральные и органические наполнители, ПАВ и другие добавки. Так, введение наполнителя в количестве до 30 % (по объему) позволяет получать из вторичного полиэтилена напорные трубы, упаковочные пленки, многооборотную тару и другую продукцию.

В качестве наполнителя могут быть использованы дисперсные частицы любой природы, в том числе из отходов других материалов, например, древесная мука, резиновая крошка или измельченные отходы реактопластов.

Подготовка отходов полиолефинов к повторному использованию включает следующие операции: сортировку; идентификацию (для смешанных отходов), измельчение, разделение смешанных отходов, мойку, сушку, агломерацию, грануляцию.

Изучение влияния кратности переработки большинства полимеров на их физико-механические свойства показало, что изменение последних связано, как правило, со снижением молекулярной массы пластмасс, разветвленностью их структуры и рядом других показателей. Снижение молекулярной массы пластмасс при многократной переработке приводит к определенным изменениям их прочностных показателей, хотя в качественном отношении они невелики. Обычно содержание отходов в смеси с товарным продуктом не должно превышать

20 %, так как в противном случае резко ухудшается глянец изделий, получаемых при переработке гранулята, появляется шероховатость на их поверхности. Гранулят наиболее распространенного полимера – полиэтилена, как правило, перерабатывают в пленку, которая используется в сельском хозяйстве для неответственных целей, или идет на изготовление мешков для мусора.

Многократная переработка другого полимера из класса полиолефинов – полипропилена 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 полипропилена, а также сами детали по окончании срока эксплуатации могут быть повторно использованы в смеси с исходным материалом для получения новых деталей. В таблице 1.3 приведено изменение свойств полипропилена в процессе многократной переработки.

Отечественная линия ЛПВ-2000 (рис. 1.3), выпускаемая на заводе «Куз-полимермаш», предназначена для комплексной подготовки к переработке кусковых и пленочных отходов полиэтилена. Производи-

1.3. Влияние многократной переработки методом литья под давлением на свойства полипропилена

Показатели	Кратность переработки				
	1	2	3	4	5
Прочность при статическом изгибе, МПа	42,3	37,2	30,8	32,9	34,2
Удельная ударная вязкость, кДж/м	1300	1250	1100	1050	990
Прочность при растяжении, МПа	35,6	34,1	35,2	34,6	33,5
Относительное удлинение, %	52	55	59	61	98

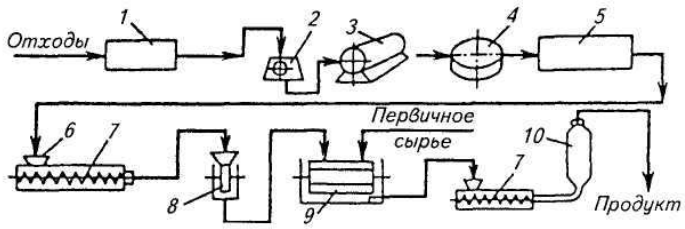


Рис. 1.3. Схема производства вторичной полиэтиленовой пленки:
1 – узел сортировки отходов; *2* – дробилка; *3* – моечная машина; *4* – центрифуга; *5* – сушилка; *6* – питатель; *7* – экструзионные прессы; *8* – гранулятор; *9* – смеситель; *10* – пленочный агрегат

тельность линии составляет 2000 т/г. Измельчение отходов производится в роторных измельчителях (ИПР-300 – для кусковых отходов, ИРНП-300-600 – для пленочных отходов).

Измельченные отходы в виде пульпы попадают в шнековый промыватель, откуда поступают в отжимное устройство и далее в вихревую сушилку, а затем в шнековый экструдер на грануляцию. Размер гранул, получаемых на этой линии, 2…5 мм.

1.3.2. Переработка отходов поливинилхлорида

Поливинилхлорид и его сополимеры широко применяют в производстве покрытий для полов, стен, мебели, обивочных и галантерейных искусственных кож, пленок, клеенки, обуви, литьевых изделий и т.д. Значительные количества отходов этого полимера образуются как при изготовлении этих материалов, так и при их использовании в промышленности, в частности, при раскрое рулонных материалов.

Можно выделить три основных направления в использовании отходов ПВХ:

– переработка отходов в линолеум, искусственную кожу и пленочные материалы;

– химическое восстановление ПВХ-композиций с регенерированием, как правило, пластификаторов и ПВХ-порошка;

– использование отходов в различных полимерных композициях.

Только на автомобильных заводах России при вырубке деталей обивки и облицовки салонов автомобилей ежегодно образуются сотни тонн отходов искусственной кожи и пленочных материалов на основе ПВХ. Такие отходы могут быть использованы для получения вторичных материальных ресурсов и для последующего изготовления из них линолеума, упаковочных пленочных материалов и другой продукции.

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 [44].

При сборе отходов нельзя допускать смешивания обрезков искусственной кожи различных цветов [45 – 47]. В общем виде схема регенерации отходов искусственной кожи и пленочных материалов представлена на рис. 1.4.

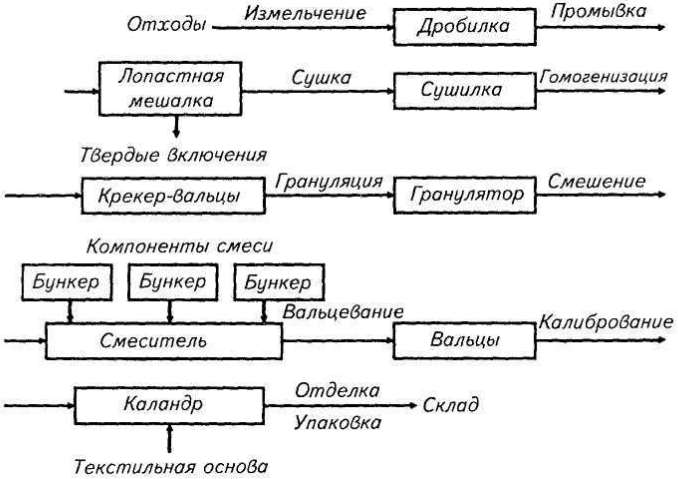


Рис. 1.4. Схема регенерации отходов искусственной кожи и пленочных материалов

По такой схеме можно изготавливать различные покрытия для полов (линолеум, линолеумную плитку), искусственную кожу технического назначения и другие материалы.

1.3.3. Переработка отходов полиуретана, полиамида, полистирольных пластиков и реактопластов

В переработке полиуретановых (ПУ) отходов можно выделить следующие основные направления:

– переработку, связанную с предварительным растворением и выделением полиола или диизоцианата;

– гидролиз полиуретановых отходов;

– использование полиуретановых отходов в качестве наполнителей.

В таблице 1.4 приведены физико-механические показатели изделий, изготовленных с использованием отходов ПУ.

Измельченные ПУ-отходы в виде порошка можно добавлять в термопластичный ПУ, в резиновые смеси на основе нитрильных, хлоропреновых и других полярных эластомеров в качестве усиливающих наполнителей до 50 % (масс). Например, для изготовления различных упругих деталей используют композицию, состоящую из 6…25 % уретанового форполимера, 4…5 % полистирола и 60…90 % измельченных отходов ПУ.

1.4. Физико-механические показатели изделий, изготовленных с использованием отходов ПУ

Показатели	Значение показателей при содержании отходов ПУ (массовые части) на 100 массовых частей форполимера		
	10	15	20
Вязкость раствора при 20 °С, Па·с	9600	9600	9600
Прочность на разрыв, МПа	40,9	37,2	30,3
Относительное удлинение, %	407	445	419
Модуль (300 %), МПа	22,4	17,1	15,0
Сопротивление раздиру, Н/мм	96	82	78
Твердость по Шору, усл. ед.	94	93,5	92

Возможно также изготовление формованных деталей из отходов пористых или непористых полиуретановых эластомеров.

Известные способы переработки полиамидных отходов могут быть разделены на две основные группы: физические и химические. Физические способы используют для переработки отходов волокна и изделий из него. Из химических способов переработки полиамидных отходов наиболее часто используют следующие:

– деполимеризацию отходов с целью получения мономеров для последующего производства полимеров;

– расплавление отходов с целью получения гранул полимеров;

– переосаждение из растворов;

– введение измельченных волокон в качестве наполнителя в пластмассы;

– модификацию композиций с целью получения полимерных материалов с новыми свойствами.

Для переработки технологических отходов полиамида в промышленности химических волокон широко применяется способ деполимеризации. К преимуществам метода относится возможность использования регенерированного капролактама. Получаемый капролактам обладает высокими свойствами и может быть использован для производства волокон технического назначения [48 – 50].

Основным критерием, определяющим возможность практического использования методов деполимеризации, является чистота отходов. Характер и степень загрязненности отходов не только определяют метод переработки отходов, но существенно влияют на свойства получаемого изделия из вторичного материала, а, следовательно, и области применения вторичного сырья. При сильной загрязненности отходы

приходится подвергать сложной очистке, что повышает стоимость регенерированного волокна.

Полиамид может повторно перерабатываться до четырех и более раз. Четырехкратная переработка полиамидных отходов практически не изменяет его важнейших свойств, в том числе такого показателя, как диэлектрическая проницаемость.

Объем отходов материалов на основе полистирола достигает 50 тыс. т в год. Сильно загрязненные отходы к использованию в качестве вторичных материальных ресурсов непригодны вследствие неоднородности и низкого качества. Их можно использовать для получения жидких продуктов методом деструкции, а также в качестве топлива.

Технологические отходы по физико-механическим и технологическим свойствам не отличаются от первичного сырья. Эти отходы являются возвратными и используются на месте образования [51]. Наиболее распространенным методом переработки технологических отходов полистирола является литье под давлением. В таблице 1.5 приведены данные об изменении свойств полистирола в процессе многократной переработки.

Несмотря на деструктивные процессы, протекающие при многократной переработке полистирола, о чем свидетельствует уменьшение молекулярной массы, его основные физико-механические свойства изменяются незначительно.

Многократная (до пяти раз) экструзия полистирола приводит к незначительному увеличению показателя текучести расплава (ПТР) и небольшому уменьшению прочностных свойств. В то же время относительное удлинение уменьшается почти в два раза.

Бракованные изделия из полистирола перерабатывают после измельчения, как правило, в смеси с первичным продуктом. Измельчение проводится в роторных измельчителях, а полученная крошка вследствие однородности по гранулометрическому составу не требует дополнительной грануляции. Размер крошки зависит от зазора между ножа-

1.5. Влияние многократной переработки на свойства ударопрочного полистирола

Показатели	Кратность переработки				
	1	2	3	4	5
Удельная ударная вязкость, кДж/м^2	3350	3510	3580	3300	3400
Прочность при растяжении, МПа	35,4	34,2	34,5	33,7	33,7
Относительное удлинение, %	21,1	20,3	12,2	9,6	11,1
Молекулярная масса×10^3	193,6	171,8	160,3	149,6	137,7
Текучесть расплава, г/10 мин	4,44	5,35	5,75	5,86	5,96

ми измельчителя. Получаемую крошку можно добавлять в первичное сырье в любых количествах без ухудшения качества выпускаемой продукции.

При изготовлении изделий из реактопластов образуется значительное количество технологических отходов (до 20 %). Рассмотренными выше способами переработать такие отходы нельзя, поскольку отличие реактопластов от термопластов заключается в образовании в процессе химической реакции трехмерной структуры, препятствующей переходу полимера в расплав при нагревании (или в раствор при растворении).

Однако реактопласты содержат небольшое количество несшитого полимера, что позволяет использовать измельченные отходы этих материалов в качестве активного наполнителя, благодаря чему их можно вводить в качестве добавок к основному сырью и в другие композиции.

Отходы реактопластов перерабатывают только там, где они образуются. Их собирают, измельчают и фракционируют.

Перспективы. Вторпереработка – главный метод избавления от полимерных отходов в индустриально развитых странах. Так, в США существует национальная программа по переработке полиэтилентерефталатной тары, включающая сбор бутылок у населения (на этом этапе планируется привлечь к исполнению программы до 50 % граждан), переработка в различные изделия, их реализация.

Уровень выполнения этой программы за последние 10 лет вырос с 10 % на старте до 30 % в 2002 г. Реализации проекта способствует активная информационная политика: специальные центры, публикация информации по сбору отходов, реклама, огромное количество специальных телефонных линий и прочие атрибуты западного способа пропаганды.

После того как была создана система сбора и утилизации, население стало идеологически подготовленным, по всей стране установлены специальные поддоны для сбора бутылок, наступает очередь законодателей и время силового воздействия на производителей. Так, в ЕС существуют единые нормативные акты, которые регулируют объемы пластикового мусора (в том числе упаковки) на мусорных отвалах; оговорены оптимальные и экономически целесообразные способы утилизации и/или переработки пластиковых отходов. В ряде высокоразвитых стран обязательно нанесение на продукцию из полимеров (и не только) специальной экологической маркировки, что значительно удешевляет переработку. Сейчас ЕС борется за введение общей маркировки для всех стран, входящих в содружество. На сегодняшний день общее европейское законодательство предписывает применять при выпуске новой полимерной упаковки 15 % так называемых вторичных полимерных материалов.

В ряде европейских государств эта доля увеличивается внутренним законодательством (например, Германия стремится к 60 %).

Кроме названных выше экономических издержек, существует ряд вопросов:

– как много покупателей будут приобретать продукцию, упакованную «вторичными» полимерами;

– каков будет процент людей, воздерживающихся от таких покупок;

– сколько раз можно будет подвергать полимер повторной переработке;

– очевидно, что бесконечная переработка невозможна; как поступать с «уставшим» материалом, объем которого неуклонно растет;

– снова сжигание или вывоз на свалки?

Для России три последних вопроса представляют пока зрительский интерес, поскольку не пройден даже подготовительный этап: система сбора, сортировки пластиковых отходов в зачаточном состоянии. На сегодняшнем этапе (по данным Минприроды Российской Федерации) только 30 % отходов используется повторно или перерабатывается, в том числе промышленные отходы перерабатываются на 35 %, а твердые бытовые отходы (ТБО) всего на 3…4 %.

В целом, страна не готова к вторичной переработке полимеров ни морально, ни материально. Вторичная переработка, включающая агитационную кампанию (теле- и радиовещание, средства массовой информации), повсеместный прием тары у потребителей, дополнительную сортировку на свалках и строительство специальных предприятий, требует огромных по российским масштабам инвестиций: вполне очевидно, что подобные программы не под силу администрациям городов и коммунальным службам.

Министерством природы разработана федеральная система переработки отходов, на создание условий для развития бизнеса по переработке различных видов отходов в рамках этой программы запланировано потратить 42 млрд. р.

Как видно, для России данное направление является целиком затратным, финансируемым со стороны федеральных структур и международных фондов. А в зарубежной практике вторичная переработка отходов является одним из самых прибыльных видов бизнеса (показателем экономической привлекательности является, в частности, проникновение на этот рынок мафиозных структур).

Мировой рынок услуг по переработке промышленных отходов и очистке почв оценивается в 20 млрд. евро. Россия представляет в этом отношении интерес для лидеров данного бизнеса, однако по разным

прогнозам, достигнет нынешнего европейского уровня вторичной переработки только через 5…10 лет.

Выводы. 1. Существующие методы утилизации отходов полимерной тары и упаковки имеют значительные недостатки, в частности, захоронение и сжигание приводят к загрязнению окружающей среды и нерациональному использованию земельных угодий, термические методы требуют больших финансовых затрат, и пока сложны технологически.

2. Существующие технологии по переработке отходов полимерной тары и упаковки включают в себя стадии предварительной подготовки: раздельный сбор, сортировку отходов, их измельчение, промывку, сушку. Использование всех этих стадий делает технологию утилизации достаточно энерго- и трудоемкой и, в конечном итоге, приводит к увеличению производственных площадей и, как следствие, к повышению себестоимости получаемого вторматериала. Вместе с тем при использовании агломераторов получается материал, различный по гранулометрическому составу и насыпной плотности, что негативно сказывается при дальнейшей переработке в материальных цилиндрах перерабатывающих машин. Также в процессе переработки возможно наматывание пленочных отходов на вал, что приводит к снижению производительности.

1.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективным решением экологической проблемы и проблемы нехватки сырьевых ресурсов, связанных с утилизацией отходов полимерных материалов, может стать технология, разработанная на кафедре «Переработка полимеров и упаковочное производство» ФГБОУ ВПО «ТГТУ» и позволяющая вторично перерабатывать отходы полимерной тары и упаковки на валково-шнековом агрегате, с целью получения вторичного термопластичного материала заданных свойств и цвета.

Проведенный анализ литературы по данной теме показал, что переработка отходов полимерной тары и упаковки вызывает значительные трудности, связанные с измельчением и сушкой. Данная технология исключает эти стадии предварительной подготовки.

Цель работы – разработка конструкции валково-шнекового агрегата и совмещенного технологического процесса утилизации полимерной тары и упаковки на валково-шнековом оборудовании.

В соответствии с этим, в данной работе решались следующие ***задачи***:

– анализ современного состояния в области утилизации полимерной тары и упаковки;

– создание лабораторного экспериментального стенда валково-шнекового агрегата по изучению непрерывного процесса утилизации полимерной тары и упаковки;

– разработка непрерывной технологии совмещенных процессов вальцевания и экструзии для утилизации полимерной тары и упаковки, позволяющей снизить энергетические и трудовые затраты, сократить производственные площади, что приведет к уменьшению себестоимости получаемого вторичного материала;

– разработка методики расчета и программного обеспечения для определения величины суммарной деформации сдвига совмещенного процесса валково-шнековой переработки, характеризующей влияние различных геометрических размеров валково-шнекового оборудования и технологических параметров процесса утилизации на физико-механические показатели получаемого вторичного термопластичного материала (предел прочности и относительное удлинение при разрыве);

– определение значения величины суммарной деформации сдвига совмещенного процесса утилизации, соответствующего заданным физико-механическим показателям вторичного материала;

– исследование влияния конструктивных и технологических параметров валково-шнекового оборудования и процесса валково-шнековой утилизации на физико-механические показатели получаемого вторичного материала;

– создание методики инженерного расчета геометрических размеров валково-шнекового оборудования и технологических параметров совмещенного процесса утилизации с учетом заданных физико-механических показателей получаемого вторматериала.

2. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВЫМ МЕТОДОМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВЫМ МЕТОДОМ

В соответствии с поставленной задачей и целями научного исследования было разработано оборудование и технологический процесс для вторичной переработки отходов термопластичных материалов по непрерывной технологии (рис. 2.1).

Технологический процесс осуществляется следующим образом: отходы с содержанием посторонних примесей не более 5 % поступают на участок сортировки *1*, в процессе которой из них удаляют случайные инородные и металлические включения и выбраковывают сильно загрязненные куски.

Далее отходы полимеров непрерывно загружаются через загрузочный бункер, расположенный с левой стороны поверхности валков валково-шнекового агрегата *2*. Под действием сдвиговых напряжений и сил адгезии отходы термопластов затягиваются в межвалковый зазор

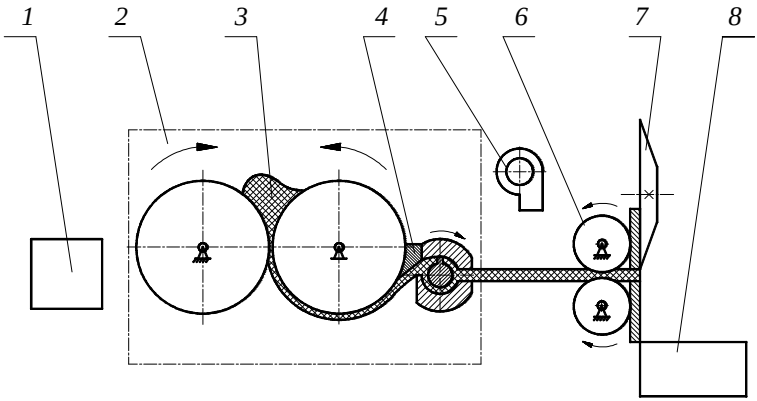


Рис. 2.1. Схема технологического процесса утилизации отходов полимерной тары и упаковки валково-шнековым методом:
1 – участок сортировки отходов; *2* – валково-шнековый агрегат; *3* – отходы полимеров; *4* – шнековое отборочное устройство; *5* – устройство охлаждения; *6* – тянущее устройство; *7* – режущее устройство; *8* – емкость для гранул

и транспортируются вдоль оси валков. В процессе вальцевания происходит плавление отходов, удаление летучих компонентов, пластикация, возможно модифицирование различными добавками и окрашивание расплава.

Для профилирования вальцуемого материала, расплав полимера снимается специальным ножом с противоположной стороны поверхности валков и направляется в межвитковое пространство шнека шнекового отборочного устройства валково-шнекового агрегата *2*. Захватываясь витками шнека, расплав полимера транспортируется к зоне выгрузки, где продавливается через формующее отверстие, с образованием экструдата заданного поперечного сечения. Полученный экструдат охлаждается сжатым воздухом вентилятора *5*, далее режется фрезой *7*. Полученные гранулы собираются в емкости *8*.

По данной технологии могут перерабатываться не только отходы полимерной тары и упаковки производственного и общественного потребления, но и различные технологические отходы термопластов, причем в зависимости от конструкции формующей головки, возможно получение изделий непосредственно из вторсырья.

2.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для осуществления разработанного технологического процесса утилизации отходов полимерной тары и упаковки был спроектирован и изготовлен лабораторный вариант валково-шнекового агрегата (рис. 2.2).

Экспериментальная установка (ЭУ) (рис. 2.3) выполнена на базе лабораторных вальцов СМ 200 80/80 и представляет собой горизонтально расположенные полые валки 1 диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм. Валки вращаются навстречу друг другу с разными окружными скоростями.

Число оборотов валков:

- задний валок от 0 до 40,8 об/мин;
- передний валок от 0 до 30 об/мин;
- фрикция между валками 1:1; 1:1,2; 1:1,36.

Привод валков осуществляется от электродвигателя постоянного тока *1*. Использование данного типа двигателя позволяет плавно регулировать частоту вращения валков.

Передача вращающего момента осуществляется от вала электродвигателя постоянного тока *1* через муфту *2* (МУВП), редуктор *3* и передаточные шестерни *4* на задний валок и через фрикционную передачу *5* на передний.

Приводные и фрикционные шестерни заключены в кожухи, нижняя часть которых представляет собой масляные ванны для смазки.

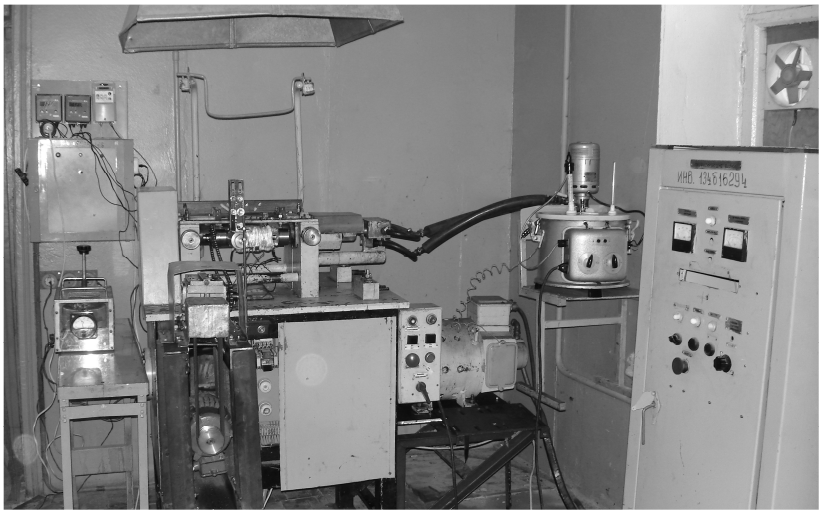


Рис. 2.2. Фото экспериментальной установки

Валки вальцов установлены на подшипниках скольжения, при этом корпуса подшипников заднего валка закреплены в станинах неподвижно, корпуса подшипников переднего валка имеют возможность перемещаться в станинах с целью регулировки зазора между валками *1*.

Механизм регулировки зазора *7* позволяет перемещать подшипники переднего валка по направляющим станины и фиксировать их в заданном положении. Регулировка зазора производится при помощи пары винт–гайка, расположенных по обе стороны переднего (рабочего) валка.

На каждой из станин вальцов со стороны рабочего валка 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 калибромером с точностью до ± 0,05 мм.

Каждая из двух станин сверху стянута поперечиной и установлена на фундаментной плите.

Для поддержания заданного температурного режима вторичной переработки отходов полимерных материалов валки вальцов снабжены устройством термостатирования *14* (термостат типа ТС-16). Термостатирующей жидкостью является высокотемпературный теплоноситель Petro-Canada CALFLO. Замер температуры поверхности валков

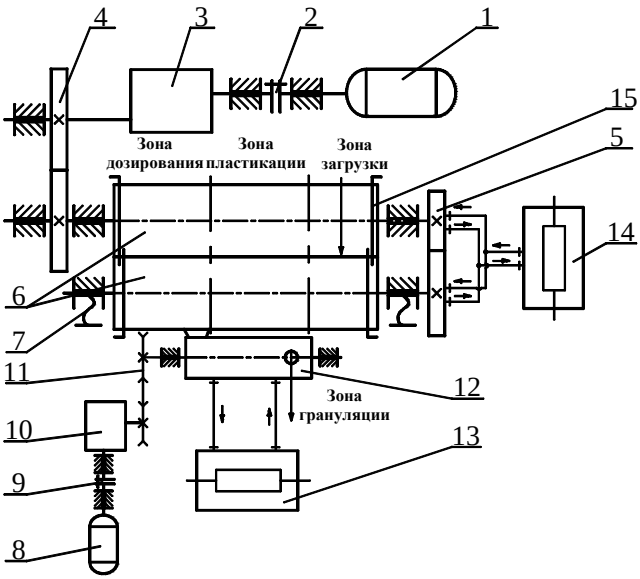


Рис. 2.3. Схема лабораторного валково-шнекового агрегата
1 – электродвигатель; *2, 9* – муфта; *3* – редуктор; *4* – передаточные шестерни; *5* – фрикционная передача; *6* – валки; *7* – механизм регулировки зазора; *8* – электродвигатель отборочного устройства; *10* – червячный редуктор; *11* – ременная передача; *12* – шнековое отборочное устройство; *13, 14* – термостат, ограничительные стрелы

производился с применением лучковой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 до и после опыта. Измерение температуры вальцуемого материала осуществляется посредством игольчатой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 на протяжении всего времени проведения эксперимента. Температура переработки T = 130 °С.

С целью предотвращения попадания обрабатываемого материала в подшипники валков установлены стрелы ограничительные *3*. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала достигается установкой на вальцах аварийного устройства. В ЭУ применено электродинамическое торможение. Для смазки поверхностей трущихся пар вальцы снабжены системой смазки.

Для обеспечения непрерывной переработки отходов вальцы снабжены загрузочным бункером (условно не показан) и шнековым отборочным устройством *12* [52], которое позволяет подрезать и снимать с помощью специального подрезного ножа расплав полимера с поверхности валков и направлять в винтовой канал шнека зоны за-

грузки. Также наличие шнекового отборочного устройства позволяет дополнительно гомогенизировать, пластицировать и диспергировать расплав полимера, что улучшает качество целевого продукта.

Привод шнекового отборочного устройства осуществляется с помощью электродвигателя переменного тока *8*, вращающий момент с которого через муфту *9* передается на одноступенчатый червячный редуктора *10* и затем на вал шнека.

Шнековое отборочное устройство снабжено рубашкой обогрева. Подача теплоносителя осуществляется от термостата *13*.

Шнековое отборочное устройство (рис. 2.4) представляет собой цилиндр *1* с расположенным внутри шнеком *2*, установленным на двух подшипниковых опорах.

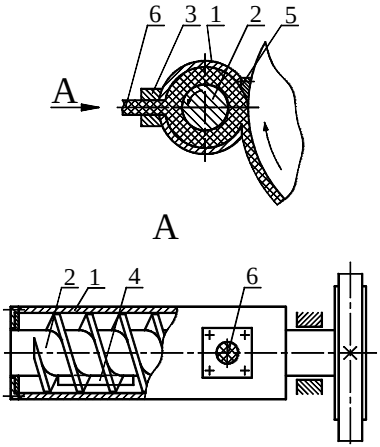


Рис. 2.4. Схема шнекового отборочного устройство
1 – цилиндр; *2* – шнек; *3* – профилирующая формующая головка; *4* – загрузочное окно; *5* – нож; *6* – расплав полимера

Полимерный материал непрерывно срезается с поверхности валка специальным ножом *5* и направляется в загрузочное окно *4*, выполненное с одной стороны цилиндра, и, захватываясь витками прямой нарезки червяка, движется в сторону зоны выгрузки. Шнек выполняет функцию транспортирования массы и создания давления перед формующей головкой *3*, где профилируется сечение экструдата *6*.

Шнековое отборочное устройство снабжено съемными профилирующими приставками с различным количеством фильер разной конфигурации, что дает возможность получения изделий непосредственно из вторичного сырья. На данную конструкцию получен патент на полезную модель Российской Федерации [52].

2.3. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШНЕКОВОГО ОТБОРОЧНОГО УСТРОЙСТВА

С целью обеспечения непрерывной работы валково-шнекового агрегата необходимо согласовать производительности валковой машины и шнекового отборочного устройства. Для решения поставленной задачи в качестве условия согласования было выбрано равенство производительностей вальцов и шнекового отборочного устройства.

Таким образом, расчет сводится к определению частоты вращения шнека, при которой может быть обеспечена заданная производительность процесса. При этом геометрические размеры шнека шнекового отборочного устройства (шаг винтовой нарезки шнека, глубина винтового канала шнека, длина нарезной части шнека, радиальный зазор, угол подъема винтовой нарезки шнека) могут быть выражены через коэффициенты [53].

Так, производительность вальцов, работающих по непрерывной схеме, может определена [54, 55]

$$Q_{\text{в}} = 60\pi D_{\text{в}} n_{\text{в}} F_{\text{л}} \rho \eta , \tag{2.1}$$

где $D_{\text{в}}$ – диаметр валка вальцов, м; $n_{\text{в}}$ – число оборотов переднего валка, об/мин; $F_{\text{л}}$ – площадь поперечного сечения ленты материала, снимаемого с валка, м^2; ρ – плотность смеси, кг/м^3; η – коэффициент использования машинного времени (η = 0,8…0,9).

Производительность шнекового отборочного устройства определяем из уравнения [53, 56, 57]

$$Q_{\text{ш}} = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} n_{\text{ш}} , \tag{2.2}$$

где K – коэффициент геометрической формы головки, м^3; $n_{\text{ш}}$ – частота вращения шнека, с$^{-1}$; α – постоянная прямого потока, м^3; β – постоянная обратного потока, м^3; γ – постоянная потока утечки, м^3.

Значения постоянных прямого потока α, обратного β, и потока утечки γ определяются следующим образом:

$$\alpha = \frac{\pi D_{\text{ш}} h (t - ie) \cos^2 \varphi}{2} ; \tag{2.3}$$

$$\beta = \frac{h^3 (t - ie) \sin 2\varphi}{24 L_{\text{ш}}} ; \tag{2.4}$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D_{\text{ш}}{}^2 \delta^3 \operatorname{tg}\varphi \sin \varphi}{10 e L_{\text{ш}}} , \tag{2.5}$$

где $D_{\text{ш}}$ – наружный диаметр шнека, м; t – шаг нарезки шнека, м; h – глубина нарезки шнека, м; e – ширина гребня нарезки шнека, м; i – число заходов шнека; $L_{\text{ш}}$ – длина зоны дозирования (в данном случае длина нарезной части шнека), м; δ – величина радиального зазора между гребнем нарезки и внутренней поверхностью материального цилиндра, м; φ – угол наклона винтовой нарезки.

В конечном итоге, условие, обеспечивающее согласование, может быть записано в виде приравнивания (2.1) и (2.2)

$$60\pi D n_{в} F_{л} \rho \eta = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} n_{ш} . \qquad (2.6)$$

Определяющее влияние на производительность устройства будет оказывать дозирующая зона шнека. Производительность дозирующей зоны в значительной степени зависит от геометрических параметров самого шнека. Производительность же шнекового отборочного устройства в целом зависит не только от геометрических параметров шнека и частоты его вращения, но и в значительной степени от геометрии формующей головки [53, 58].

На основании полученной зависимости был разработан алгоритм расчета геометрических размеров шнекового отборочного устройства (прил. 1). Результатом работы программы является множество значений диаметров $D_{ш}$ и частот вращения $n_{ш}$ шнека шнекового отборочного устройства, при которых обеспечивается условие согласования (2.6) для заданных геометрических размеров профилирующей формующей головки и коэффициентов для геометрических размеров шнека.

2.1. Идентификатор к программе расчета геометрических размеров шнекового отборочного устройства

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения
Tp	*Tp*	Рабочая температура	°C
Ts	*Ts*	Температура стеклования	°C
It	*I*	Индекс течения материала	г/10 мин
K_0	*K*	Коэффициент консистентности	Па·с^n
lc	*l*	Длина формующей части	мм
dc	*d*	Диаметр формующей части	мм
Nv	*Nv*	Частота вращения валков	об./мин
Dv	*Dv*	Диаметр валка	мм
h0	*h*	Межвалковый зазор	мм
Lv	*Lv*	Длина валка	мм
HL	*HL*	Высота срезаемой ленты	мм
B	*B*	Ширина срезаемой ленты	мм
D	*D*	Диаметр шнека	мм
l0	*l0*	Длина шнека	мм
i	*i*	Заходность	
Ke	*Ke*	Ширина гребня	мм
t	*t*	Шаг нарезки	мм

Продолжение табл. 2.1

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения
Kh	*Kh*	Глубина нарезки	мм
Kdelta	δk	Радиальный зазор	мм
Qv	*Qv*	Производительность вальцов по непрерывной схеме	кг/час
Nch	*Nch*	Частота вращения шнека	об/мин
alfa	α	Постоянная прямого потока шнека с постоянными геометрическими размерами	$м^3$
betta	β	Постоянная обратного потока шнека с постоянными геометрическими размерами	$м^3$
Fa	*Fa*	Коэффициент прямотока	
Fb	*Fb*	Коэффициент противотока	
Kg	*Kg*	Коэффициент геометрической формы	$м^3$
Q	*Q*	Производительность	$м^3/с$
Sc	*Sc*	Скорость сдвига в формующей полости	$с^{-1}$

Объект исследования. В качестве объекта исследования принят непрерывный процесс утилизации отходов ПЭВД производственного и общественного потребления на лабораторном валково-шнековом агрегате.

2.2. Свойства первичного ПЭВД (марка 15803-020, натуральный, сорт – высший)

Наименование показателя	Значение
Размер гранул, мм	от 2 до 5
Плотность, ρ, $г/см^3$	0,919 ± 0,01
Показатель текучести расплава с доп. в %, *I*, г/10 мин	1,8 ±6
Предел текучести при растяжении, $\sigma_т$, Па ($кГс/см^2$)	$93 \cdot 10^5$ (95)

Продолжение табл. 2.2

Наименование показателя	Значение
Прочность при разрыве, $\sigma_р$, Па (кГс/см^2)	$115 \cdot 10^5$ (115)
Относительное удлинение при разрыве, ε, %	600
Реологические свойства при температуре переработки (t = 130 °С) – индекс течения, n – коэффициент консистентности, K, МПа·с	 0,2 0,2
Молекулярная масса, M	18 500

2.3. Требования, предъявляемые к перерабатываемым отходам полимерной тары и упаковки

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

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ЗАДАННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Установлено, что на физико-механические показатели получаемого вторичного термопластичного материала (прочность и относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает сдвиговая деформация, возникающая в рабочих органах валково-шнекового агрегата. Она зависит от различных конструктивных (геометрические размеры валково-шнекового агрегата) и технологических (частота вращения валков вальцов и шнека валково-шнекового агрегата, величина минимального зазора между валками, фрикции, «запаса» материала на валках при заданной температуре переработки) параметров процесса вальцевания, экструзии и профилирования отходов полимерных материалов в формующей головке.

Таким образом, была поставлена задача: определить комплексный интегральный критерий переработки материалов, характеризующий физико-механические показатели вторичного термопластичного материала, величина которого может быть положена в основу при расчете конструктивных и технологических параметров валково-шнековых агрегатов.

Анализ литературных источников [59 – 62] показал, что в основу интегрального критерия качества может быть положена величина суммарной деформации сдвига, возникающая в зазорах перерабатывающих машин.

Величина суммарной деформации сдвига для валково-шнекового процесса утилизации полимерной тары и упаковки может быть представлена как алгебраическая сумма суммарных величин сдвига для непрерывного процесса вальцевания, процесса экструзии при отборе расплава полимера и суммарной величины сдвига, возникающей в формующих каналах

$$\gamma_{сум} = \gamma_в + \gamma_ш + \gamma_{фк}, \qquad (3.1)$$

где $\gamma_в$, $\gamma_ш$, $\gamma_{фк}$ – суммарная величина сдвига для непрерывного процесса вальцевания в каналах шнека, в формующих каналах соответственно.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СУММАРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА ПРИ ВАЛЬЦЕВАНИИ ТЕРМОПЛАСТОВ

3.1.1. Определение величины суммарной деформации сдвига при периодическом режиме процесса вальцевания термопластов

Оценка смесительного эффекта при вальцевании полимерных материалов были рассмотрены в работах [59 – 61, 63].

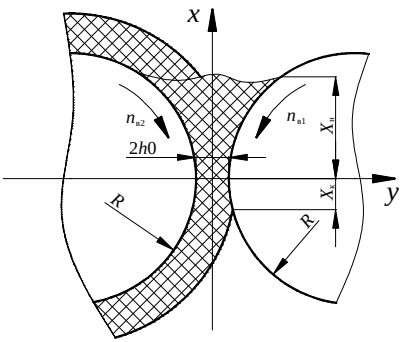


Рис. 3.1. Схема процесса вальцевания

Таким образом, в соответствии с основными положениями теории ламинарного смешения, смесительное воздействие при однократном прохождении вальцуемого материала через зазор можно оценить по величине средней деформации сдвига, которая при этом реализуется в элементарном объеме вальцуемой массы.

В зоне поступательного течения линии тока располагаются примерно параллельно поверхности валков.

Поэтому величина деформации сдвига в пределах этой зоны определится выражением [61]

$$\gamma = \left(\frac{R_в}{h_0}\right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \int_{X_н}^{X_к} \frac{3\eta(X^2 - X_н^2) + \lambda(1+X^2)}{(1+\lambda^2)^2} dX =$$

$$= \left(\frac{R_в}{h_0}\right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{3\eta}{4}\left[\left(1-X_к^2\right)(\operatorname{arctg}X_к - \operatorname{arctg}X_н) + \dfrac{\left(1+X_к^2\right)X_н}{1+X_н^2} - X_к\right] + \\ + \dfrac{\lambda}{2}\left(\dfrac{X_к}{1+X_к^2} - \dfrac{X_н}{1+X_н^2} + \operatorname{arctg}X_к - \operatorname{arctg}X_н\right) \end{array} \right\}, \tag{3.2}$$

где v_x – скоростной поток в направлении оси X; $U_0 = (U_1 + U_2)/2$ – средняя величина окружной скорости валков см/с; U_1, U_2 – величины окружных скоростей, соответственно заднего и переднего валков, см/с; $\lambda = \dfrac{U_1 - U_2}{2U_0}$; $\eta = y/h$; $R_в$ – радиус валков, см; h_0 – половина межвалкового зазора, см.

Величина средней деформации сдвига, которой подвергается удельный объем материала при однократном проходе через зазор

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{-1}^{+1} \gamma d\eta}{Q \frac{x_к x_н}{U_0}}. \qquad (3.3)$$

При этом

$$X_к^2 = \frac{Q}{2U_0 h_0} - 1. \qquad (3.4)$$

Тогда, учитывая выражение (3.3), получим

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{-1}^{+1} \gamma d\eta}{2h_0 (2h_0 R_в)^{1/2} (1 + X_к^2)(X_к - X_н)}. \qquad (3.5)$$

Вычисляем определенный интеграл, входящий в уравнение (3.3):

$$\int_{-1}^{+1} \frac{\eta d\eta}{v_x} \approx \frac{1}{U_0} \frac{1-\lambda}{\left[1 - \lambda^2 \left(1 + X_к^2\right)\right]}; \qquad (3.6)$$

$$\int_{-1}^{+1} \frac{d\eta}{v_x} = \frac{1}{2U_0 \left(1 + X_к^2\right)}. \qquad (3.7)$$

Тогда величина средней удельной деформации сдвига, реализуемой за один проход при вальцевании с фрикцией, будет определяться выражением

$$\bar{\gamma} = \left\{ \frac{3}{4} \left[\left(1 - X_к^2\right) (\operatorname{arctg} X_к - \operatorname{arctg} X_н) + \frac{(1 + X_к^2) X_н}{1 + X_н^2} - X_к^2 \right] \frac{1-\lambda}{1 - \lambda^2 (1 + X_к^2)} + \right.$$

$$\left. + \frac{\lambda}{4(1 + X_к^2)} \left(\frac{X_к}{1 + X_к^2} - \frac{X_н}{1 + X_н^2} + + \operatorname{arctg} X_к - \operatorname{arctg} X_н \right) \right\} \times$$

$$\times \frac{1}{\left[2\sqrt{2} h_0^2 (1 + X_к^2)(X_к - X_н)\right]}. \qquad (3.8)$$

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за все время вальцевания, равна произведению однократного воздействия на число проходов

$$\gamma_п = \bar{\gamma} i(t), \qquad (3.9)$$

где $i(t) = \frac{U_0 \tau_в (1 + X_к^2)}{(X_к - X_н)\sqrt{2R_в h_0}}$ – число проходов; $\tau_в$ – время вальцевания, с.

3.1.2. Определение величины суммарной деформации сдвига при непрерывном режиме процесса вальцевания термопластов

В работе [64] предложена модель определения величины суммарной деформации сдвига для непрерывного процесса вальцевания как интегральной величины. При этом длина валка разбивалась на множество элементарных участков *dl*, на которых осуществляется периодический процесс; считалось, что высота «запаса» полимера на валках вальцов изменяется от зоны загрузки до зоны выгрузки по линейному закону.

Наряду с этим длина каждого последующего элементарного участка *dl* определяется, исходя из скоростных потоков течения материала вдоль оси *X* (поперечное сечение валка) и оси *Z* (сечение вдоль оси валка).

В итоге, для определения величины суммарной деформации сдвига непрерывного процесса вальцевания необходимо произвести интегрирование уравнения (3.9) и найти среднеинтегральное значение

$$\gamma_{н} = \frac{1}{L_{в}} \int_{0}^{L_{в}} \gamma_{п} dl \,, \qquad (3.10)$$

где $\gamma_{п}$ – величина суммарной деформация сдвига, реализуемая при периодическом режиме вальцевании.

Недостатками описанной методики является погрешность, вносимая при определении элементарных участков *dl*, исходя из скоростных потоков течения материала, и использование линейной зависимости в качестве закона распределения материала по поверхности валка от зоны загрузки к зоне выгрузки, особенно при малых «запасах» (объемах). При этом координата входа в зоне выгрузки и время пребывания материала на валках должны задаваться, исходя из проведенных дополнительных экспериментальных исследований.

В связи с этим предложено в качестве функциональной зависимости, описывающей распределение «запаса» полимера на валках вальцов от зоны загрузки до зоны выгрузки, использовать безразмерный комплекс $Q^{*}Z$ [63 – 65]:

$$Q^{*}Z = \int_{X_{к0}}^{X_{к}} \left[\frac{2X_{к}^{2}\left(3X_{к}^{2}+5\right)}{\left(1+X_{к}^{2}\right)^{2}} \left(X_{к} + X_{к}^{3} + 0{,}6X_{к}^{5} + 0{,}143X_{к}^{7} - X_{н} - X_{н}^{3} - 0{,}6X_{н}^{5} - 0{,}143X_{н}^{7}\right) + \right.$$

$$+ 6X_{к}\operatorname{arctg}X_{н}\left(X_{н} + X_{н}^{3} + 0{,}6X_{н}^{5} + 0{,}143X_{н}^{7}\right) - X_{к}^{3}\left(3{,}4 + 3{,}34X_{к}^{2} + 0{,}86X_{к}^{4}\right) +$$

$$+ X_{к}X_{н}^{2}\left(3{,}4 + 3{,}34X_{н}^{2} + 0{,}86X_{н}^{4}\right) - 6X_{к}\operatorname{arctg}X_{к}\left(X_{н} + X_{н}^{3} + 0{,}6X_{н}^{5} + 0{,}143X_{н}^{7}\right) +$$

$$\left. + 1{,}4X_{к}\ln\left(1+X_{к}^{2}\right) - 1{,}4X_{н}\ln\left(1+X_{н}^{2}\right)\right] dX_{к} \,, \qquad (3.11)$$

где $Q^* = \dfrac{4Q}{Uh_0\sqrt{2R_в h_0}}$; Q – расход полимера вдоль оси Z валка вальцов.

Таким образом, расчет величины суммарной деформации сдвига при непрерывном режиме процесса вальцевания термопластов может быть реализован следующим образом.

1. В начале программы задаются исходные данные (производительность процесса, диаметр, длина и частота вращения валков вальцов, величина межвалкового зазора и фрикция, индекс течения и плотность перерабатываемого материала).

2. Рассчитывается значение $X_{кн}$ (безразмерная координата выхода в зоне загрузки) – оптимальная величина загрузки материала на валки вальцов, при которой величина удельной мощности P, характеризующая интенсивность механического воздействия обрабатываемого материала при многократном пропускании его через область деформации, является максимальной.

Удельная мощность q_N рассчитывается по формулам [66, 67]:

$$\mathrm{P} = \frac{N_н}{V} = \mu_1 \left(\frac{U}{h_0}\right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n F_0\left(X_к,\, n,\, \frac{R_в}{h_0}\right) \qquad (3.12)$$

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^3; μ – вязкость материала, Па·с; U_1 – окружная скорость вращения, м/с; h_0 – половина величины минимального зазора между валками, м; $R_в$ – радиус валка, м, где

$$F_0\left(X_к, n, \frac{R_в}{h_0}\right) = \frac{\int\limits_{X_{к0}}^{X_{кк}} \int\limits_{X_к}^{X_н} \frac{\left(\pm X^2 \mp X_к^2\right)^n}{\left(1+X^2\right)^{2n}} \Psi\left(X_к\right) dX dX_к}{\int\limits_{X_{к0}}^{X_{кк}} \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{8{,}88}{\sqrt{\dfrac{R_в}{h_0}}} \left(1+X_к^2\right)\left[\dfrac{R_в}{h_0} + \left(1+X_к^2\right)\right] - \\ -\left(1+X_к^2\right)\left(X_к + X_н\right) + X_н + X_к + \\ + \dfrac{1}{3}\left(X_н^3 + X_к^3\right) \end{array} \right\} \Psi\left(X_к\right) dX_к}, \qquad (3.13)$$

где

$$\Psi(X_к)=\frac{6X_к^4+10X_к^2}{\left(1+X_к^2\right)^2}\left(X_к+X_к^3+0{,}6X_к^5+0{,}143X_к^7-X_н-X_н^3-0{,}6X_н^5-\right.$$
$$\left.-0{,}143X_н^7\right)+6X_к\operatorname{arctg}X_н\left(X_н+X_н^3+0{,}6X_н^5+0{,}143X_н^7\right)-6X_к\operatorname{arctg}X_к\times$$
$$\times\left(X_н+X_н^3+0{,}6X_н^5+0{,}143X_н^7\right)-X_к^3\left(3{,}4+3{,}34X_к^2+0{,}86X_к^4\right)+$$
$$+X_кX_н^2\left(3{,}4+3{,}34X_н^2+0{,}86X_н^4\right)+1{,}4X_к\ln\left(1+X_к^2\right)-1{,}4X_н\ln\left(1+X_н^2\right). \quad (3.14)$$

3. Длина валка $L_в$ разбивается на множество элементарных участков *dl* (см. рис. 3.1), на которых осуществляется периодический процесс.

4. Зная производительность процесса, геометрические параметры валкового оборудования и координату в зоне загрузки, определяем координату в зоне выгрузки и срединную координату данного элементарного участка из соотношения (причем координата выхода в зоне выгрузки $X_{нк}$ для *i*-го участка является координатой входа в зоне загрузки $X_{нн}$ для элементарного участка $i + 1$):

$$Q^*Z_т \le Q^*Z_р, \quad (3.15)$$

где

$$Q^*Z_р=\frac{4Q}{Uh_0\sqrt{2R_в h_0}}Z; \quad (3.16)$$

$$Z=\frac{L_в}{\sqrt{2R_в h_0}}. \quad (3.17)$$

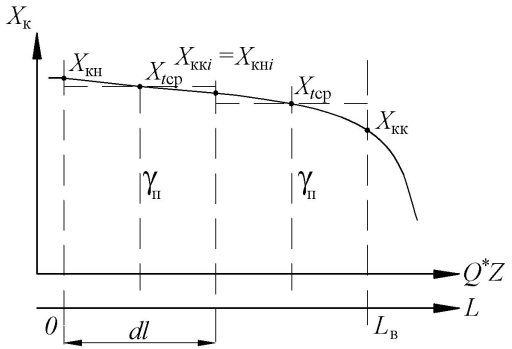


Рис. 3.2. Схема определения величины суммарной деформации сдвига при непрерывном режиме процесса вальцевания термопластов

5. Зная координаты в зоне загрузки и выгрузки для каждого элементарного участка *dl*, можно определить время пребывания $\tau_в$, выразив из уравнения [64]

$$Q = \sqrt{\frac{R_в h_0^3 U (2Rh_0)^{\frac{1}{2}}}{\tau_в}\varphi_1}\ , \qquad (3.18)$$

где

$$\varphi_1 = \int_{X_{к0}}^{X_{кк}} \left\{ \frac{8{,}88}{\sqrt{\frac{R_в}{h_0}}}\left(1 - X_к^2\right)\left[\frac{R_в}{h_0} + \left(1 + X_к^2\right)\right] - \left(1 + X_к^2\right)\left(X_к + X_н\right) + \right.$$

$$\left. + \left[X_н + X_к + \frac{1}{3}\left(X_н^4 + X_к^4\right)\right] \right\} \times \left[\frac{6X_к^4 + 10X_к^2}{\left(1 + X_к^2\right)^2}\left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + \right.\right.$$

$$+ 0{,}143X_к^7 - X_н - X_н^3 - 0{,}6X_н^5 - 0{,}144X_н^7\Big) +$$

$$+ 6X_к \operatorname{arctg} X_н \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) -$$

$$- 6X_к \operatorname{arctg} X_к \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) -$$

$$- X_к^3\left(3{,}4 + 3{,}34X_к^2 + 0{,}86X_к^4\right) + X_к X_н^2\left(3{,}4 + 3{,}34X_н^2 + 0{,}86X_н^4\right) +$$

$$\left. + 1{,}4X_к \ln\left(1 + X_к^2\right) - 1{,}4X_н \ln\left(1 + X_н^2\right) \right] dX. \qquad (3.19)$$

6. Определяется величина суммарной деформации сдвига $\gamma_{пi}$ для каждого элементарного участка *dl*.

7. Определяется среднеинтегральное значение величины суммарной деформации сдвига (3.10).

Таким образом, задаваясь производительностью процесса и зная зависимость распределения материала («запаса») по длине валка, можно определить время пребывания материала на элементарном участке *dl* и, следовательно, величину суммарной удельной деформации сдвига для непрерывного процесса вальцевания [68]. Блок-схема и реализация программы на *Delphi* 5 [69 – 71] представлены в прил. 2.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СУММАРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА В КАНАЛАХ ОТБОРОЧНО-ШНЕКОВОГО УСТРОЙСТВА И ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В процессе переработки срезаемый с поверхности валков вальцов расплав направляется в межвитковое пространство шнекового отборочного устройства. Таким образом, дальнейшая переработка представляет собой процесс экструзии, о качестве которого можно судить также по суммарной величине сдвига $\gamma_ш$ и $\gamma_{фк}$, представляющей собой функцию различных конструктивных параметров шнека, формующих каналов профилирующей формующей головки и технологических параметров процесса экструзии.

Любая частица, движущаяся через нижнюю область в положении a, будет находиться в верхней области в некотором дополнительном положении a^0. Следует отметить, что значение a = 2/3 (см. рис. 3.3) соответствует области раздела между положительным и отрицательным направлением движения жидкости. При этом положение плоскости раздела не зависит от параметров процесса и от геометрических размеров шнека экструдера.

Если скорость движения частицы в любом положении равна v_x, то значения a и a^0 связаны между собой соотношением [59, 72]:

$$\int_0^a v_x da = -\int_{a^0}^1 v_x da \,. \qquad (3.20)$$

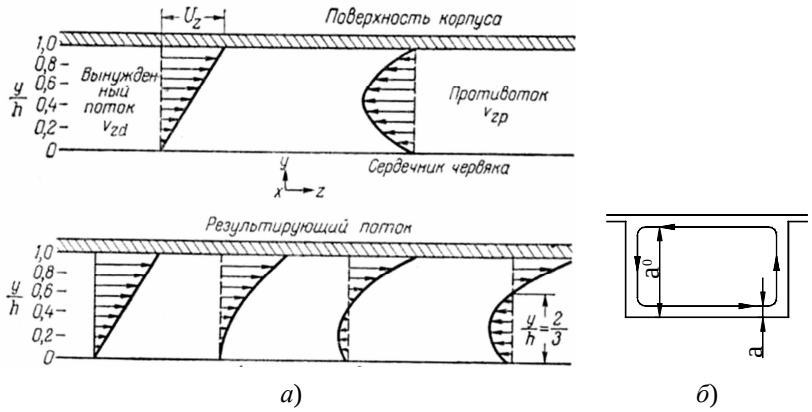


Рис. 3.3. Типичные эпюры скоростей поступательного и циркуляционного течений

После интегрирования получим:

$$\left[a^2 - a^3\right] - \left[(a^0)^2 - (a^0)^3\right] = 0\,; \tag{3.21}$$

$$\left(0 \le a \le \frac{2}{3}\right); \tag{3.22}$$

$$\left(\frac{2}{3} \le a^0 \le 1\right), \tag{3.23}$$

где a – положение координаты в нижней области; a^0 – положение координаты в верхней области.

Выражение общей деформации сдвига γ [59]

$$\gamma_{ш} = \left(\frac{L_{ш}}{h}\right)\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)\left[\frac{2F(a)}{3\cos\alpha} + \frac{G(a,\varphi)}{3\sin\alpha}\right]; \tag{3.24}$$

где $F(a)$, $G(a,\varphi)$ – функции, определяющиеся выражениями:

$$F(a) = \frac{(1-b)\left|1-3a\right| - b\left(1-3a^0\right)}{a(1-a) + b\left(a^0 - a\right)\left(1-a-a^0\right)}\,; \tag{3.25}$$

$$G(a,\varphi) = \frac{(1-b)\left|1-3\varphi+6a\varphi\right| + b\left(1-3\varphi+6a^0\varphi\right)}{a(1-a) + b\left(a^0 - a\right)\left(1-a-a^0\right)}. \tag{3.26}$$

Время нахождения частицы в верхней части канала b определяется выражением

$$b = \frac{1}{1 - \dfrac{a^0\left(2-3a^0\right)}{a(2-3a)}}. \tag{3.27}$$

Коэффициент дросселирования φ, характеризующий отношение прямотока и противотока, может быть описан выражением

$$\varphi = \frac{h^2}{6\mu V_{cz}}\frac{\partial P}{\partial z}, \tag{3.28}$$

где $\dfrac{\partial P}{\partial z}$ – градиент давления в направлении оси Z; $V_{cz} = \pi D_{ш} n_{ш}\cos\alpha$ – компонента вектора скорости стенки цилиндра в направлении оси Z; h – глубина винтового канала шнека, м; μ – вязкость расплава полимера, Па·с; $D_{ш}$ – диаметр шнека, м; $n_{ш}$ – частота вращения шнека, об/мин; α – угол подъема винтовой нарезки шнека.

При этом градиент давления в направлении оси Z может быть найден из выражения [62, 73, 74]:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\Delta p}{L_{ш}} \sin\alpha , \qquad (3.29)$$

где $\Delta p = \frac{Q_{ш}\mu}{K}$ – перепад давления в головке (перепад давления на длине зоны дозирования шнека), Па; $L_{ш}$ – длина нарезной части шнека, м; $Q_{ш}$ – производительность шнекового отборочного устройства, м^3/с; K – коэффициент геометрической формы профилирующей формующей головки, м^3.

Таким образом, подставляя выражение (3.29) в уравнение (3.28), получим для коэффициента дросселирования φ

$$\varphi = \frac{h^2 Q_{ш} \sin\alpha}{6\pi D_{ш} n_{ш} K L_{ш} \cos\alpha} \qquad (3.30)$$

или

$$\varphi = \frac{h^2 Q_{ш}}{6\pi D_{ш} n_{ш} K L_{ш}} \tan\alpha . \qquad (3.31)$$

В конечном итоге, совместное решение уравнений (3.24 – 3.29) позволяет определить величину суммарной деформации сдвига в каналах шнекового отборочного устройства.

Величина суммарной деформации сдвига в формующих каналах фильеры отборочно-шнекового устройства определяется следующим образом [57, 75 – 77]:

$$\gamma_{фк} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_{фi} , \qquad (3.32)$$

где $\gamma_{фi} = \dot{\gamma}_i \tau_{фi}$; $\tau_{фi} = \frac{F_i l_i}{Q_i}$; $\gamma_{фi}$, $\dot{\gamma}_i$, $\tau_{фi}$ – сдвиг, скорость сдвига, время пребывания перерабатываемого материала в i-м канале соответственно; F_i, l_i, Q_i – площадь поперечного сечения, длина и производительность i-го канала соответственно.

Таким образом, решение уравнения (3.1) совместно с (3.8 – 3.10, 3.24, 3.32) позволяет определить величину суммарной деформации сдвига для процесса валково-шнековой утилизации термопластичных полимерных материалов.

При этом определение численного значения величины суммарной деформации сдвига для конкретного термопластичного материала позволяет рассчитывать технологическое оборудование и режимы вторичной переработки термопластичных материалов с заданным качеством.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ

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 экструзии (частота вращения шнека), а также конструктивных параметров используемого оборудования (конструкции шнекового отборочного устройства, геометрических размеров фильеры) на свойства и производительность получаемого вторичного термопластичного материала с целью выбора параметров управления.

Поскольку валково-шнековая утилизация отходов полимерных материалов это технология совмещенных процессов вальцевания и экструзии, были проведены исследования на традиционных валковых и шнековых машинах по оценке влияния технологических параметров процесса и оборудования на свойства получаемого вторичного термопластичного материала.

4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НА ВАЛКОВЫХ МАШИНАХ

4.1.1. Методика проведения эксперимента

Целью экспериментов являлась оценка влияния технологических и конструктивных параметров непрерывного процесса вальцевания и валкового оборудования на физико-механические показатели вторичного термопластичного материала, а также определение величины суммарной деформации сдвига соответствующей наилучшим физико-механическим показателям вторичного материала. Исследования проводились на экспериментальной валковой машине Лб 80/80, конструкция которой описана в разделе 2.2. На данной установке осуществляли изотермический режим непрерывного процесса вальцевания полиэтилена высокого давления марки 15803-020. Переработку проводили при изменении в широком диапазоне частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины фрикции.

Эксперименты проводили следующим образом: включали питание; устанавливали заданный минимальный зазор между валками h_0; устанавливали фрикцию между валками f; разогревали до заданной температуры поверхности валков; устанавливали частоту вращения

переднего валка $n_в$ = 5 об/мин; непрерывно загружали с левой стороны вальцов первичный полиэтилен высокого давления; вальцевали полиэтилен, проверяли точность зазора между валками и измеряли температуру расплава; после выхода на заданный, установившийся режим переработки регистрировали показания амперметра, вес материала за определенный промежуток времени с целью определения производительности; определяли координату входа (точка прилипания расплава к поверхности валков); полученный материал собирали в емкости для последующего определения физико-механических показателей вторичного термопласта (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 $n_в$ = 10 об/мин и проводили действия такие же, как при $n_в$ = 5 об/мин. Такой же порядок действий при $n_в$ = 15 об/мин, $n_в$ = 20 об/мин, $n_в$ = 25 об/мин, $n_в$ = 30 об/мин.

4.1.2. Определение безразмерных координат сечения входа $X_н$

Измерение координаты сечения входа $x_н$ (точка прилипания расплава к поверхности валков) производили следующим образом. После выхода на заданный установившийся режим вальцевания вальцы останавливали и проводили измерение величин *c* и *e*, показанных на рис. 4.1.

Величина координаты сечения входа $x_н$ определяется следующим образом:

$$x_н = R + c - e \qquad (4.1)$$

Величина безразмерной координаты сечения входа $X_н$ определяется по формуле

$$X_н = \frac{x_н}{\sqrt{2R_в h_0}}. \qquad (4.2)$$

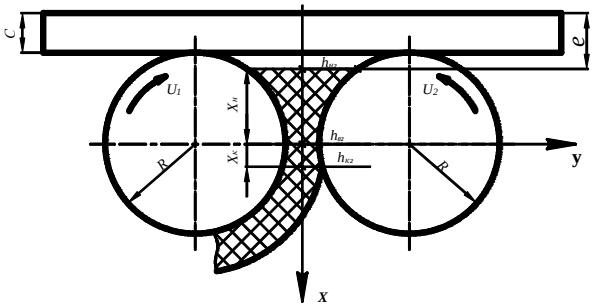


Рис. 4.1. Определение координаты сечения входа $x_н$

4.1.3. Зависимость между безразмерными координатами входа $X_н$ и выхода $X_к$

В работах [59, 78 – 80] показано, что между безразмерными координатами входа $X_н$ и выхода $X_к$ существует только одно функциональное соотношение, зависящее от свойств перерабатываемого материала, которое может быть представлено в следующем виде [60]:

$$\int_{X_н}^{X_к} \frac{\left(X_к^2 - X^2\right)^{1/n} dX}{\left(1+X^2\right)^{1+2/n}} - \int_{X_к}^{-X_к} \frac{\left(X - X_к^2\right)^{1/n} dX}{\left(1+X^2\right)^{1+2/n}} = 0 . \qquad (4.3)$$

Решая это интегральное уравнение численными методами, находим безразмерную координату сечения входа $X_н$, которой соответствует единственное значение безразмерной координаты сечения выхода $X_к$ при каждом значении индекса течения n. На рисунке 4.2 приведена зависимость $X_к$ от $X_н$ при различных значениях индекса течения n.

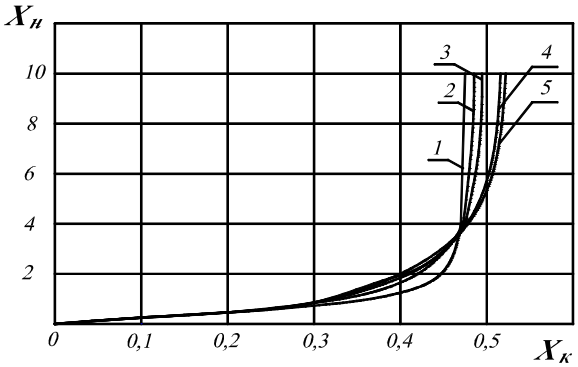


Рис. 4.2. Зависимость безразмерной координаты сечения выхода $X_к$ от безразмерной координаты сечения входа $X_н$ при различных значениях n:
1 – n = 1; 2 – n = 0,5; 3 – n = 0,38; 4 – n = 0,2; 5 – n = 0,125

4.1.4. Определение показателя текучести расплава гранул ПЭВД, полученных при непрерывном процессе вальцевания

Для определения показателя текучести расплава ПЭВД использовали грузовой капиллярный вискозиметр ИИРТ-М, который соответствует ГОСТу 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 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

$$I = 600 \cdot m/t, \qquad (4.4)$$

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

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

Несмотря на то, что ПТР является условной характеристикой текучести расплавов полимеров, эта величина позволяет оценить поведение материала при переработке.

4.1.5. Определение предела текучести, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве вторичного ПЭ, полученного при непрерывном процессе вальцевания

Полученный гранулированный ПЭ закладывался в пресс-форму, которую устанавливали в пресс. Гранулы прессовали при температуре 160 °С при давлении 100 кГс/см^2 в течение 15 мин. Из полученных прессованием пластин вырубались образцы, показанные на рис. 4.3.

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 ЦМГИ-Ц-250. Скорость раздвижения захватов в испытательной машине 28 мм/мин. Перед испытанием замеряли толщину и ширину образцов в их рабочей

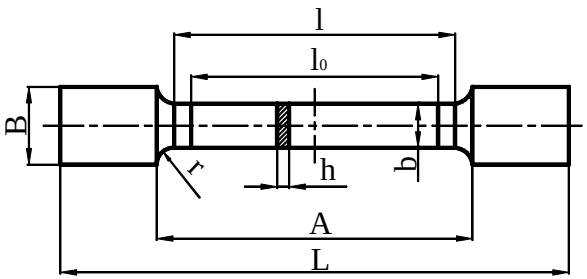


Рис. 4.3. Образец для испытания на растяжение

4.1. 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

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.

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

Предел текучести при растяжении $\sigma_т$, и прочность при разрыве $\sigma_р$ вычисляли по формулам:

$$\sigma_т = P_т / b \cdot h; \quad (4.5)$$

$$\sigma_р = P_р / b \cdot h, \quad (4.6)$$

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

Относительное удлинение при разрыве ε вычисляли по формуле

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \cdot 100, \quad (4.7)$$

где Δl – приращение образца при разрыве, мм.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных (не менее 5 точек) определений для каждого эксперимента.

4.1.6. Исследование свойств вторичного термопластичного материала при переработке на вальцах

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 величинах минимального зазора между валками и фрикции. Исследовали непрерывный процесс переработки на вальцах первичного полиэтилена высокого давления марки 15803-020.

По описанной выше методике проводили эксперименты при величинах минимального зазора между валками h_0 = 1 мм, h_0 = 1,5 мм и h_0 = 2 мм и 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. 4.4 – 4.9.

Анализ графических зависимостей (рис. 4.4 – 4.6) дает возможность сделать вывод, что изменение величины зазора между валками и величины фрикции (рис. 4.7 – 4.9) не оказывают существенного влияния на физико-механические показатели вторичного термопластичного материала. Основным параметром, оказывающим влияние, является частота вращения валков вальцов.

Из графических зависимостей (рис. 4.4 – 4.9) видно, что наилучшие свойства переработанного полиэтилена достигаются при частоте вращения переднего валка $n_в$ = 20 об/мин, величине минимального зазора между валками h_0 = 1,5 мм, величине фрикции f = 1:1,2.

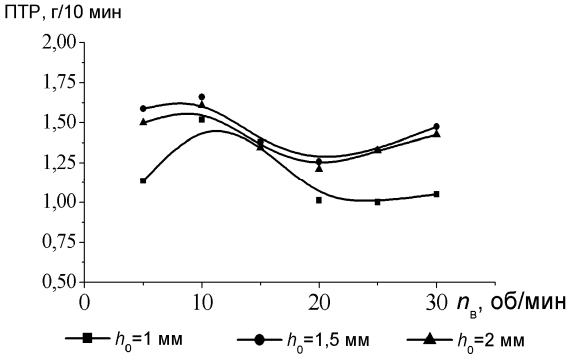


Рис. 4.4. Зависимость показателя текучести расплава полимера *I* от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной величине минимального зазора между валками (величина фрикции f = 1:1,2)

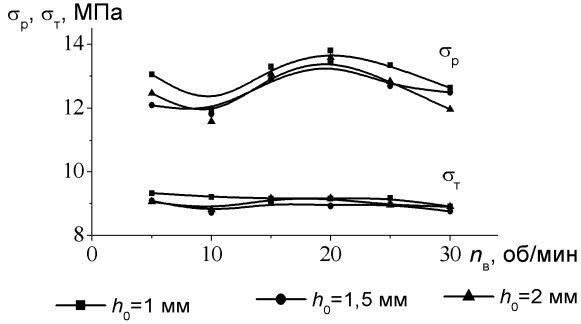


Рис. 4.5. Зависимость предела прочности при разрыве $\sigma_р$ и предела текучести $\sigma_т$ при растяжении от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной величине минимального зазора между валками (величина фрикции f = 1:1,2)

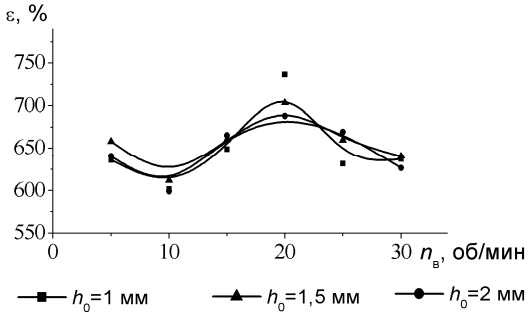


Рис. 4.6. Зависимость относительного удлинения при разрыве ε от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной величине минимального зазора между валками (величина фрикции f = 1:1,2)

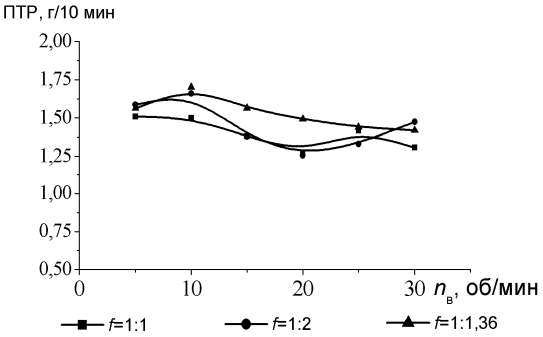


Рис. 4.7. Зависимость показателя текучести расплава полимера *I* от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной величине фрикции (минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм)

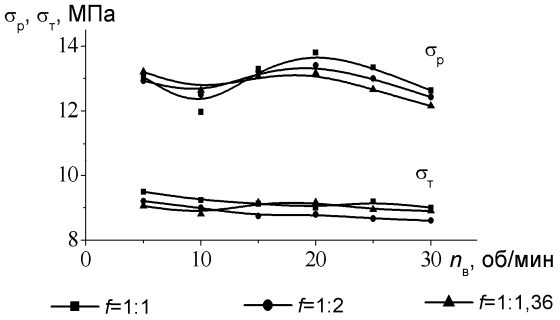


Рис. 4.8. Зависимость предела прочности при разрыве $\sigma_р$ и предела текучести $\sigma_т$ при растяжении от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной величине фрикции (минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм)

После расчета величины суммарной деформации сдвига по формулам (3.8–3.9) (периодический процесс вальцевания) и (3.10) (непрерывный процесс вальцевания), в зависимости от технологических и конструктивных параметров процесса и оборудования, были получены графические зависимости физико-механических свойств вторичного термопластичного материала $\sigma_р$ от величины суммарной деформации сдвига $\gamma_в$, показанные на рис. 4.10.

Анализ графической зависимости (рис. 4.10) позволяет сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели по прочности

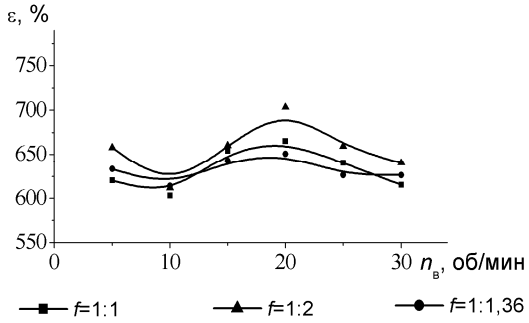


Рис. 4.9. Зависимость относительного удлинения при разрыве ε от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной величине фрикции (минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм)

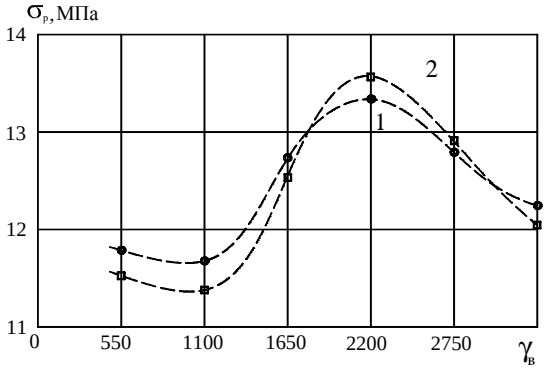


Рис. 4.10 Зависимость прочности при разрыве $\sigma_р$ от величины суммарной деформации сдвига $\gamma_в$ при непрерывном (1) и периодическом (2) режимах работы вальцов

вторичного термопластичного материала как при периодическом, так и при непрерывном режимах вальцевания, наблюдаются при одинаковой величине суммарной деформации сдвига ($\gamma_в$ = 2100…2250).

4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ В ШНЕКОВЫХ МАШИНАХ

Цель экспериментов заключалась в определении величины суммарной деформации сдвига, соответствующей наилучшим физико-механическим показателям вторичного материала. Исследования проводились на шнековых машинах с диаметром червяка 20 и 32 мм.

В процессе исследования первичный полиэтилен высокого давления марки 15803-020 загружался через загрузочную воронку в бункер экструдера. Далее перерабатываемый материал при движении по винтовому каналу шнека нагревался, пластицировался и в виде стренгов продавливался через формующую головку. Полученный таким образом вторичный термопластичный материал подвергался физико-механическим испытаниям, методика проведения которых описана в разд. 4.1.5.

На основании проведенных экспериментальных исследований и с учетом (3.24 – 3.29) были получены графические зависимости прочности при разрыве $\sigma_р$ от величины суммарной деформации сдвига $\gamma_ш$ при переработке на лабораторном экструдере с диаметром червяка 20 мм и экструзионно-выдувном агрегате с диаметром червяка 32 мм, представленные на рис. 4.11.

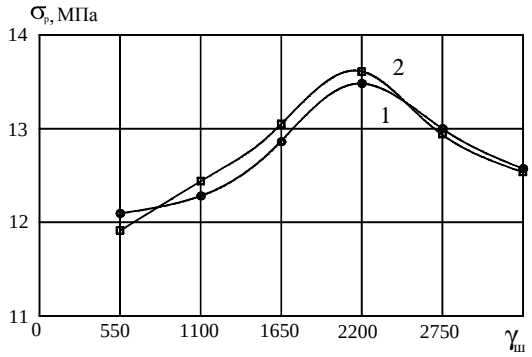


Рис. 4.11. Зависимость прочности при разрыве $\sigma_р$ от величины суммарной деформации сдвига $\gamma_ш$ при переработке на лабораторном экструдере с диаметром червяка 20 мм (1) и экструзионно-выдувном агрегате с диаметром червяка 32 мм (2)

Таким образом, анализ графических зависимостей (рис. 4.10, 4.11) показывает, что наилучшие физико-механические показатели вторичного материала, в частности, прочность при разрыве $\sigma_р$, наблюдаются в области, где величина суммарной деформации сдвига в процессе вальцевания и экструзии $\gamma = 2100…2250$.

Вследствие этого достижение заданного значения величины суммарной деформации сдвига может быть положено в основу инженерной методики расчетов конструктивных параметров и технологических режимов при разработке валково-шнековых агрегатов или шнековых отборочных устройств для вторичной переработки термопластичных материалов с заданным качеством.

4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО В ПРОЦЕССЕ ВАЛКОВО-ШНЕКОВОЙ УТИЛИЗАЦИИ

На основании проведенных выше экспериментальных исследований по изучению свойств вторичного полимерного термопластичного материала на лабораторных вальцах Лб 80/80 и экструдерах с диаметрами шнеков 20 и 32 мм, а также с учетом величины суммарной деформации сдвига, рассчитанной по уравнению (3.1), был реализован технологический процесс утилизации термопластов на разработанном валково-шнековом агрегате (описанный в главе 2), при котором может быть получен вторичный полимерный материал с заданными физико-механическими показателями при заданном значении величины суммарной деформации сдвига $\gamma_{сум}$.

4.3.1. Методика проведения эксперимента

На описанной выше экспериментальной валково-шнековой установке (глава 2) был осуществлен изотермический режим непрерывного процесса переработки полиэтилена высокого давления марки 15803-020. Переработку проводили при изменении в широком диапазоне частоты вращения валков вальцов и шнека шнекового отборочного устройства.

Экспериментальные исследования проводили следующим образом: включали питание ЭУ (см. рис. 2.3); устанавливали заданные минимальный зазор h_0 и фрикцию f между валками; монтировали шнековое отборочное устройство с фильерой заданного диаметра $d_ф$; разогревали до заданной температуры поверхности валков вальцов и цилиндр шнекового отборочного устройства; устанавливали частоту вращения переднего валка $n_в$ = 5 об/мин и частоту вращения шнека шнекового отборочного устройства; непрерывно загружали с правой стороны рабочей поверхности валков вальцов полиэтилен высокого давления; добивались выхода на установившийся стабильный режим гранулирования. После получения необходимого количества вторичного термопластичного материала валковую установку останавливали, и валки очищали от материала. Затем увеличивали частоту вращения шнека шнекового отборочного устройства при неизменном значении частоты вращения переднего валка. Исследование процесса валково-шнековой утилизации термопластов проводили при частотах вращения валков вальцов $n_в$ = 7,5 об/мин, $n_в$ = 10 об/мин, $n_в$ = 12,5 об/мин, $n_в$ = 15 об/мин, $n_в$ = 17,5 об/мин, проводя такие же действия, как при $n_в$ = 5 об/мин.

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

1. Вес полученных гранул за определенный промежуток времени с целью определения производительности установки при заданных значениях минимального зазора h_0, фрикции f между валками, частоты вращения переднего валка и шнека шнекового отборочного устройства.

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

3. Определяли значение безразмерных координат сечения входа в зоне загрузки $X_{нн}$ и в зоне выгрузки $X_{нк}$ материала (см. разд. 4.1.2).

Полученные гранулы в процессе переработки собирались в емкости для последующего проведения экспериментов по определению предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве (методики определения которых рассмотрены выше), молекулярной массы, а также для изучения струк-

турных изменений во вторичном материале методами рентгеноструктурного анализа и инфракрасной спектроскопии.

В результате проведенных экспериментальных исследований на валково-шнековом агрегате по описанной выше методике были получены графические зависимости (рис. 4.12–4.13).

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы: изменение частоты вращения шнека $n_ш$ шнекового отборочного устройства при постоянной частоте вращения вальцов $n_в$ не вносит существенного влияния на величину показателя прочности при разрыве $\sigma_р$ (рис. 4.12) получаемого вторичного термо-

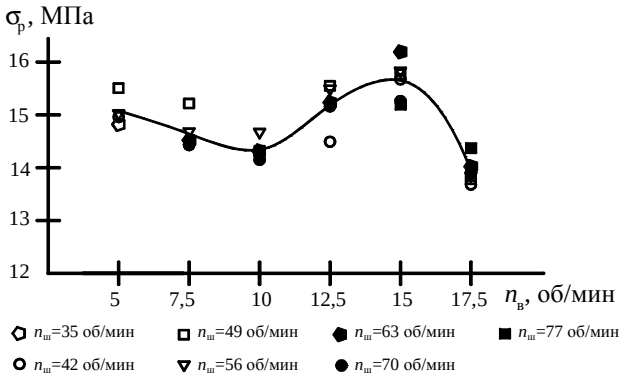


Рис. 4.12. Зависимость прочности при разрыве $\sigma_р$ от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной частоте вращения шнека $n_ш$

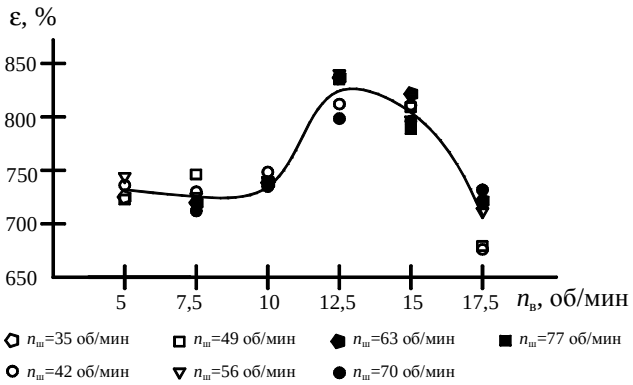


Рис. 4.13. Зависимость относительного остаточного удлинения ε от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной частоте вращения шнека $n_ш$

пластичного материала, что является следствием недостаточной величины сдвиговой деформации, возникающей в межвитковом пространстве шнекового отборочного устройства. Однако наблюдаются изменения прочностных свойств вторичного материала при различной частоте вращения вальцов $n_в$.

Это вызвано тем, что основное сдвиговое воздействие на материал со стороны рабочих органов технологического оборудования в процессе вторичной переработки осуществляется на валковом пластикаторе. При этом сравнительный анализ прочности при разрыве $\sigma_р$ получаемого вторичного термопластичного материала с первичным ПЭВД 15803-020 показал, что в процессе вторичной переработки происходит структурирование.

Однако физико-механические испытания лишь косвенно могут дать представление о происходящих процессах структурирования в исследуемых образцах полученного вторичного термопластичного материала. В связи с этим было принято решение провести исследование молекулярной массы полученного вторичного сырья.

4.3.2. Определение молекулярной массы вторичного материала

Молекулярную массу вторичного материала определяли методом вискозиметрии. Вискозиметрия – наиболее простой и доступный метод определения молекулярных весов (МВ) полимеров почти во всей области значений МВ, представляющих практический интерес [81, 82].

Для определения вязкости раствора полимера измеряют время истечения τ и τ_0 равных объемов раствора и растворителя через капилляр вискозиметра при заданной постоянной температуре. Метод определения молекулярного веса путем измерения вязкости растворов очень удобен благодаря несложности применяемого оборудования [81, 82].

Поэтому широкое распространение получило следующее эмпирическое соотношение:

$$[\eta] = KM^{a}, \qquad (4.9)$$

где [η] –характеристическая вязкость раствора; M – молекулярный вес растворенного полимера; K и a – постоянные, характеризующие систему полимер–растворитель.

Для вычисления молекулярного веса уравнение (4.9) удобно представить в виде

$$\lg M = \frac{1}{a}\lg[\eta] - \frac{\lg K}{a}. \qquad (4.9а)$$

В качестве растворителя был выбран ксилол (K = 0,00135 и a = = 0,63).

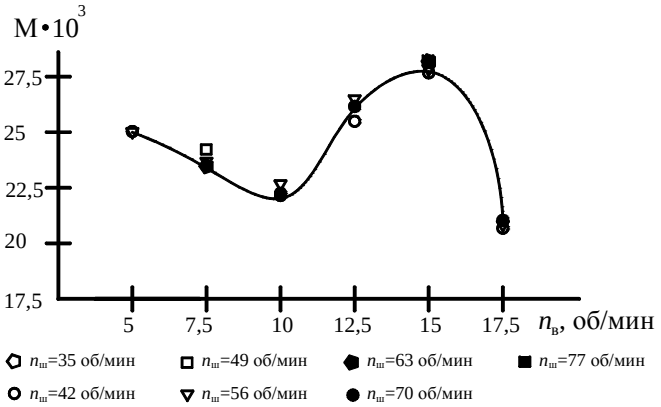


Рис. 4.14. Зависимость молекулярной массы *M* от частоты вращения валков вальцов $n_в$ при различной частоте вращения шнека $n_ш$

Полученные зависимости, представленные на рис. 4.14, практически полностью коррелируются с зависимостью прочности при разрыве $\sigma_р$ (рис. 4.12).

Анализ показывает, что изменение частоты вращения шнека $n_ш$ шнекового отборочного устройства при постоянной частоте вращения вальцов $n_в$ не оказывает существенного влияния на изменение молекулярной массы полученного вторичного термопластичного материала.

Однако наблюдается изменение молекулярной массы вторичного термопластичного материала по сравнению с молекулярной массой первичного полиэтилена высокого давления ПЭВД 15803-020, при различной частоте вращения вальцов $n_в$.

При этом молекулярная масса исследованных образцов, так же как и прочность при разрыве $\sigma_р$ этих образцов, превышает соответствующую величину для исходного материала. Это подтверждает теорию, что в процессе вторичной переработки происходит структурирование, которое приводит к увеличению молекулярной массы (на 13,5…48 %) (рис. 4.14).

4.3.3. Построение графической зависимости физико-механических показателей вторичного термопластичного материала от величины суммарной деформации сдвига процесса валково-шнековой утилизации термопластов

После расчета величины суммарной деформации сдвига для непрерывного режима вальцевания $\gamma_в$ по формулам (3.10) и суммарной деформации сдвига в каналах шнека $\gamma_ш$ (3.24 – 3.29), в зависимости от

технологических и конструктивных параметров процесса и оборудования, а также на основании проведенных экспериментальных исследований, были получены графические зависимости физико-механических свойств $\sigma_р$ вторичного термопластичного материала от величины суммарной деформации сдвига $\gamma_{сум}$, показанные на рис. 4.15.

Анализ рис. 4.15 позволяет сделать вывод, что наилучшие показатели по прочности вторичного термопластичного материала, так же как и для традиционных процессов вальцевания и экструзии, наблюдаются при одинаковой величине суммарной деформации сдвига ($\gamma_{сум}$ = 2100…2250; $\gamma_в$ = 1556…1684; $\gamma_ш$ = 538…592).

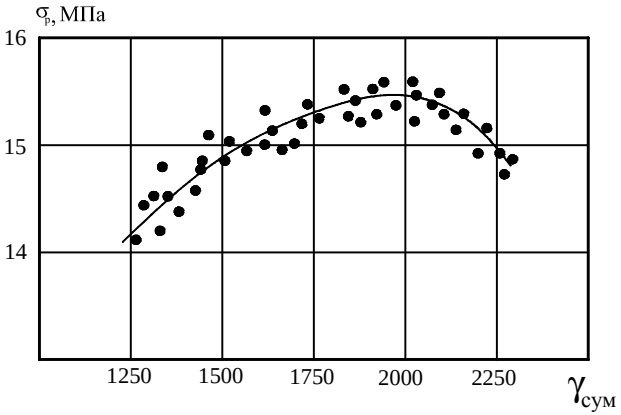


Рис. 4.15. Зависимость прочности при разрыве $\sigma_р$ от величины суммарной деформации сдвига при переработке термопластов на валково-шнековом агрегате

4.4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛУЧЕННОГО ВТОРИЧНОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА

В процессе вторичной переработки на валково-шнековом агрегате термопластичный материал подвергается интенсивной сдвиговой деформации со стороны технологического оборудования, возникающей в межвалковом зазоре валкового пластикатора и межвитковом пространстве шнека шнекового отборочного устройства. В конечном итоге, это может приводить к различным структурным изменениям и отражается на свойствах и характеристиках получаемого вторичного материала (в частности, прочность при разрыве $\sigma_р$ и молекулярная масса). Вместе с тем, при продавливании расплава через формообразующее отверстие профилирующей формующей головки возможно ориентирование вторичного материала, что может внести погрешность при проведении физико-механических исследований.

4.4.1. Исследование степени ориентации и кристалличности методом рентгеноструктурного анализа

Рентгеноструктурный анализ (РСА) – это метод исследования строения тел, использующий явление дифракции рентгеновских лучей. Данный метод позволяет проводить исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного на анализируемом объекте рентгеновского излучения и получать информацию о конформации макромолекул, их взаимном расположении, оценивать фазовый состав системы, проводить анализ текстур, определять коэффициенты упаковки, величины плотности и т.д. Дифракционная картина зависит от длины волны используемых рентгеновских лучей и строения объекта. Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны ~1Å, т.е. порядка размеров атома [83, 84].

Методами рентгеноструктурного анализа изучают металлы, сплавы, минералы, неорганические и органические соединения, полимеры, аморфные материалы, жидкости и газы, молекулы белков, нуклеиновых кислот и т.д.

В ходе рентгеноструктурного анализа исследуемый образец помещают на пути рентгеновских лучей и регистрируют дифракционную картину, возникающую в результате взаимодействия лучей с веществом. На следующем этапе исследования анализируют дифракционную картину и расчетным путем устанавливают взаимное расположение частиц в пространстве, вызвавшее появление данной картины.

Рентгеноструктурные исследования образцов проводили в режиме на прохождение в разных диапазонах углов дифракции (CuK_{α}-излучение), монохроматизированного Ni-фильтром, с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-3.0 (рис. 4.16). Дифрактометр ДРОН-3 – многоцелевой рентгеновский дифрактометр с системой управления и регистрации на базе IBM PC [83, 84].

В дифрактометрических исследованиях применялась рентгенооптическая схема фокусировки первичного пучка по Иоганну, что обеспечивало исследование как изотропных образцов, так и анизотропных.

Режим работы рентгеновских трубок определялся типом трубки и находился в пределах 30 mA при 30 kV, что соответствует 60 % от максимально возможной мощности для увеличения срока ее службы.

Для устранения вертикальной расходимости применяли щель Соллера с расходимостью $1{,}5^{o}$. В ряде случаев использовали модернизированную коллимацию, позволяющую освободить дифракционный спектр от «паразитного» излучения, особенно в малоугловой области.

Рис. 4.1. Дифрактометр ДРОН-3

Исследования, проводившиеся методом рентгеноструктурного анализа (РСА) и специальной методики расчета некристаллических фазовых компонент (МРНФК) образцов полиэтилена высокого давления ПЭВД 15803-020, подвергавшегося вторичной переработке на валково-шнековом агрегате, показали, что РСА-параметры аморфной фазы полученного вторичного термопластичного материала и степень кристалличности K = 52…54 %, существенно не изменяются (рис. 4.17).

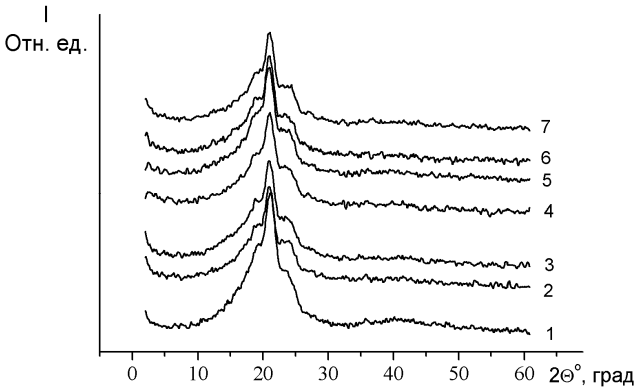


Рис. 4.17. Дифрактограммы исследуемых полимеров, снятых при комнатной температуре:

1 – исходный ПЭВД; *2* – $n_в$ = 5 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; *3* – $n_в$ = 7,5 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; 4 – $n_в$ = 10 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; 5 – $n_в$ = 12,5 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; 6 – $n_в$ = 15 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; 7 – $n_в$ = 17,5 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин

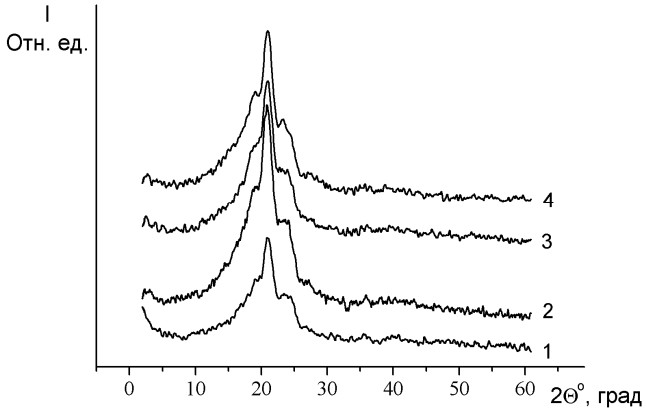


Рис. 4.18. Дифрактограммы образцов:
1, 2 – после валково-шнекового агрегата; *3, 4* – после прессования

Изменения в кристаллической фазе вторичного термопластичного материала отражаются в несущественном сужении кристаллической решетки на Δd = 0,001 нм, при этом полуширина кристаллических рефлексов практически не изменяется, что говорит о том, что размеры кристаллитов и параметры кристаллической составляющей полимера остаются практически неизменными.

Помимо этого были проведены исследования влияния вносимого со стороны прессового оборудования при подготовке образцов для физико-механических испытаний. Для этого проводилась проверка анизотропии при съемке в экваториальном и меридианальном направлениях. Полученные дифрактограммы (рис. 4.18) сравнивались с помощью специализированного программного обеспечения. Проверка образцов на анизотропию показала, что структура образца в экваториальном и меридианальном направлениях не имеет существенных различий.

4.4.2. Изучение структурных изменений методом ИК-спектроскопии

Колебательная спектроскопия, безусловно, самый распространенный физический метод исследования химического строения и структурных особенностей полимерных объектов. В настоящее время главным объектом спектральных исследований стали тонкие детали и особенности химического и физического строения макромолекул при практически постоянном химическом составе цепей [85, 86].

Установление особенностей строения цепей в кристаллической и аморфной фазах полимера, характера и количества химических дефек-

тов с «ошибочными» присоединениями мономерных звеньев к растущему активному центру в реакции образования макромолекулы, обнаружение разветвлений и многое другое – одна из сторон деятельности спектральных лабораторий. Другая, еще более сложная задача – изучение полимерных материалов, таких как полимерные смеси, армированные и дисперсно-упрочненные композиты различных видов, блок-сополимеры с разделяющимися фазами, наполненные полимеры и т.п.

Объектом серьезного внимания при изучении таких систем становятся изменения структуры полимера (или полимерной матрицы) в материале под действием внешних факторов – механического нагружения, электрических, магнитных и высокоэнергетических полей, химически агрессивных сред и др. Для решения таких задач классические и хорошо разработанные приемы спектрально-химического анализа существенно недостаточны.

При этом инфракрасные спектры полимеров характеризуются рядом особенностей, не позволяющих непосредственно использовать знакомые многим теоретические представления и экспериментальные приемы инфракрасной спектроскопии низкомолекулярных соединений.

Для анализа возможных структурных и конформационных изменений были исследованы инфракрасные спектры поглощения исходного полиэтилена высокого давления ПЭВД 15803-020 и вторичного термопластичного материала, полученного при вторичной переработке на валково-шнековом агрегате.

ИК-спектры регистрировали на двухлучевом спектрофотометре Перкин–Эльмер-599 (рис. 4.19) в широкой области длин волн от 400 до 4000 $см^{-1}$. Образцы готовились в виде пленок, полученных из раствора и нанесенных на стекло из бромистого калия. Запись и обработка спектров проводилась на ПК с использованием программы ORIGIN.

Копии ИК-спектров представлены на рис. 4.20 – 4.23.

Рис. 4.2. Двухлучевой спектрофотометр Перкин–Эльмер-599

При сравнительном рассмотрении следует отметить внешнюю схожесть спектров всех образцов, которые имеют характерные, согласно правилам отбора и фактор-групповому анализу, – шесть активных в ИК-спектрах нормальных колебаний для полиэтиленовой цепи из групп $[–CH_2–CH_2–]_n$.

Именно такое количество интенсивных полос поглощения наблюдается в спектрах образцов с максимумами 2920 $см^{-1}$, 2850 $см^{-1}$ (рис. 4.20), которые без сомнения принадлежат валентным; 1471 $см^{-1}$, 1460 $см^{-1}$– деформационным (рис. 4.21) и 727 $см^{-1}$, 717 $см^{-1}$ – маятниковым колебаниям CH_2–групп (рис. 4.22).

Однако при детальном рассмотрении спектров обнаруживаются некоторые различия, более четко проявляющиеся в области деформационных колебаний CH_2-групп. Отметим лишь наличие слабого диффузного поглощения в низкочастотной области от полосы 1460 $см^{-1}$ и до 1250 $см^{-1}$ (рис. 4.21).

Авторы [85, 86] связывают это с изменением длины цепи, что естественно изменяет изомерию цепи и, как следствие, приводит в активации низкоэнергетических колебательных переходов.

Структурную упорядоченность ПЭ можно проследить по полосам поглощения маятниковых колебаний CH_2–групп – 727 $см^{-1}$ и 717 $см^{-1}$ (рис. 4.22), расщепление которых обусловлено взаимодействием между соседними цепями в кристаллической области полиэтилена.

Из рисунка 4.23 видно, что после переработки на валково-шнековом агрегате в полученном вторичном термопластичном материале никаких систематических сдвигов полос поглощения 727 $см^{-1}$ и 717 $см^{-1}$ практически не наблюдается, а величина $\Delta\upsilon$ = 10 $см^{-1}$ остается постоянной.

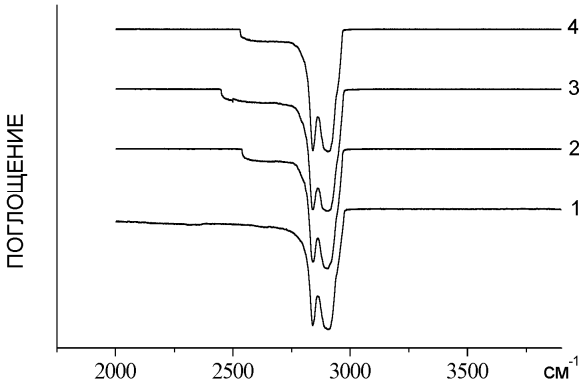


Рис. 4.20. ИК-спектры поглощения исследуемых полимеров:
1 – исходный ПЭВД; *2* – $n_в$ = 5 об/мин, $n_ш$ = 28 об/мин;
3 – $n_в$ = 15 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; *4* – $n_в$ = 17,5 об/мин, $n_ш$ = 84 об/мин

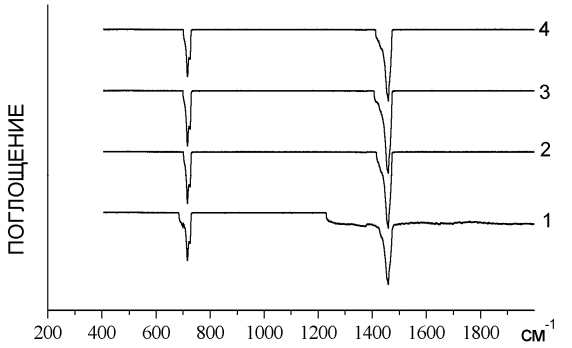


Рис. 4.21. ИК-спектры поглощения исследуемых высокомолекулярных соединений:
1 – исходный ПЭВД; *2* – $n_в$ = 5 об/мин, $n_ш$ = 28 об/мин;
3 – $n_в$ = 15 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; *4* – $n_в$ = 17,5 об/мин, $n_ш$ = 84 об/мин

Таким образом, полученные результаты с помощью метода ИК-спектроскопии хорошо согласуются с данными РСА.

Между тем, особое внимание привлекает полоса поглощения с максимумом 1380 $см^{-1}$ (рис. 4.22), интенсивность которой меняется по отношению к исходному образцу. Эта полоса отвечает за деформационные колебания метильных $–CH_3–$ групп.

Качественные расчеты относительных величин поглощения при 1380$см^{-1}$, выбрав полосу 1467 $см^{-1}$ за внутренний стандарт, указывают, что в исследуемых образцах концентрация метильных $–CH_3–$ групп имеет изменения по сравнению с исходным полиэтиленом высокого давления марки ПЭВД 15803-020. Так как ПЭ содержит метильные

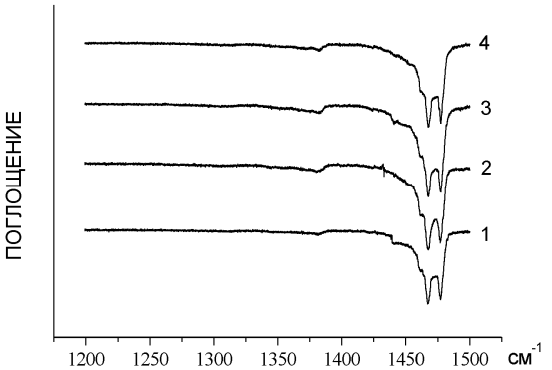


Рис. 4.22. ИК-спектрограммы исследуемых образцов:
1 – исходный ПЭВД; *2* – $n_в$ = 5 об/мин, $n_ш$ = 28 об/мин;
3 – $n_в$ = 15 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; *4* – $n_в$ = 17,5 об/мин, $n_ш$ = 84 об/мин

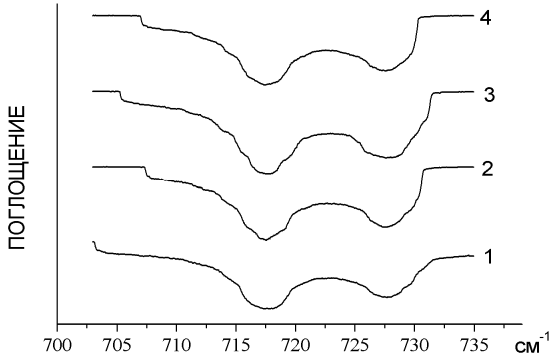


Рис. 4.23. ИК-спектры поглощения различных образцов ПЭ:
1 – исходный ПЭВД; *2* – $n_в$ = 5 об/мин, $n_ш$ = 28 об/мин; ,
3 – $n_в$ = 15 об/мин, $n_ш$ = 56 об/мин; *4* – $n_в$ = 17,5 об/мин, $n_ш$ = 84 об/мин

группы, то они находятся не только на концах макромолекул, но и на концах ее боковых ответвлений. Поэтому количество метильных групп в полимере принято за меру его разветвленности. Таким образом, проведенные дополнительные исследования методом ИК-спектроскопии подтвердили предположение, что повышение прочности при разрыве $\sigma_р$ (см. рис. 4.12) и, как следствие, некоторое увеличение молекулярной массы (см. рис. 4.14), связано со структурированием вторичного термопластичного материала в процессе вторичной переработки на разработанном валково-шнековом агрегате.

4.5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ, УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БОКОВОГО ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА И ВАЛКОВО-ШНЕКОВОГО АГРЕГАТА

Проведенные экспериментальные исследования утилизации термопластов позволили получить сравнительную оценку производительности, удельной мощности, затрачиваемой на 1 кг получаемой продукции, и свойств вторичного термопластичного материала при использовании бокового отборочно-гранулирующего устройства [64] и валково-шнекового агрегата (рис. 4.24 – 4.26).

Анализ зависимостей позволяет сделать следующий вывод: использование валково-шнекового агрегата при утилизации отходов термопластичных материалов позволяет значительно повысить производительность процесса (в 2,23 раза) и снизить, вместе с тем, величину удельной мощности, затрачиваемой на 1 кг получаемой продукции (в 2 раза).

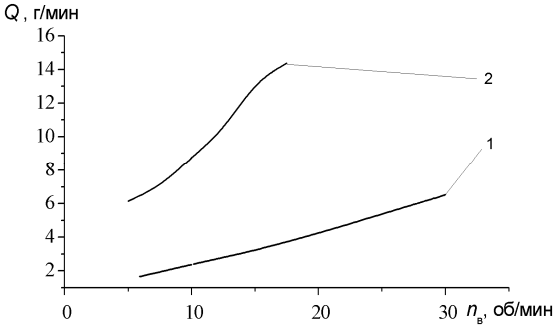


Рис. 4.24. Зависимость производительности *Q* от частоты вращения валков вальцов $n_в$:

1 – боковое отборочно-гранулирующее устройство;

2 – валково-шнековый агрегат

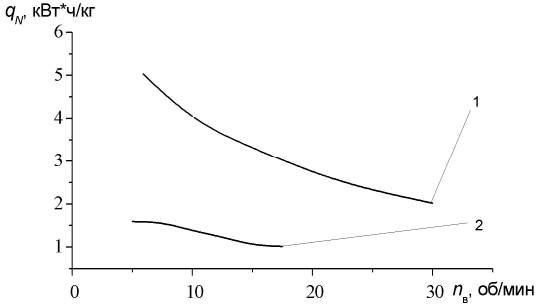


Рис. 4.25. Зависимость удельной мощности q_N затрачиваемой на 1 кг продукции от частоты вращения валков вальцов $n_в$:

1 – боковое отборочно-гранулирующее устройство;

2 – валково-шнековый агрегат

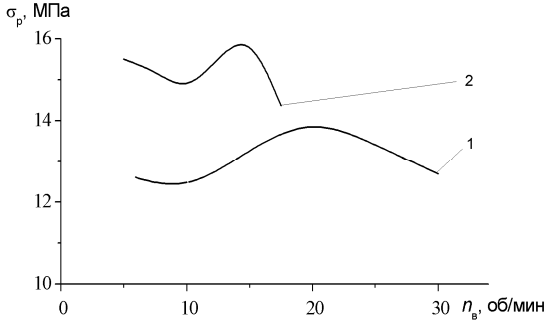


Рис. 4.26. Зависимость прочности при разрыве $\sigma_р$ от частоты вращения валков вальцов $n_в$:

1 – боковое отборочно-гранулирующее устройство;

2 – валково-шнековый агрегат

5. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ

В качестве исходных параметров, необходимых для расчета, принимаются:

1) производительность установки – Q, кг/ч;

2) температура переработки – T, К;

3) тип перерабатываемого материала.

При расчете основных параметров непрерывного процесса утилизации на валково-шнековом агрегате решаются два типа задач:

1) проектирование валково-шнекового агрегата – при заданной производительности процесса Q необходимо определить основные геометрические размеры валково-шнекового агрегата (диаметр и длину валков вальцов; диаметр и длину шнека, шаг, глубину винтовой нарезки и ширину гребня шнека шнекового отборочного устройства);

2) оснащение вальцов разработанным шнековым отборочным устройством – при заданных геометрических размерах валков вальцов необходимо определить производительность процесса Q и основные геометрические размеры шнекового отборочного устройства (диаметр и длину шнека).

До проведения расчета необходимо определить реологические константы перерабатываемого материала при температуре переработки; величину суммарной деформации сдвига, соответствующую заданным физико-механическим показателям вторичного сырья, для перерабатываемого материала на описанном выше лабораторном стенде.

5.1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВОГО АГРЕГАТА

Поскольку валково-шнековая утилизация отходов полимерных материалов это технология совмещенных процессов вальцевания и экструзии, расчет основных параметров процесса и оборудования целесообразно вести раздельно как для валковых, так и для шнековых машин.

Расчет ведем в следующей последовательности:

1) определяем объем единовременной загрузки материала на вальцы q_1 по формуле [64, 67]

$$q_1 = \frac{Q_n \tau_в}{60\rho\alpha}, \qquad (5.1)$$

где Q_n – заданная производительность, кг/ч; ρ – плотность смеси, кг/м^3; $\tau_в$ – время вальцевания, мин; α = (0,8…0,9) – коэффициент использования машинного времени.

Из практики конструирования валков валковых машин известно, что $L \approx (1{,}8\ldots3{,}2)D$; принимаем $L \sim 3D$. Таким образом, с учетом соотношения $q_1 = (0{,}0065\ldots0{,}0085)DL$, дм ^{3} определяем длину L и диаметр D валка, дм. Полученные значения L и D уточняем по ГОСТ 14333–73;

2) для выбранного типоразмера валкового оборудования задаемся интервалом изменений величины минимального межвалкового зазора h_0, фрикции f и частоты вращения переднего валка $n_в$;

3) находим оптимальную высоту «запаса» (оптимального объема) материала на валках $X_{нн}$ по методике, изложенной в разд. 3.1.2.

Для определения оптимального объема материала на валках необходимо знать, при какой величине безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{нн}$ величина удельной мощности P, характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал, будет максимальной. Удельная мощность P рассчитывается по формулам:

$$P = \frac{N_n}{V} = \mu\left(\frac{U_1}{h_0}\right)^{n+1}\left(\frac{2n+1}{n}\right)^n F_0\left(X_к,\, n,\, \frac{R_в}{h_0}\right), \qquad (5.2)$$

где N_n – технологическая мощность, расходуемая на деформацию обрабатываемого материала в зазоре валков вальцев, работающих по непрерывному режиму, кВт; V – величина объема материала, находящегося на валках вальцев, м^3; μ – вязкость материала, Па·с; U_1 – частота вращения переднего валка, об/мин; h_0 – половина величины минимального зазора между валками, м; $R_в$ – радиус валка, м.

$$F_0\left(X_к, n, \frac{R}{h_0}\right) = \frac{\int\limits_{X_{к0}}^{X_{кк}}\int\limits_{X_к}^{X_н}\frac{\left(\pm X^2 \mp X_к^2\right)^n}{\left(1+X^2\right)^{2n}}\Psi\left(X_к\right)dXdX_к}{\int\limits_{X_{к0}}^{X_{кк}}\left\{\begin{array}{l}\dfrac{8{,}88}{\sqrt{\dfrac{R}{h_0}}}\left(1+X_к^2\right)\left[\dfrac{R_в}{h_0}+\left(1+X_к^2\right)\right]- \\ -\left(1+X_к^2\right)\left(X_к+X_н\right)+X_н+X_к+ \\ +\dfrac{1}{3}\left(X_н^3+X_к^3\right)\end{array}\right\}\Psi\left(X_к\right)dX_к}, \qquad (5.3)$$

где $\Psi\left(X_к\right) = \dfrac{6X_к^4+10X_к^2}{\left(1+X_к^2\right)^2}\times$

$$\times\left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + 0{,}143X_к^7 - X_н - X_н^3 - 0{,}6X_н^5 - 0{,}143X_н^7\right)+$$

$$+6X_{к}\text{arctg}X_{н}\left(X_{н}+X_{н}^{3}+0{,}6X_{н}^{5}+0{,}143X_{н}^{7}\right)-$$
$$-6X_{к}\text{arctg}X_{к}\left(X_{н}+X_{н}^{3}+0{,}6X_{н}^{5}+0{,}143X_{н}^{7}\right)-$$
$$-X_{к}^{3}\left(3{,}4+3{,}34X_{к}^{2}+0{,}86X_{к}^{4}\right)+X_{к}X_{н}^{2}\left(3{,}4+3{,}34X_{н}^{2}+0{,}86X_{н}^{4}\right)+$$
$$+1{,}4X_{к}\ln\left(1+X_{к}^{2}\right)-1{,}4X_{н}\ln\left(1+X_{н}^{2}\right). \quad (5.4)$$

В результате решения уравнений (5.3), (5.4) была получена графическая зависимость безразмерного комплекса $F_0\left(X_{к},\, n,\, \frac{R_{в}}{h_0}\right)$ от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{нн}$ (для трех различных значений $R_в/h_0$), показанные на рис. 5.1.

Анализ рисунка 5.1 показывает наличие максимума в области $X_{нн}$ = 32585. Следовательно, существует такой оптимальный объем материала на валках, при котором работа, затрачиваемая на его деформацию, будет максимальной. Поэтому ведение непрерывного процесса вальцевания термопластов с таким объемом загрузки будет наиболее рационально с точки зрения интенсивности механического воздействия на обрабатываемый материал;

4) определяем величину суммарной деформации сдвига для непрерывного вальцевания $\gamma_в$ по формулам (3.8 – 3.10).

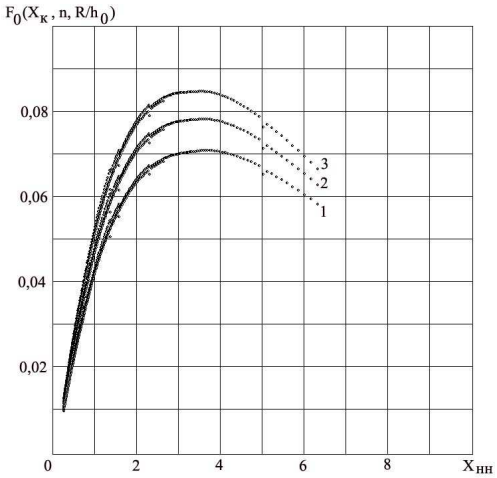


Рис. 5.1. Зависимость безразмерного комплекса $F_0\left(X_{к}, n, \frac{R_{в}}{h_0}\right)$ от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{нн}$ для трех различных значений $R_в/h_0$ при n = 0,2:
1 – $R_в/h_0$ = 40; *2* – $R_в/h_0$ = 32; *3* – $R_в/h_0$ = 26,67

Поскольку шнек шнекового отборочного устройства представляет собой зону дозирования экструзионной машины для переработки термопластов, в связи с этим расчет основных параметров шнекового отборочного устройства ведется как для зон дозирования;

5) определяем диаметр шнека шнекового отборочного устройства и его геометрию (см. раздел 2.3) в зависимости от производительности вальцов и свойств перерабатываемого материала;

6) определяем величину суммарной деформации сдвига в каналах шнека $\gamma_{ш}$ и профилирующей формующей головке $\gamma_{фк}$ по формулам (3.24 – 3.29, 3.32);

7) определяем величину суммарной деформации сдвига для валково-шнекового процесса утилизации $\gamma_{сум}$ по формуле (3.1). Если полученное значение величины суммарной деформации сдвига $\gamma_{сум}$ отличается от суммарной величины сдвига, обеспечивающей заданные физико-механические показатели перерабатываемого материала, то расчет продолжается путем корректировки одного из следующих параметров: межвалковый зазор – $2h_0$; частота вращения переднего валка – $n_в$; величина фрикции – f; шаг нарезки – t; глубина нарезки – h; ширина гребня – e; частота вращения шнека – $n_ш$.

Корректировку проводим с целью изменения величины суммарной деформации сдвига для непрерывного процесса валково-шнековой переработки $\gamma_{сум}$, приближаясь к заданным физико-механическим показателям для конкретного вальцуемого полимера;

8) находим силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания (распорное усилие F_n и технологическую мощность N_n, а также мощность привода вальцов $N_д$) по методике, изложенной в [66, 67].

Величина распорного усилия F_n определяется по формуле

$$F_n = \frac{\mu U_1 R_в^{\,2} h_0^2 (1+f)\left(\frac{U}{h_0}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n}{2Q} f_1(X_к, n), \qquad (5.5)$$

где

$$f_1(X_к, n) = \int_{X_{к0}}^{0}\int_{X_к}^{X_н}\int_{X_к}^{X} \frac{\left(\pm X^2 \pm X_к^2\right)^n}{\left(1+X^2\right)^{2n+1}} \times \left[\frac{6X_к^4 + 10X_к^2}{\left(1+X_к^2\right)^2}\left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + \right.\right.$$
$$+ 0{,}143X_к^7 - X_н + X_н^3 - 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\Big) + 6X_к \operatorname{arctg} X_н \left(X_н + X_н^3 + \right.$$
$$+ 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\Big) - X_к^3\left(3{,}4 + 3{,}34X_к^2 + 0{,}86X_к^4\right) + X_к X_н^2\left(3{,}4 + 3{,}34X_н^2 + \right.$$
$$\left.\left. + 0{,}86X_н^4\right) + 1{,}4X_к \ln\left(1+X_к^2\right) - 1{,}4X_н \ln\left(1+X_н^2\right)\right] dX dX dX_к. \qquad (5.6)$$

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

$$N_n = \frac{\mu U_1^{\,2} R_в h_0^2 \sqrt{2Rh_0}\left(\frac{U_1}{h_0}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \left(\frac{f+1}{2}\right)}{Q} f_2(X_к, n), \qquad (5.7)$$

где

$$f_2(X_к, n) = \int_{X_{к0}}^{0} \int_{X_к}^{X_н} \frac{\left(\pm X^2 \mp X_к^2\right)}{\left(1+X^2\right)^{2n}} \left[\frac{6X_к^4 + 10X_к^2}{\left(1+X_к^2\right)^2} \times \right.$$
$$\times \left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + 0{,}143X_к^7 - X_н - X_н^3 - 0{,}6X_н^5 - 0{,}143X_н^7\right) +$$
$$+ 6X_к \operatorname{arctg} X_н \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) -$$
$$- 6X_к \operatorname{arctg} X_к \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) - \qquad (5.8)$$
$$- X_к^3 \left(3{,}4 + 3{,}34X_к^2 + 0{,}86X_к^4\right) + X_к X_н^2 \left(3{,}4 + 3{,}34X_н^2 + 0{,}86X_н^4\right) +$$
$$\left. + 1{,}4X_к \ln\left(1+X_к^2\right) - 1{,}4X_н \ln\left(1+X_н^2\right) \right] dX dX_к .$$

Мощность электродвигателя привода вальцов $N_д$ определяется по формуле

$$N_д = \frac{N_n}{\eta_{пр}}, \text{ кВт}, \qquad (5.9)$$

где $\eta_{пр}$ – КПД привода машины;

9) находим энергетические параметры процесса экструзии (технологическая мощность N_n) и проводим прочностной расчет основных деталей и узлов шнекового отборочного устройства по общепринятой методике [53, 63, 93 – 98];

10) проводим прочностной расчет основных деталей и узлов машины (станины [87], валков [88], механизма регулировки зазора и др.) по общепринятой методике [57, 89 – 92];

11) проводим тепловой расчет процесса экструзии с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов [53, 63, 93 – 98];.

12) проводим тепловой расчет процесса непрерывного вальцевания с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов [78, 89, 90].

Составляем техническую характеристику спроектированного валково-шнекового агрегата.

Алгоритм методики инженерного расчета параметров процесса и оборудования при проектировании валково-шнекового агрегата приведен в прил. 5.

5.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОСНАЩЕНИИ ВАЛЬЦОВ ШНЕКОВЫМ ОТБОРОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

1) Определяем производительность вальцов при непрерывном режиме работы по методике, изложенной в [64].

Значение величины безразмерного комплекса Q^*Z определяется из выражения [64, 65]

$$Q^*Z = \frac{2Qz}{U_1 h_0^2 R_в}. \tag{5.10}$$

В то же время производительность вальцов непрерывного действия можно выразить как отношение объема материала на валках V к продолжительности вальцевания $\tau_в$. Тогда значение комплекса Q^*Z определится как [64, 65]

$$Q^*Z = \frac{2VL_в}{U_1 h_0^2 R_в \tau_в}. \tag{5.11}$$

Величина объема материала на валках определяется по уравнению [64, 65]

$$V = \frac{R_в h_0^3 U_1 \sqrt{2R_в h_0}}{Q} \varphi_1\left(X_к \frac{R_в}{h_0}\right), \tag{5.12}$$

где

$$\varphi_1 = \int_{X_{к0}}^{X_{кк}} \left\{ \frac{8{,}88}{\sqrt{\frac{R_в}{h_0}}} \left(1 - X_к^2\right)\left[\frac{R_в}{h_0} + \left(1 + X_к^2\right)\right] - \left(1 + X_к^2\right)\left(X_к + X_н\right) + \right.$$

$$\left. + \left[X_н + X_к + \frac{1}{3}\left(X_н^4 + X_к^4\right)\right]\right\} \times \left[\frac{6X_к^4 + 10X_к^2}{\left(1 + X_к^2\right)^2}\left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + \right.\right.$$

$$+ 0{,}143X_к^7 - X_н - X_н^3 - 0{,}6X_н^5 - 0{,}144X_н^7\big) +$$

$$+ 6X_к \operatorname{arctg} X_н \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) - \tag{5.13}$$

$$\left. - 6X_к \operatorname{arctg} X_к \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) - \right.$$

$$- X_к^3\left(3{,}4 + 3{,}34X_к^2 + 0{,}86X_к^4\right) + X_к X_н^2\left(3{,}4 + 3{,}34X_н^2 + 0{,}86X_н^4\right) +$$

$$+ 1{,}4X_к \ln\left(1 + X_к^2\right) - 1{,}4X_н \ln\left(1 + X_н^2\right)\Bigg] dX.$$

Совместное решение (5.1) и (5.2) позволяет определить производительность вальцов при непрерывном режиме их работы по формуле [64, 65]

$$Q = \sqrt{\frac{R_в h_0^3 U_1 (2R_в h_0)^{\frac{1}{2}}}{\tau_в} \varphi_1}\ . \qquad (5.14)$$

Вследствие некоторой сложности вычисления функции φ_1 расчет производительности представляет определенные трудности. Как показано в работе [65], величину объема материала на валках вальцов, работающих по непрерывному режиму, можно вычислить по уравнению

$$V = 2h_0\sqrt{2R_в h_0}\, L_в \times$$

$$\times\left\{\frac{8{,}88}{\sqrt{\frac{R_в}{h_0}}}\left(1 + X_к^2\right) - \left(1 + X_к^2\right)\left(X_к + X_н\right) + \left[X_н + X_к + \frac{1}{3}\left(X_н^3 + X_к^3\right)\right]\right\}, \qquad (5.15)$$

где $L_в$ – длина валка, м.

Тогда производительность вальцов непрерывного действия может быть определена из выражения [65, 66]:

$$Q = \frac{2h_0\sqrt{2R_в h_0}\, Lk(R_в / h_0, X_к, X_н)}{\tau_в}, \qquad (5.16)$$

или

$$Q = \frac{120h_0\sqrt{2R_в h_0}\, L\rho k(R_в / h_0, X_к, X_н)}{\tau_в}, \text{ кг/ч}, \qquad (5.16а)$$

где

$$k = \frac{8{,}88}{\sqrt{\frac{R_в}{h_0}}}\left(1 + X_к^2\right)\left[\frac{R_в}{h_0} + \left(1 + X_к^2\right)\left(X_к + X_н\right) + \left[X_н + X_к + \frac{1}{3}\left(X_н^3 + X_к^3\right)\right]\right]; \qquad (5.17)$$

ρ – плотность перерабатываемого полимерного материала, кг/м^3;

2) находим оптимальную высоту «запаса» (оптимального объема) материала на валках $X_{нн}$ по методике, изложенной в разделе 3.1.2;

3) определяем величину суммарной деформации сдвига для непрерывного вальцевания $\gamma_в$ по формулам (3.8 – 3.10);

4) определяем диаметр шнека шнекового отборочного устройства и его геометрию (см. раздел 2.3) в зависимости от производительности вальцов и свойств перерабатываемого материала;

5) определяем величину суммарной деформации сдвига в каналах шнека $\gamma_ш$ и профилирующей формующей головке $\gamma_{фк}$ по формулам (3.24 – 3.29, 3.32);

6) определяем величину суммарной деформации сдвига для валково-шнекового процесса утилизации $\gamma_{сум}$ по формулам (3.1). Если полученное значение величины суммарной деформации сдвига $\gamma_{сум}$ отличается от суммарной величины сдвига, обеспечивающей заданные физико-механические показатели перерабатываемого материала, то расчет продолжается путем корректировки одного из следующих параметров: межвалковый зазор $2h_0$; частота вращения переднего валка $n_в$; величина фрикции f; шаг нарезки t; глубина нарезки h; ширина гребня e; частота вращения шнека $n_ш$.

Корректировку проводим с целью изменения величины суммарной деформации сдвига для непрерывного процесса валково-шнековой переработки $\gamma_{сум}$, приближаясь к заданным физико-механическим показателям для конкретного перерабатываемого полимера;

7) находим силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания (распорное усилие F_n и технологическую мощность N_n, а также мощность привода вальцов $N_д$) (5.5, 5.7, 5.9);

8) находим энергетические параметры процесса экструзии (технологическая мощность N_n) и проводим прочностный расчет основных деталей и узлов шнекового отборочного устройства по общепринятой методике;

9) проводим прочностный расчет основных деталей и узлов машины (валков, станины, механизма регулировки зазора и др.) по общепринятой методике;

10) проводим тепловой расчет процесса непрерывного вальцевания с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов;

11) проводим тепловой расчет процесса экструзии с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов.

Составляем техническую характеристику спроектированного валково-шнекового агрегата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан валково-шнековый агрегат и непрерывный совмещенный процесс вальцевания-экструдирования для вторичной переработки отходов полимерной тары и упаковки, позволяющий снизить удельные энергозатраты на утилизацию и получить вторичный материал заданного качества.

Спроектирован и смонтирован лабораторный стенд (валково-шнековый агрегат), позволяющий определять значение величины суммарной деформации сдвига, соответствующей заданным физико-механическим показателям отходов термопластов.

Спроектировано отборочное устройство (Патент Российской Федерации 67017), обеспечивающее непрерывный съем расплава полимера с поверхности вращающихся валков и стабильное питание шнекового гранулятора.

Разработана методика инженерного расчета геометрических размеров шнекового отборочного устройства при заданных производительности валкового пластикатора и реологических свойствах полимерного материала.

Разработана методика расчета и программное обеспечение для определения величины суммарной деформации сдвига процесса валково-шнековой переработки, характеризующей влияние различных геометрических размеров валково-шнекового оборудования и технологических параметров процесса утилизации на физико-механические показатели получаемого вторичного термопластичного материала, на которое получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Найдено численное значение величины суммарной деформации сдвига совмещенного процесса валково-шнековой переработки полимерных материалов (на примере ПЭВД), соответствующее заданным физико-механическим показателям ($\gamma_{сум}$ = 2100…2250).

Проведены исследования влияния конструктивных и технологических параметров валково-шнекового оборудования и процесса утилизации на физико-механические показатели получаемого вторичного термопластичного материала.

Созданная методика инженерного расчета геометрических размеров валково-шнекового оборудования и технологических параметров совмещенного процесса утилизации с учетом заданных физико-механических показателей получаемого вторичного материала позволяет проектировать валково-шнековый агрегат или оснащать существующее валковое оборудование разработанным шнековым отборочным устройством.

Результаты работы приняты ОАО «НИИРТМаш» к использованию при проектировании промышленного валково-шнекового агрегата по переработке промышленных и бытовых отходов термопластов. Рассчитанный экономический эффект от создания валково-шнекового агрегата непрерывного действия составляет 340 тыс. р.

Гранулят, полученный на экспериментальной установке из отходов ПЭВД промышленного и общественного потребления, используется на НПП ООО «Эласт» для производства электроизоляционных полимерных труб, применяемых в железобетонных строительных плитах, методом экструзии.

Методика инженерного расчета и программное обеспечение на ЭВМ для проектирования валково-шнековых агрегатов внедрены в учебный процесс при подготовке специалистов по специальности 261201 по дисциплинам «Оборудование для производства тары и упаковки», «Утилизация упаковки» и магистров по программе 150400.26 по дисциплине «Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева В.Т., Лихачева Н.Н., Ткачик З.А. Использование пластмассовых отходов за рубежом // Пластические массы. 2002. № 5. С. 44 – 48.
2. Лобачев Г.К., Желтобрюхов В.Ф. и др. Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика: учеб. пособие. Волгоград, 1999. 180 с.
3. www.promeco.h1.ru
4. Заякин С. Вторичная переработка полимеров // Оборудование. 2005. № 5 (101).
5. www.recyclers.ru
6. Nieβner N. Kunststoffe. 1998. V. 88, № 6. S. 874 – 876, 878 – 880.
7. Ckapelle A. Kunststoffe. 1995. V. 85, № 10. S. 1636, 1638 – 1640.
8. Coating / R. Hinterwaldner et al. 1995. V. 28, № 10. S. 364, 366–367, 370.
9. Николаева Е. Переработка вторична // The Chemical Journal. Апрель, 2003.
10. Андрейцев Д.Ф., Артемьева Т.Е., Вильниц С.А. Технические и экономические проблемы вторичной переработки и использования полимерных материалов. М., 1972. 83 с.
11. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 496 с.
12. Быстров Г.А., Гальперин В.М., Титов Б.П. Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. Л.: Химия, 1982. 264 с.
13. Макаревич А.В. Полимерные упаковочные материалы // Химия и жизнь. 1994. № 2. С. 45.
14. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 3. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. 1024 с.
15. Вторичное использование полимерных материалов / под ред. Е.Г. Любешкиной. М., 1985. 192 с.
16. Rasch R. Chem.-Ing.-Techn. 1976. Jg. 48, № 1. S. 82 – 84.
17. Термические методы обезвреживания промышленных отходов / Г.П. Беспамятов и др. Л.: Химия, 1969. 112 с.
18. Аристархов Д.В., Журавский Г.И. и др. Технологии переработки отходов растительной биомассы, технической резины и пластмассы // Инженерно-физический журнал. 2001. № 6. С. 152 – 156.
19. Rasch R. Chem.-Ztg. 1974. V.98, №5. S. 253 – 260
20. Umwelt. 1979. № 4. S. 278 – 280.
21. Кастнер Х., Камински В. Повторная переработка пластиков в исходное сырье // Нефтегазовые технологии. 1995. № 6. С. 42 – 44.
22. Штарке Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс; пер. с нем. / под ред. В.А. Брагинского. Л., 1987. 176 с.
23. Hunkeler D. et al. Polum. News. 1998. V. 23, № 3. S. 93–94.
24. Petrotekku. Petrotech. 1997. V. 20, № 8. S. 651 – 656.
25. Mod. Plast. Int. 1996. V. 26, № 3. S. 86.
26. Wang Jing. et al. Huanjing kexue. Chin. J Envion. 1998. V. 19, № 5. S. 52 – 54.
27. Lefevre C. et al. Chim nouv. 1998. V. 16, № 62. S. 1921–1922.
28. Васнев В.А. Биоразлагаемые полимеры // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 1997. Т. 39, № 12. С. 2073 – 2086.

29. Schlicht R. Kunststoffe. 1998. V. 88, № 6. S. 888 – 890.

30. Шляпинтох В.Я. Фотохимические превращения и стабилизация полимеров. М., 1979. 344 с.

31. Рэнгби Б., Рабек Я. Фотодеструкция, фотоокисление и фотостабилизация полимеров. М., 1978. 676 с.

32. Bruce G. Chem. Week. V. 159, № 15. S. 32.

33. Мономеры для поликонденсации / под ред. Стилла Д. М. 1976. 253 с.

34. Фомин В.А., Гузеев В.В. Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования // Пластические массы. 2001. № 2. С. 42 – 47.

35. Gumargalieva K.Z., Zaikov G.E., Polishchuk A.Ya., Adamyan A.A. e.c. Handbook of Polyolefins. Second Edition. Ed. Vasile, Marcel Dekker. NY, 2000. P. 1014. Biocompatibility and Biodegradation of Polyolefins. P. 477 – 792.

36. Саморазлагающиеся полимерные упаковочные материалы / А.В. Макаревич и др. // Пластические массы. 1996. № 1. С. 34 – 37.

37. Germansky A., Siroky R. Rekirculacia zmeci odpagnych plastov // Plast a kauc. 1976. V. 13, № 12. P. 360 – 364.

38. Пластмассовые отходы, их сбор, сортировка, переработка, оборудование // Пластические массы. 2001. № 12. С. 3 – 10.

39. Смиренный И.Н., Беляев П.С., Клинков А.С., Ефремов О.В. Другая жизнь упаковки: монография. Тамбов: Першина, 2005. 178 с.

40. Мюррей Р. Цель – Zero Waste; пер. с англ. В.О. Горницкого. М.: ОМННО «Совет Гринпис», 2004. 232 с.

41. Вторичная переработка пластмасс / под ред. Ф. Ла Мантия; пер. с англ.; под ред. Г.Е. Заикова. СПб.: Профессия, 2006. 400 с.

42. www.otlivka.ru

43. Бобович Б.Б. Утилизация отходов полимеров: учеб. пособие. М., 1998. 62 с.

44. Лебедева Т.М., Шалацкая С.А. Переработка вторичного поливинилхлоридного сырья. Л., 1991. 21 с.

45. Wiessenkämper W. Kunststoff – Textilabfälle als Sekundärrohstoff. Kunststoffen. 1978. V. 68, № 5. S. 299 – 302.

46. Вольфсон С.А., Никольский В.Г. Твердофазное деформационное разрушение и измельчение полимерных материалов. Порошковые технологии // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 1994. Т. 36, № 6. С. 1040 – 1056.

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

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

49. Штурман А.А. // Пластические массы. 1991. № 3. С. 53.

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

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

52. Пат. 67017 RU B 29 B 7/64. Шнековое отборочное устройство к валковым машинам / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько; Тамб. гос. техн. ун-т. № 2006106300/12; Заявл. 28.02.2006; Опубл. 10.10.2007, Бюл. № 28.

53. Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1965. 363 с.

54. Клинков А.С. Исследование непрерывного процесса вальцевания полимерных материалов: дис. … канд. техн. наук. М., 1972.

55. Оборудование для переработки пластмасс: справочное пособие / под ред. Завгороднего. М.: Машиностроение, 1976. 407 с.

56. Беляев П.С, Клинков А.С, Маликов О.Г., Однолько В.Г., Соко лов М.В. Основы проектирования экструзионных машин предприятий полимерных материалов: учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 144 с.

57. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография / М.В. Соколов и др. М.: «Изд-во Машиностроение-1», 2004. 248 с.

58. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов. М.: Химия, 1991. 352 с.

59. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. М.: Химия, 1965. 442 с.

60. Бернхардт, Э. Переработка термопластичных материалов. М.: Изд-во Химия, 1965. С. 747.

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

62. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. М.: Химия, КолосС, 2005. 568 с.

63. Красовский В.Н., Воскресенский А.М. Сборник примеров и задач по технологии переработки полимеров. Минск: Вышэйш. школа, 1975. 320 с.

64. Шашков И.В. Валковое оборудование и технология процесса непрерывной переработки отходов пленочных термопластов: автореф. дис. … канд. техн. наук по спец. 05.02.13. Тамбов, 2005. 16 с.

65. Балашов М.М. Клинков А.С. Исследование непрерывного процесса вальцевания полимеров // Пластмассы и каучук. 1973. Т. 20, № 4. С. 291 – 293.

66. Клинков А.С. Исследование непрерывного процесса вальцевания полимерных материалов: дис. … канд. техн. наук. М., 1972.

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

68. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2008612658. Расчет интегрального критерия качества – суммарной величины сдвига для непрерывного вальцевания / С.С. Гуреев, Д.Л. Полушкин, М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев; Тамб. гос. техн. ун-т. № 2008611473 ; Заявл. 07.04.2008. Зарег. 28.05.2008.

69. Сван Том. Delphi 4. Библия разработчика; пер. с англ. СПб.: Диалектика, 1998. 672 с.

70. Озеров В. Delphi. Советы программистов. СПб.: Символ-Плюс, 2003. 976 с.

71. Осипов Д. Delphi. Профессиональное программирование. СПб.: Символ-Плюс, 2006. 1056 с.

72. Торнер Р.В. Исследование механики экструзии полимеров: дис. … д-ра техн. наук. М., 1968.

73. Ким В.С. Исследование смешивающей способности экструзионных машин и разработка основ теории и методов расчета процессов смешения полимерных материалов в экструдерах: дис. … канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1979.

74. Ким В.С., Скачков В.В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. М.: Химия, 1988. 240 с.

75. Соколов М.В., Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий: монография. М.: «Изд-во Машиностроение-1», 2007. 292 с.

76. Соколов М.В. Расчет шнековых машин для переработки резиновых смесей при заданном качестве экструдата // Вестник ТГТУ. Т. 12, № 4 А. С. 468 – 474.

77. Соколов М.В. Определение суммарной величины сдвига при переработке резиновых смесей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. № 8. С. 3–4.

78. Бекин Н.Г. Исследование процесса листования резиновых смесей на валковых машинах: автореф. дис. … д-ра техн. наук. М., 1971.

79. Торнер Р.В. Основные процессы переработки полимеров. Теории и методы расчета. М.: Изд-во Химия, 1972.

80. Балашов М.М., Клинков А.С. Исследование непрерывного процесса вальцевания полимерных материалов // Труды МИХМа. Тамбов, 1972.

81. Практическое руководство по определению молекулярных весов и молекулярно-весового распределения полимеров / Шатенштейн и др. М.: Изд-во «Химия», 1964. 188 с.

82. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Госхимиздат, 1963. 528 с.

83. Вайнштейн Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепных молекулах. М.: Изд. АН СССР, 1963. 372 с.

84. Поликарпов В.М. Переход «порядок–беспорядок» в кремний-, германий- и борсодержащих полимерах и их органических аналогах: дис. … д-ра. хим. наук. М.: ИНХС РАН им. А.В.Топчиева, 2003. 302 с.

85. Пейнтер П., Коулмен М., Кеннг Дж. Теория колебательной спектроскопии. Приложение к полимерным материалам; пер. с англ. М.: Мир, 1986. 580 с.

86. Збинден Р. Инфракрасная спектроскопия высокополимеров; пер. с англ. М.А. Маркевича и Э.Ф. Олейника / под ред. Л.А. Блюменфельда. М.: Изд-во «Мир», 1966.

87. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2008610876. Расчет станин вальцов на прочность и жесткость / С.С. Гуреев, Д.Л. Полушкин, М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев; Тамб. гос. техн. ун-т. № 2007615273; Заявл. 24.12.2007; Зарег. 20.02.2008.

88. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2008612658. Расчет на прочность и жесткость валков вальцов / П.В. Макеев,

Д.Л. Полушкин, М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев; Тамб. гос. техн. ун-т. № 2008611473; Заявл. 07.04.2008; Зарег. 28.05.2008.

89. Лукач Ю.Е., Рябинин Д.О., Метлов Б.Н. Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1967. 296 с.

90. Лукач Ю.Е., Воронин Л.Г., Ружинская Л.И. и др. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров. Киев: Тэхника, 1988. 208 с.

91. Бекин Н.Г. Валковые машины для переработки резиновых смесей (основы теории). Ярославль: ЯТИ, 1969.

92. Рябинин Д.Д., Лукач С.Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1972.

93. Тадмор Э., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров; пер. с англ. М.: Химия, 1984. 628 с.

94. Мирзоев Р.Г. Машины и технология переработки полимеров. Л., 1967.

95. Машиностроение: Энциклопедия в 40 т. Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. IV – XII. Машины и аппараты химических и нефтеперерабатывающих производств. М.: Машиностроение, 2004. 829 с.

96. Раувендааль К. Экструзия полимеров; пер. с англ. / под ред. А.Я. Малкина. СПб.: Профессия, 2007. 768 с.

97. Шенкель Г. Шнековые процессы для пластмасс. Л., 1962. 467 с.

98. Фишер Е.Г. Экструзия полимеров; пер. с англ. / под ред. С.И. Гдалина. М.: Химия, 1970. 283 с.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q – производительность, кг/ч;

N – мощность;

V – объем;

$F_Л$ – площадь поперечного сечения ленты материала, снимаемого с валка, м^2;

n, K и m – реологические константы;

μ – вязкость, Па·с;

n – частота вращения, об/мин;

ρ – плотность смеси, кг/м^3;

$R_в$ – радиус, м;

$L_в$ – длина рабочей части валка, м;

$L_ш$ – длина нарезной части шнека, м;

$X_н$, $X_к$ – безразмерные координаты сечений входа и выхода;

$x_н$, $x_к$ – координаты сечения входа и выхода, м;

P – удельная мощность, характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал;

D – диаметр, м;

f – фрикция;

$\sigma_т$ – предел текучести при растяжении, МПа;

$\sigma_р$ – прочность при разрыве, МПа;

ε – относительное удлинение при разрыве, %;

$2h_0$ – величина минимального зазора между валками, м;

q_N – удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции;

$\tau_в$ – время (продолжительность) вальцевания, с;

γ – величина суммарной деформации сдвига.

Индексы

н – начальное;

к – конечное;

в – вальцов;

ш – шнековое отборочное устройство;

сум – суммарная;

фк – формующий канал.

Аббревиатуры

ПТР – показатель текучести расплава;

ПЭВД и ПЭНП – полиэтилен высокого давления и низкой плотности, соответственно;

ПВХ – поливинилхлорид;

ПП – полипропилен;

ПС – полистирол;

ПЭТФ – полиэтилентерефталат;

ПО – полиолефины;

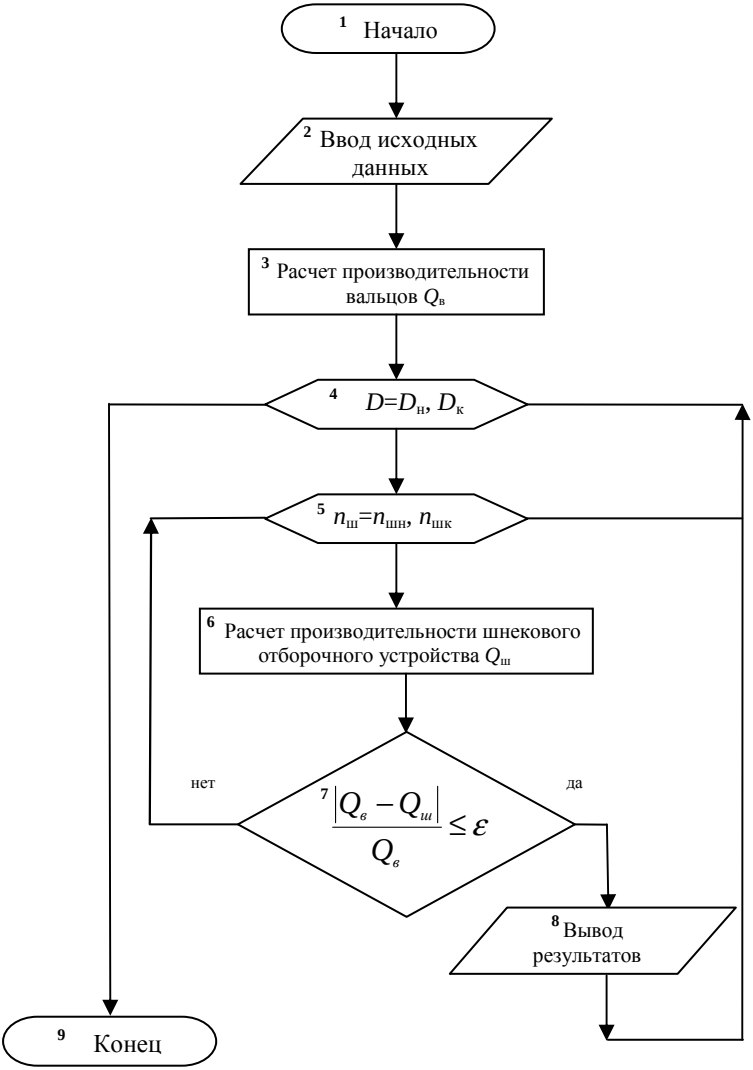
ПА – полиамид;

ЭУ – экспериментальная установка.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШНЕКОВОГО ОТБОРОЧНОГО УСТРОЙСТВА (Блок-схема)



Блок 1. Начало.

Блок 2. Осуществляется ввод исходных данных.

Блок 3. Рассчитывается производительность вальцов $Q_в$, работающих по непрерывной схеме

$$Q_в = 60\pi D n_в F_л \rho \eta .$$

Блок 4. Задается счетчик по диаметру шнека от $D_н$ до $D_к$ с шагом 2.

Блок 5. Задается счетчик по частоте вращения шнека от $n_{шн}$ до $n_{шк}$ с шагом 2.

Блок 6. Рассчитывается производительность шнекового отборочного устройства $Q_ш$

$$Q_ш = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} n_ш .$$

Блок 7. Если условие $\frac{|Q_в - Q_ш|}{Q_в} \le \varepsilon$ соблюдается, то переходят на *блок 8*, если условие не соблюдается, то переходят на *блок 5*.

Блок 8. Выводятся результаты работы программы.

Блок 9. Конец.

Текст программы «Расчет геометрических размеров шнекового отборочного устройства»

```
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs,
  StdCtrls, Math, Menus, Grids, ExtCtrls, ComCtrls, ExtDlgs;

type
  TForm1 = class(TForm)
    EdtW: TEdit;
    LblW: TLabel;
    PC: TPageControl;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet2: TTabSheet;
    Btn: TButton;
    GroupBox4: TGroupBox;
    BtnUmo: TButton;
    Img: TImage;
    TabSheet3: TTabSheet;
    SG: TStringGrid;
    GroupBox1: TGroupBox;
    GroupBox5: TGroupBox;
    MainMenu1: TMainMenu;
```

N1: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
N3: TMenuItem;
N4: TMenuItem;
N5: TMenuItem;
SPD: TSavePictureDialog;
SD: TSaveDialog;
TabSheet4: TTabSheet;
Mm: TMemo;
Mm2: TMemo;
EdtS2: TEdit;
EdtS1: TEdit;
Label1: TLabel;
Label2: TLabel;
Label18: TLabel;
Label19: TLabel;
Edtnn: TEdit;
Mm4: TMemo;
EdtMu1: TEdit;
EdtMu2: TEdit;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
EdtTp: TEdit;
EdtTs: TEdit;
Label24: TLabel;
Label25: TLabel;
EdtER: TEdit;
Label26: TLabel;
EdtK: TEdit;
Label27: TLabel;
EdtIt: TEdit;
Label28: TLabel;
EdtN1: TEdit;
Label29: TLabel;
EdtSc: TEdit;
Label30: TLabel;
EdtQ: TEdit;
Label31: TLabel;
EdtMuc: TEdit;
Label32: TLabel;
EdtdeltaP: TEdit;
Label33: TLabel;
EdtN2: TEdit;

Label34: TLabel;
EdtN: TEdit;
Label35: TLabel;
ScrollBar1: TScrollBar;
SG2: TStringGrid;
Panel1: TPanel;
Label4: TLabel;
Panel2: TPanel;
Label3: TLabel;
Panel3: TPanel;
Label5: TLabel;
Edtl0: TEdit;
Panel5: TPanel;
Label6: TLabel;
Panel6: TPanel;
Panel7: TPanel;
Panel8: TPanel;
Label14: TLabel;
Edtkt: TEdit;
Label15: TLabel;
EdtKh: TEdit;
Label16: TLabel;
EdtKe: TEdit;
Panel9: TPanel;
Label20: TLabel;
EdtKdelta: TEdit;
Panel10: TPanel;
Label48: TLabel;
Label49: TLabel;
EdtQchm: TEdit;
EdtQcho: TEdit;
Panel11: TPanel;
Label50: TLabel;
EdtNkp: TEdit;
Panel12: TPanel;
Label51: TLabel;
Label52: TLabel;
EdtNp1: TEdit;
EdtNp2: TEdit;
Panel13: TPanel;
Label8: TLabel;
Edtlc: TEdit;
Panel14: TPanel;

```
    Label9: TLabel;
    Edtdc: TEdit;
    Panel15: TPanel;
    Panel16: TPanel;
    Label10: TLabel;
    EdtDv: TEdit;
    Label11: TLabel;
    EdtHl: TEdit;
    Panel17: TPanel;
    Panel18: TPanel;
    Label12: TLabel;
    EdtB: TEdit;
    Label13: TLabel;
    EdtNv: TEdit;
    Panel19: TPanel;
    Label17: TLabel;
    Label47: TLabel;
    EdtQv: TEdit;
    EdtQo: TEdit;
    Panel20: TPanel;
    Label59: TLabel;
    Edth0: TEdit;
    Panel21: TPanel;
    Label62: TLabel;
    EdtLv: TEdit;
    Panel22: TPanel;
    Label53: TLabel;
    EdtM: TEdit;
    Panel23: TPanel;
    Label54: TLabel;
    EdtWv: TEdit;
    EdtD: TEdit;
    Edtfi: TEdit;
    Edti: TEdit;
    procedure BtnClick(Sender: TObject);
    procedure BtnUmoClick(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure N5Click(Sender: TObject);
    procedure N3Click(Sender: TObject);
    procedure N4Click(Sender: TObject);
    procedure CBKtChange(Sender: TObject);
    procedure CBKhChange(Sender: TObject);
    procedure CBKeChange(Sender: TObject);
```

```
    procedure CBKl0Change(Sender: TObject);
    procedure CBKdeltaChange(Sender: TObject);

  private
    { Private declarations }
  public

    { Public declarations }
  end;

var
  Form1: TForm1;

implementation

{$R *.DFM}

procedure TForm1.BtnClick(Sender: TObject);
var
LeftXOffset,RightXOffset,TopYOffset,BottomYOffset: word; // от-
ступы
    xn, xk: single;      // начальное и конечное значения x
    yn, yk: single;      // начальное и конечное значения y
    kx, ky: single;      // коэффициенты масштабирования по осям
    dx: single;          // приращение по оси абсцисс
    maxX,maxY,minX,minY,maxXX,maxYY: single;
    xm,ym: single;       // реальные координаты
    xs,ys: word;         // экранные координаты
    dxs,dys,j: word;
Q,Qo,D,h,t,t1,i,e,fi,l0,lc,dc,W:single;
al-
fa,betta,gamma,Fa,Fb,Kg,SC,Nch,Nv,Nkp,Np1,Np2,Ro,nn,eta:single;
Qv,Dv,HL,B:single;
Pi,esp,Ke:single;
delta,S1,S2,Sv,Muc,Mu1,Mu2,Muv,S,ER,K,deltaT: single;
Tp,Ts,N1,N2,N,DeltaP,It,Wv,M,f3,X,h0,Lv,KPD,Kt,Kh,Kdelta: sin-
gle;
SGi,SGj,r:word;
//n:word;
begin
  LeftXOffset:=20; RightXOffset:=10; TopYOffset:=10; BottomYOff-
set:=15;
r:=2;//радиус окружности на графике
```

```
KPD:=0.6;
Xn:=2.5;
Xk:=0.43;
Ro:=915; //плотность, кг/м^3
Pi:=3.141592654;//число Пи
Tp:=StrToFloat(edtTp.text);//рабочая температура, Цельсий
Ts:=StrToFloat(edtTs.text);//температура стеклования, Цельсий
ER:=StrToFloat(edtER.text);// E/R
K:=StrToFloat(edtK.text);//мера консистентности, Па*с^n
It:=StrToFloat(edtIt.text);//индекс течения материала, г/10 мин
eta:=0.85;

lc:=StrToFloat(edtlc.text);//длина формующей части, мм
dc:=StrToFloat(edtdc.text);//диаметр формующей части, мм

Nv:=StrToFloat(edtNv.text);//частота вращения валков, об/мин
Dv:=StrToFloat(edtDv.text);//диаметр валка, мм
h0:=StrToFloat(edth0.text);//межвалковый зазор, мм
Lv:=StrToFloat(edtLv.text);//длина валка, мм
HL:=StrToFloat(edtHL.text);//высота срезаемой ленты, мм
B:=StrToFloat(edtB.text);//ширина срезаемой ленты, мм

D:=StrToFloat(edtD.text);//диаметр шнека, мм
l0:=StrToFloat(edtl0.text)*power(10,-3);//длина шнека, м
//fi:=StrToFloat(edtfi.text);//угол винтовой нарезки
i:=StrToFloat(edti.text);//заходность

 Mm.Lines.Add('Диаметр шнека, D='+FloatToStr(D));

Kt:=StrToFloat(edtKt.text);
Ke:=StrToFloat(edtKe.text);//ширина гребня, м
//t:=StrToFloat(edtKt.text)*power(10,-3);//шаг нарезки, м
Kh:=StrToFloat(edtKh.text);//глубина нарезки, м
Kdelta:=StrToFloat(edtKdelta.text);//радиальный зазор, м

Nkp:=42.4/sqrt(D*power(10,-3));
edtNkp.text:=FloatToStrf(Nkp,ffgeneral,3,7);
Np1:=Nkp*0.2;
Np2:=Nkp*0.7;
edtNp1.text:=FloatToStrf(Np1,ffgeneral,3,7);
edtNp2.text:=FloatToStrf(Np2,ffgeneral,3,7);

  minX:=0;
  minY:=0;
  maxX:=250;
```

```
        maxY:=15;
        maxXX:=maxX-minX;
        maxYY:=maxY-minY;
        kx:=(img.width-(LeftXOffset+RightXOffset))/maxXX;
        ky:=(img.height-(TopYOffset+BottomYOffset))/maxYY;
      Qv:=60*Pi*Dv*power(10,-3)*Nv*HL*power(10,-3)*B*power(10,-
3)*Ro*eta;//производительность вальцев по непрерывной схеме, кг/час

      {
      //Sv:=2*Pi*Nv*Rv
      //M:=Lv*2*Pi*Nv*Rv*Mu*Rv*sqr(2*R/ho)*f3;
      //Wv:=M*2*Pi*Nv;
      }

      Sv:=2*Pi*Nv*Dv/2/(60*h0);
      //edtSv.text:=FloatToStr(Sv);
      Muv:=K*power(Sv,(It-1));
      //edtMuv.text:=FloatToStr(Muv);
      f3:=(1-Xk*Xk)*(ARCTAN(Xk)*180/Pi-
ARCTAN(Xn)*180/Pi)+(Xn+Xn*Xk*Xk+Xk+Xn*Xn*Xk)/(1+Xn*Xn);
      //edtf3.text:=FloatToStr(f3);
      //edtARCTANXk.text:=FloatToStr(ARCTAN(Xk)*180/Pi);
      //edtXk.text:=FloatToStr(Xk);
      //edtXn.text:=FloatToStr(Xn);
      //M:=Lv*power(10,-3)*2*Pi*Nv*Dv*power(10,-
3)/2*Muv*Dv*power(10,-3)/2*sqr(2*Dv*power(10,-3)/(2*h0*power(10,-
3)));//*f3;
      //M:=Lv*power(10,-3)*2*Pi*Nv*Dv*power(10,-
3)/2*Muv*Dv*power(10,-3)/2*sqr(2*Dv*power(10,-3)/(2*h0*power(10,-
3)));//*f3;
      M:=Lv*power(10,-3)*2*Pi*Nv/60*Dv*power(10,-
3)/2*Muv*Dv*power(10,-3)/2*sqrt(2*Dv*power(10,-3)/(2*h0*power(10,-
3)))*f3;
      edtM.text:=FloatToStrf(M,ffgeneral,3,7);
      Wv:=M*2*Pi*Nv/(KPD*60);
      edtWv.text:=FloatToStrf(Wv,ffgeneral,3,7);

      while D<=32 do
       begin
      //D:=32;
       //If (D=14) or (D=16) or (D=18) or (D=20) or (D=22) or (D=24) or
(D=26) or (D=28) or (D=30) or (D=32)then
         //  begin
```

```
edtKt.text:=FloatToStr(1);
edtKh.text:=FloatToStr(0.1);
edtKe.text:=FloatToStr(0.08);
edtKdelta.text:=FloatToStr(0.0035);
//edtFi.text:=FloatToStr(17);

    t:=Kt*D*power(10,-3);
    h:=Kh*D*power(10,-3);
    e:=Ke*D*power(10,-3);
    delta:=Kdelta*D*power(10,-3);
  //  l0:=4*D*power(10,-3);

   fi:=ArcTan(t/(Pi*D*power(10,-3)))*180/Pi;
   edtfi.text:=FloatToStrf(fi,ffgeneral,3,7);
   //  end;
  Mm.Lines.Add('Диаметр шнека, D='+FloatToStr(D));
  Mm.Lines.Add('Шаг шнека, t='+FloatToStr(t));
  Mm.Lines.Add('Глубина шнека, h='+FloatToStr(h));
  Mm.Lines.Add('Ширина гребня, e='+FloatToStr(e));
  Mm.Lines.Add('Радиальный зазор, delta='+FloatToStr(delta));
  Mm.Lines.Add('Длина шнека, l0='+FloatToStr(l0));

//Nch:=StrToFloat(edtNch.text);//частота вращения шнека, об/мин
 Nch:=20;
while Nch<=100 do

 begin

Mm2.Lines.Add('Nch='+FloatToStr(Nch));
Mm2.Lines.Add('Np1='+FloatToStr(Np1));
Mm2.Lines.Add('Np2='+FloatToStr(Np2));

W:=t-e;//, мм

alfa:=(Pi*D*power(10,-3)*h*(t-
i*e)*sqr(cos(fi*Pi/180)))/2;//постоянная прямого потока шнека с посто-
янными геометрическими размерами, м^3

betta:=(power(h,3)*(t-i*e)*sin(2*fi*Pi/180))/(24*l0);//постоянная
обратного потока шнека с постоянными геометрическими размерами,
м^3

gamma:=(sqr(Pi)*sqr(D*power(10,-
3))*power(delta,3)*TAN(fi*Pi/180)*sin(fi*Pi/180))/(10*e*l0);
```

```
Mm.Lines.Add('(alfa)='+FloatToStr(alfa));

Mm.Lines.Add('(D)='+FloatToStr(D));
Mm.Lines.Add('(Nch)='+FloatToStr(Nch));
Mm.Lines.Add('(h)='+FloatToStr(h));
Mm.Lines.Add('(t)='+FloatToStr(t));
Mm.Lines.Add('(e)='+FloatToStr(e));
Mm.Lines.Add('(l0)='+FloatToStr(l0));
Mm.Lines.Add('(kx)='+FloatToStr(kx));
Mm.Lines.Add('(ky)='+FloatToStr(ky));
Fa:=0.19191+0.81888*exp(-(h/W));//коэффициент прямотока
Fb:=0.0614+0.9504*exp(-(h/W));//коэффициент противотока

//edtalfa.text:=FloatToStrF(alfa,ffGeneral,6,7);
//edtbetta.text:=FloatToStrF(betta,ffGeneral,6,7);
//edtgamma.text:=FloatToStrF(gamma,ffGeneral,6,7);

//edtFa.text:=FloatToStrF(Fa,ffGeneral,6,7);
//edtFb.text:=FloatToStrF(Fb,ffGeneral,6,7);

Kg:=(Pi*power(dc*power(10,-3),4))/(128*lc*power(10,-
3));//коэффициент геометрической формы, м^3
//edtKg.text:=FloatToStrF(Kg,ffGeneral,6,7);
//Q:=((alfa*Fa*Kg)/(Kg+betta*Fb))*2/60*Pi*Nch;//производительно
сть шнековой установки, м^3/с
Q:=((alfa*Kg)/(Kg+betta+gamma))*Nch/60;//производительность
шнековой установки, м^3/с
//Q:=(Kg+betta*Fb);
//Q1:=(Kg+betta+gamma);
edtW.text:=FloatToStr(W*power(10,3));
edtQv.text:=FloatToStrf(Qv,ffgeneral,3,7);
edtQchm.text:=FloatToStrf(Q*3600*ro,ffgeneral,3,7);
edtQcho.text:=FloatToStrf(Q,ffgeneral,3,7);

Qo:=Qv/(Ro*3600);
edtQo.text:=FloatToStrf(Qo,ffgeneral,3,7);

if  (Nch=5) then  SG.Cells[1,20]:=FloatToStr(Qv);
if  (Nch=10) then  SG.Cells[2,20]:=FloatToStr(Qv);
if (Nch=15) then  SG.Cells[3,20]:=FloatToStr(Qv);
if  (Nch=20) then  SG.Cells[4,20]:=FloatToStr(Qv);

{if D=10 then
begin
img.Canvas.Brush.Color :=clRed;
```

```
img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;
}
if D=12 then
begin
img.Canvas.Brush.Color :=clGreen;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

if D=14 then
begin
img.Canvas.Brush.Color :=clLime;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

if D=16 then
begin
img.Canvas.Brush.Color :=clYellow;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

if D=18 then
begin
img.Canvas.Brush.Color :=clRed;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

if D=20 then
begin
img.Canvas.Brush.Color :=clGreen;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
```

```
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

      if D=22 then
      begin
      img.Canvas.Brush.Color :=clLime;
      img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

      if D=24 then
      begin
      img.Canvas.Brush.Color :=clYellow;
      img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

      if D=26 then
      begin
      img.Canvas.Brush.Color :=clRed;
      img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

      if D=28 then
      begin
      img.Canvas.Brush.Color :=clGreen;
      img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

      if D=30 then
      begin
      img.Canvas.Brush.Color :=clLime;
      img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;
```

```
        if D=32 then
        begin
        img.Canvas.Brush.Color := clYellow;
        img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Q*915*3600+r))); end;

        SGj:=round(19-((100-Nch))/5);
        SGi:=round(11-((32-D))/2);

        SG.Cells[SGi,SGj]:=FloatToStr(Q*3600*915);
        //Mm.Lines.Add('D='+EdtD.Text);
        esp:=ABS(Qo-Q)/Q;
        If esp<=0.05 THEN
                begin

        SG2.Cells[1,round(6-(22-D)/2)]:=FloatToStr(Nch);
        SG2.Cells[2,round(6-(22-D)/2)]:=FloatToStr(N);

        nn:=Nch;
        deltaT:=Tp-Ts;
        Sc:=32*Q/(60*Ro*Pi*power(dc*power(10,-3),3));//скорость сдвига
в формующей полости
        S1:=(sqr(PI)*(D*power(10,-3)-h)*(D*power(10,-3)-
2*h)*nn)/(60*h*sqrt(sqr(PI)*sqr(D*power(10,-3)-2*h)+sqr(t)));//скорость
сдвига в винтовом канале шнека
        S2:=(sqr(PI)*sqr(D*power(10,-
3))*nn)/(60*delta*sqrt(sqr(PI)*sqr(D*power(10,-3))+sqr(t)));//скорость
сдвига в зазоре между гребнем нарезки и цилиндром

        Muc:=K*power(Sc,(It-1));//*exp(ER/deltaT);//эффективная вязкость
материала в формующей полости
        Mu1:=K*power(S1,(It-1));//*exp(ER/deltaT);//эффективная вязкость
в винтовом канале шнека
        Mu2:=K*power(S2,(It-1));//*exp(ER/deltaT);//эффективная вязкость
в зазоре между гребнем нарезки и цилиндром

        deltaP:=Q*Muc/(60*Ro*Kg);//перепад давления в головке

        N1:=(power(PI,3)*power(D*power(10,-3),3)*sqr(nn)*Mu1*l0)/(h
*sqr(60))+(sqr(PI)*sqr(D*power(10,-
```

```
3))*nn*h*TAN(fi*Pi/180))/(2*60)*deltaP;//мощность на принудительное
проталкивание массы по винтовому каналу шнеку
        N2:=(power(PI,3)*power(D*power(10,-
3),3)*sqr(nn)*Mu2*l0*e)/(delta*t*sqr(60));//мощность на срез материала
в зазоре между вершиной витка нарезки и стенкой цилиндра
        N:=N1+N2;//мощность в зоне дозирования

        Mm4.Lines.Add('S1='+FloatToStr(S1));
        Mm4.Lines.Add('S2='+FloatToStr(S2));
        Mm4.Lines.Add('D='+FloatToStr(D));
        Mm4.Lines.Add('nn='+FloatToStr(nn));
        Mm4.Lines.Add('t='+FloatToStr(t));
        Mm4.Lines.Add('h='+FloatToStr(h));
        Mm4.Lines.Add('e='+FloatToStr(e));

        edtnn.text:=FloatToStr(nn);
        edtS1.text:=FloatToStr(s1);
        edtS2.text:=FloatToStr(s2);
        edtMu1.text:=FloatToStr(Mu1);
        edtMu2.text:=FloatToStr(Mu2);
        edtK.text:=FloatToStr(K);
        edtN1.text:=FloatToStr(N1);
        edtSc.text:=FloatToStr(Sc);
        edtQ.text:=FloatToStr(Q);
        edtMuc.text:=FloatToStr(Muc);
        edtdeltaP.text:=FloatToStr(deltaP);
        edtN2.text:=FloatToStr(N2);
        edtN.text:=FloatToStr(N);
                end;

        {Mm.Lines.Add('alfa='+FloatToStr(alfa));
        Mm.Lines.Add('D='+FloatToStr(D));
        Mm.Lines.Add('esp='+FloatToStr(esp));
        Mm.Lines.Add('Nch='+FloatToStr(Nch));
        Mm.Lines.Add('Q='+FloatToStr(Q));}
         fi:=ArcTan(t/(Pi*D*power(10,-3)))*180/Pi;
        Mm.Lines.Add('fi='+FloatToStr(fi));

        img.Canvas.Brush.Color := clRed;
        img.canvas.Ellipse(LeftXOffset+round(kx*2.5*Nch-r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Qv-
r)),LeftXOffset+round(kx*2.5*Nch+r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Qv+r)));
```

```
   Nch:=Nch+1;//изменения шага по частоте вращения шнека
  end;
//Mm.Clear;

  D:=D+2;
 end;

end;

procedure TForm1.BtnUmoClick(Sender: TObject);
 var
 K,It: single;
begin
 edtD.text:=FloatToStr(12);//диаметр шнека, мм
 //edtfi.text:=FloatToStr(17);//угол подъема винтовой линии
 edti.text:=FloatToStr(1);//заходность шнека
 edtl0.text:=FloatToStr(160);//длина шнека, мм

 //edtKt.text:=FloatToStr(1);//шаг винтовой нарезки, мм

 //edtt.text:=FloatToStr(12);//шаг винтовой нарезки, мм
 //edth.text:=FloatToStr(1.2);//глубина нарезки, мм
 //edte.text:=FloatToStr(1.2);//ширина гребня, мм
 //edtdelta.text:=FloatToStr(0.042);//радиальный зазор, мм

 edtKt.text:=FloatToStr(1);
 edtKh.text:=FloatToStr(0.1);
 edtKe.text:=FloatToStr(0.08);
 edtKdelta.text:=FloatToStr(0.0035);

 edtlc.text:=FloatToStr(10);
 edtdc.text:=FloatToStr(5);
 //edtNch.text:=FloatToStr(10);
 edtNv.text:=FloatToStr(20);

 edtDv.text:=FloatToStr(80);
 edtHL.text:=FloatToStr(11);
 edtB.text:=FloatToStr(3);
 edth0.text:=FloatToStr(1.5);
 edtLv.text:=FloatToStr(200);

 edtTp.text:=FloatToStr(130);
 edtTs.text:=FloatToStr(110);
```

```
 edtER.text:=FloatToStr(96);
 edtK.text:=FloatToStr(355380);
 edtIt.text:=FloatToStr(0.3);
end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var
 LeftXOffset,RightXOffset,TopYOffset,BottomYOffset: word; // от-
ступы

   kx, ky,Nch,D: single;      // коэффициенты масштабирования по
осям
   QQ,N,Nv,Qv,maxX,maxY,minX,minY,maxXX,maxYY: single;
   dxs,dys,j,i,SGj,SGi: word;

begin
 //for i:=1 to 10 do begin SG.Colwidths[i]:=55 end;

// очистка поля
 img.Canvas.brush.color:=clBlack;
 img.Canvas.pen.color:=clBlack;
 img.Canvas.rectangle(0,0,img.width,img.height);
 LeftXOffset:=20; RightXOffset:=10; TopYOffset:=10; BottomYOff-
set:=15;
 // координатные оси
  with img.canvas do
   begin
   pen.color:=clGray;
   font.color:=clWhite;
   img.Canvas.rectangle(LeftXOffset,TopYOffset,img.width-
RightXOffset,img.height-BottomYOffset);  //задание графической обла-
сти//
   dxs:=round((img.width-(LeftXOffset+RightXOffset))/5);
   dys:=round((img.height-(TopYOffset+BottomYOffset))/6);
  // горизонтальные линии
  for j:=1 to 5 do begin moveto(LeftXOffset,TopYOffset+dys*j); line-
to(img.width-RightXOffset,TopYOffset+dys*j); end;
  // вертикальные цифры
  for j:=0 to 2 do begin textout(LeftXOffset-20,TopYOffset+dys*2*j-
5,IntToStr((3-j)*5)); end;
  // горизонтальные цифры
  for j:=0 to 5 do begin textout(LeftXOffset+dxs*j-10,img.height-
BottomYOffset+3,IntToStr(j*20)); end;
```

```
// вертикальные линии
for j:= 1 to 4 do begin moveto(LeftXOffset+dxs*j,TopYOffset); line-
to(LeftXOffset+dxs*j,img.height-BottomYOffset);  end;

QQ:=8;
N:=10;
minX:=0;
minY:=0;
maxX:=100;
maxY:=15;
maxXX:=maxX-minX;
maxYY:=maxY-minY;
kx:=(img.width-(LeftXOffset+RightXOffset))/maxXX;
ky:=(img.height-(TopYOffset+BottomYOffset))/maxYY;
 //edtkx.text:=FloatToStr(kx);
 //edtky.text:=FloatToStr(ky);
 //edtQQ.text:=FloatToStr(QQ);
 //edtN.text:=FloatToStr(N);

with SG do
begin
Cells[0,1]:='Nch=10';
Cells[0,2]:='Nch=15';
Cells[0,3]:='Nch=20';
Cells[0,4]:='Nch=25';
Cells[0,5]:='Nch=30';
Cells[0,6]:='Nch=35';
Cells[0,7]:='Nch=40';
Cells[0,8]:='Nch=45';
Cells[0,9]:='Nch=50';
Cells[0,10]:='Nch=55';
Cells[0,11]:='Nch=60';
Cells[0,12]:='Nch=65';
Cells[0,13]:='Nch=70';
Cells[0,14]:='Nch=75';
Cells[0,15]:='Nch=80';
Cells[0,16]:='Nch=85';
Cells[0,17]:='Nch=90';
Cells[0,18]:='Nch=95';
Cells[0,19]:='Nch=100';
Cells[0,20]:='Вальцы (олива)';
//Cells[0,17]:='D=34';
Cells[1,0]:='D=12';
```

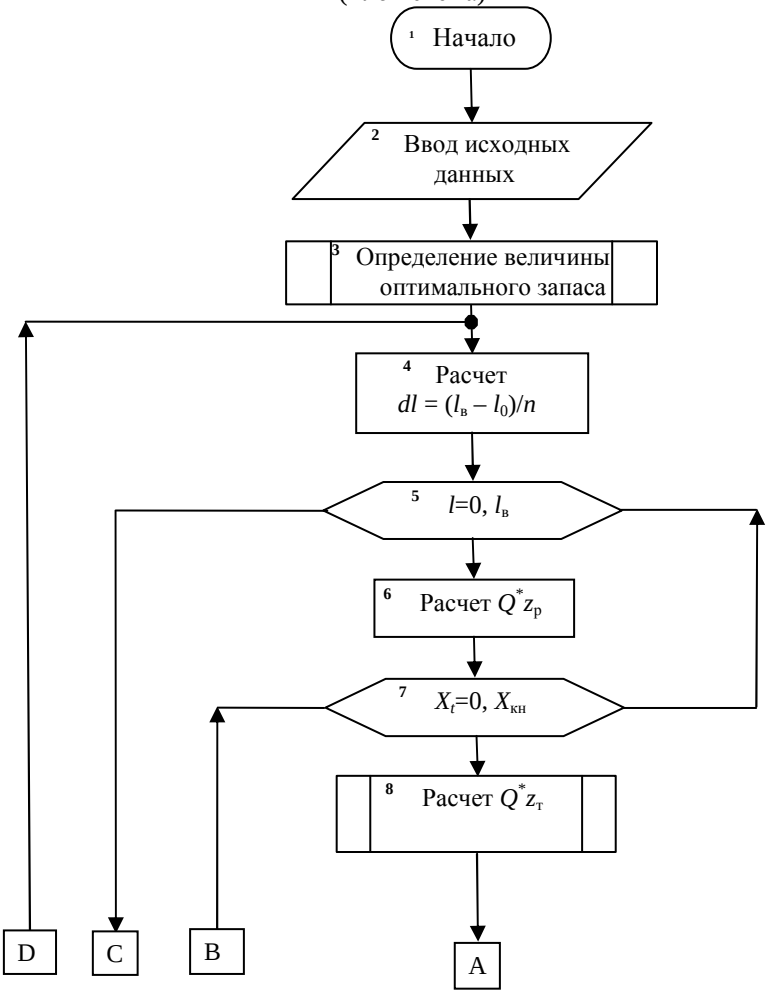
```
Cells[2,0]:='D=14';
Cells[3,0]:='D=16';
Cells[4,0]:='D=18';
Cells[5,0]:='D=20';
Cells[6,0]:='D=22';
Cells[7,0]:='D=24';
Cells[8,0]:='D=26';
Cells[9,0]:='D=28';
Cells[10,0]:='D=30';
Cells[11,0]:='D=32';

  end;

with SG2 do
  begin
Cells[0,1]:='D=12';
Cells[0,2]:='D=14';
Cells[0,3]:='D=16';
Cells[0,4]:='D=18';
Cells[0,5]:='D=20';
Cells[0,6]:='D=22';

Cells[1,0]:='Nch';
Cells[2,0]:='N';
Cells[3,0]:='Nv';

  end;
 end;

end;
procedure TForm1.N5Click(Sender: TObject);
begin
close;
end;

procedure TForm1.N3Click(Sender: TObject);
var FName: string;
begin
SPD.FileName := FName;
if SPD.Execute then
 begin
  case SPD.FilterIndex of
   1: FName := SPD.FileName+'.jpg';
```

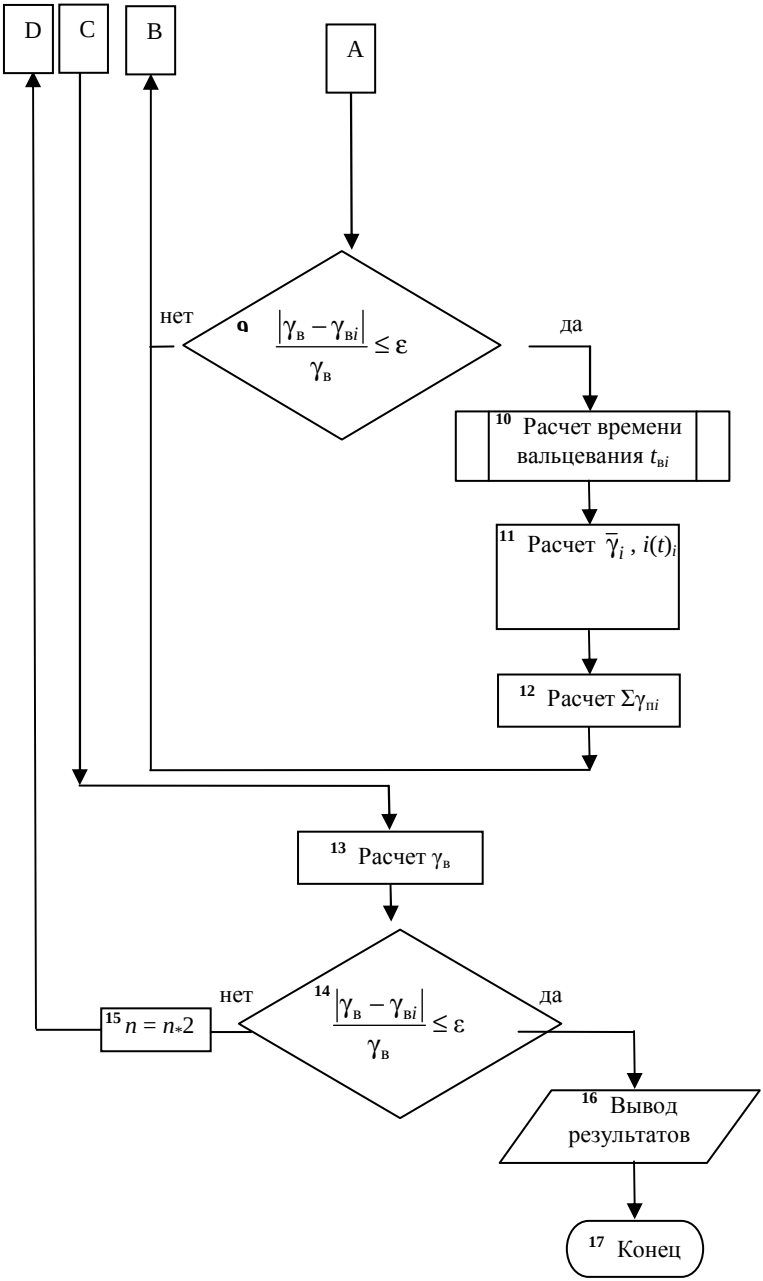
```
   2: FName := SPD.FileName+'.bmp';
  end;
 Img.Picture.SaveToFile(FName);
  end;

end;

procedure TForm1.N4Click(Sender: TObject);
var FName: string;
begin
SD.FileName := FName;
if SD.Execute then
 begin
  FName := SD.FileName;
 end;
end;

procedure TForm1.CBKtChange(Sender: TObject);
 var
 Kt,t,D:single;
     begin
D:=StrToFloat(edtD.text);
Kt:=StrToFloat(edtKt.text);
t:=Kt*D;
//edtt.text:=FloatToStr(t);
     end;

procedure TForm1.CBKhChange(Sender: TObject);
var
 Kh,h,D:single;
    begin
D:=StrToFloat(edtD.text);
Kh:=StrToFloat(edtKh.text);
h:=Kh*D;
//edth.text:=FloatToStr(h);
    end;

procedure TForm1.CBKeChange(Sender: TObject);
var
 Ke,e,D:single;
   begin
D:=StrToFloat(edtD.text);
//edtd.text:=FloatToStr(d);
```

```
        Ke:=StrToFloat(edtKe.text);
        e:=Ke*D;
        //edtt.text:=FloatToStr(Kt*D*power(10,-3));
        //edte.text:=FloatToStr(e);
          end;

        procedure TForm1.CBKl0Change(Sender: TObject);
        var
         Kl0,l0,D:single;
        begin
        D:=StrToFloat(edtD.text);
        //edtd.text:=FloatToStr(d);
        //Kl0:=StrToFloat(cbKl0.text);
        //l0:=Kl0*D;
        //edtt.text:=FloatToStr(Kt*D*power(10,-3));
        edtl0.text:=FloatToStr(l0);
        end;

        procedure TForm1.CBKdeltaChange(Sender: TObject);
        var
         Kdelta,delta,D:single;
        begin
        D:=StrToFloat(edtD.text);
        //edtd.text:=FloatToStr(d);
        Kdelta:=StrToFloat(edtKdelta.text);
        delta:=Kdelta*D;
        //edtt.text:=FloatToStr(Kt*D*power(10,-
3));//edtdelta.text:=FloatToStr(delta);

        end
```

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ СУММАРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТОВ

(Блок-схема)





Блок 1. Начало.

Блок 2. Осуществляется ввод исходных данных.

Блок 3. Определяется оптимальная величина запаса материала на валках, при которой величина удельной мощности q_N, характеризующая интенсивность механического воздействия обрабатываемого материала при многократном пропускании его через область деформации, является максимальной

$$q_N = \frac{N_н}{V} = \mu_1 \left(\frac{U}{h_0} \right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n F_0 \left(X_к, n, \frac{R_в}{h_0} \right).$$

Блок 4. Рассчитывается количество разбиений

$$dl = (l_в - l_0)/n.$$

Блок 5. Задается счетчик по длине валка от l_0 до $l_в$.

Блок 6. Рассчитывается величина безразмерного комплекса $Q^* z_р$

$$Q^* z_p = \frac{4Q}{Uh_0 \sqrt{2_в R h_0}} Z \ .$$

Блок 7. Задается счетчик по величине безразмерной координаты от 0 до $X_{кн}$.

Блок 8. Рассчитывается величина безразмерного комплекса $Q^* z_т$

$$Q^* z_т = \int_{X_{к0}}^{X_к} \left[\frac{2X_к^2 \left(3X_к^2 + 5\right)}{\left(1 + X_к^2\right)^2} \left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + 0{,}143X_к^7 - X_н - X_н^3 - \right.\right.$$

$$- 0{,}6X_н^5 - 0{,}143\,X_н^7 + 6X_к \operatorname{arctg} X_н \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) -$$

$$- X_к^3 \left(3{,}4 + 3{,}34X_к^2 + 0{,}86X_к^4\right) + X_к X_н^2 \left(3{,}4 + 3{,}34X_н^2 + 0{,}86X_н^4\right) -$$

$$- 6X_к \operatorname{arctg} X_к \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) +$$

$$\left. + 1{,}4X_к \ln\left(1 + X_к^2\right) - 1{,}4X_н \ln\left(1 + X_н^2\right) \right] dX_к \, .$$

Блок 9. Если условие $\frac{\left|\gamma_в - \gamma_{вi}\right|}{\gamma_в} \le \varepsilon$ соблюдается, то переходят на *блок 10*, если условие не соблюдается, то переходят на *блок 7*.

Блок 10. Рассчитывается время вальцевания для вальцов, работающих по непрерывной схеме, выражая из

$$Q = \sqrt{\frac{R_в h_0^3 U \left(2Rh_0\right)^{\frac{1}{2}}}{\tau_в} \varphi_1} \ ,$$

где

$$\varphi_1 = \int_{X_{к0}}^{X_{кк}} \left\{ \frac{8{,}88}{\sqrt{\frac{R_в}{h_0}}} \left(1 - X_к^2\right)\left[\frac{R_в}{h_0} + \left(1 + X_к^2\right)\right] - \left(1 + X_к^2\right)\left(X_к + X_н\right) + \right.$$

$$\left. + \left[X_н + X_к + \frac{1}{3}\left(X_н^4 + X_к^4\right)\right] \right\} \times \left[\frac{6X_к^4 + 10X_к^2}{\left(1 + X_к^2\right)^2}\left(X_к + X_к^3 + 0{,}6X_к^5 + \right.\right.$$

$$+ 0{,}143X_к^7 - X_н - X_н^3 - 0{,}6X_н^5 - 0{,}144X_н^7\Big) +$$

$$+ 6X_к \operatorname{arctg} X_н \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) -$$

$$- 6X_к \operatorname{arctg} X_к \left(X_н + X_н^3 + 0{,}6X_н^5 + 0{,}143X_н^7\right) -$$

$$- X_к^3\left(3{,}4 + 3{,}34X_к^2 + 0{,}86X_к^4\right) + X_к X_н^2\left(3{,}4 + 3{,}34X_н^2 + 0{,}86X_н^4\right) +$$

$$\left. + 1{,}4X_к \ln\left(1 + X_к^2\right) - 1{,}4X_н \ln\left(1 + X_н^2\right) \right] dx.$$

Блок 11. Рассчитывается величина средней удельной деформации сдвига, реализуемой за один проход при вальцевании с фрикцией $\bar{\gamma}_i$ и число проходов $i(t)$ для i-го сечения

$$\bar{\gamma} = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{3}{4}\left[\left(1 - X_к^2\right)\left(\operatorname{arctg} X_к - \operatorname{arctg} X_н\right) + \dfrac{\left(1 + X_к^2\right)X_н}{1 + X_н^2} - X_к^2\right] \\ \dfrac{1 - \lambda}{1 - \lambda^2\left(1 + X_к^2\right)} + \dfrac{\lambda}{4\left(1 + X_к^2\right)}\left(\dfrac{X_к}{1 + X_к^2} - \dfrac{X_н}{1 + X_н^2} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} X_к - \operatorname{arctg} X_н \right) \end{array} \right\} \times$$

$$\times \frac{1}{\left[2\sqrt{2}h_0^2\left(1 + X_к^2\right)\left(X_к - X_н\right)\right]}$$

$$i(t) = \frac{U_0 t\left(1 + X_к^2\right)}{\left(X_к - X_н\right)\sqrt{2R_в h_0}}.$$

Блок 12. Рассчитывается суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за все время вальцевания

$$\gamma_n = \bar{\gamma} i(t).$$

Блок 13. Определяется величина суммарной деформации сдвига непрерывного процесса вальцевания

$$\gamma_{\text{н}} = \frac{1}{L_{\text{в}}} \int_0^{L_{\text{в}}} \gamma_n dl \ .$$

Блок 14. Если условие $\frac{\left|\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{в}i}\right|}{\gamma_{\text{в}}} \le \varepsilon$ соблюдается, то переходят на *блок 16*, если условие не соблюдается, то переходят на *блок 15*.

Блок 15. Количество разбиений увеличивается.

Блок 16. Выводятся результаты работы программы.

Блок 17. Конец.

Текст программы «Расчет величины суммарной деформации сдвига при непрерывном режиме процесса вальцевания термопластов»

```
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs,
  StdCtrls, ExtCtrls,Math, ComCtrls, Menus, Buttons;
type
  TFrm = class(TForm)
    Btnrun: TButton;
    Pnl1: TPanel;
    Img1: TImage;
    Label4: TLabel;
    Lblq1: TLabel;
    Lblmax: TLabel;
    Edtxn: TEdit;
    Lblxn: TLabel;
    Lblend: TLabel;
    Mm1: TMemo;
    Lblqzr: TLabel;
    Lblqzt: TLabel;
    Label1: TLabel;
    Edtqzr: TEdit;
    Edtqzt: TEdit;
    Edtxkk: TEdit;
    Edtxkn: TEdit;
    PnlQz: TPanel;
    ImgQz: TImage;
    Lblxkn: TLabel;
```

Pnli: TPanel;
Lbl14: TLabel;
Lblq: TLabel;
Edtq: TEdit;
Edtn: TEdit;
Lbln: TLabel;
Lbl15: TLabel;
Lbl22: TLabel;
Lbld: TLabel;
Edtd: TEdit;
Lbl17: TLabel;
Lblh0: TLabel;
Lbl9: TLabel;
Edth0: TEdit;
Edtmu0: TEdit;
Lblmu0: TLabel;
Lbl12: TLabel;
Label3: TLabel;
Label5: TLabel;
Edtl: TEdit;
Label2: TLabel;
Lblf: TLabel;
Edtf: TEdit;
Lbl16: TLabel;
Lbl8: TLabel;
Lblro: TLabel;
Edtro: TEdit;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Edtnn: TEdit;
Mm2: TMemo;
CB1: TCheckBox;
Btns: TButton;
GBx1: TGroupBox;
CBx1: TComboBox;
Edtqz: TEdit;
MnMn: TMainMenu;
N1: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
NSv: TMenuItem;
SD1: TSaveDialog;
Lbl18: TLabel;
Lbl19: TLabel;

```
    N3: TMenuItem;
    procedure BtnrunClick(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure BtnsClick(Sender: TObject);
    procedure CBx1Change(Sender: TObject);
    procedure N2Click(Sender: TObject);
    procedure NSvClick(Sender: TObject);
    procedure N3Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  dl,d,l1,lt,r,n,h0,q,ro,u1,fr,nn: single;
  xn,xkn,xkt,xkk,dxk,xkb,j,tv,xkkt: single;
  procedure qg();
  procedure qzg();
  procedure tvi();
  procedure analitxn();
  procedure analitxk();
  procedure gammak();
  procedure xu();
  end;

var
  Frm: TFrm;
implementation
uses Spravka1;
{$R *.DFM}

procedure TFrm.FormCreate(Sender: TObject);
var ad,i,dxs,dys: word;
    adqz,iqz,dxsqz,dysqz: word;
    adg,ig,dxsg,dysg: word;
begin
 Btns.Enabled:=false;
 cbx1.ItemIndex:=0;
 edtq.text:=FloatToStr(0.3);      //производительность, кг/ч
 edtl.text:=FloatToStr(18);       //длина валка, см
 edtd.text:=FloatToStr(8);        //диаметр, см
 edtn.text:=FloatToStr(5);        //число оборотов, об/мин
 edth0.text:=FloatToStr(0.05);      //минимальный зазор между вал-
ками, см
 edtmu0.text:=FloatToStr(1000);   //вязкость смеси
```

```
        edtf.text:=FloatToStr(1);         //фрикция
        edtnn.text:=FloatToStr(5);        //индекс течения
        edtro.text:=FloatToStr(0.952);    //удельный вес ленты(плотность),
г/см^3
        edtxn.Text:=FloatToStr(3.857);
        img1.Canvas.Brush.Color:=clWhite;
        img1.Canvas.Rectangle(0,0,img1.Width,img1.height);
        ad:=20;
        with img1.Canvas do
        begin
         pen.Color:=clSilver;
         font.Color:=clBlack;
         img1.Canvas.rectangle(2*ad,ad,img1.width-ad,img1.height-ad);
         dxs:=round((img1.width-3*ad)/10);
         dys:=round((img1.height-2*ad)/10);
         textout(2*ad,ad-15,'f0');
         textout(img1.width-ad+5,img1.height-ad-10,'xn');
         for i:=1 to 9 do begin moveto(2*ad,ad+dys*i); lineto (img1.Width-
ad,ad+dys*i); end;      //горизонтальные линии
         for i:=1 to 9 do begin moveto(2*ad+dxs*i,ad); lineto
(2*ad+dxs*i,img1.height-ad); end;   //вертикальные линии
         for i:=0 to 4 do begin textout(ad-17,ad+dys*2*i-5,FloatToStr(0.1-
i*0.02)); end;          //текст по вертикали
         for i:=0 to 5 do begin textout(2*ad+dxs*2*i-5,img1.Height-
ad+5,FloatToStr(i*2)); end;   //текст по горизонтали
        end;
        imgQz.Canvas.Brush.Color:=clWhite;
        imgQz.Canvas.Rectangle(0,0,imgqz.Width,imgqz.height);
        adqz:=20;
        with imgqz.Canvas do
        begin
         pen.Color:=clSilver;
         font.Color:=clBlack;
         imgqz.Canvas.rectangle(2*adqz,adqz,imgqz.width-
adqz,imgqz.height-adqz);
         dxsqz:=round((imgqz.width-3*adqz)/10);
         dysqz:=round((imgqz.height-2*adqz)/10);
         textout(2*adqz,adqz-15,'xk');
         textout(imgqz.width-adqz,imgqz.height-adqz-10,'Q*z');
         for iqz:=1 to 9 do begin moveto(2*adqz,adqz+dysqz*iqz); lineto
(imgqz.Width-adqz,adqz+dysqz*iqz); end;      //горизонтальные линии
```

```
        for iqz:=1 to 9 do begin moveto(2*adqz+dxsqz*iqz,adqz); lineto
(2*adqz+dxsqz*iqz,imgqz.height-adqz); end;   //вертикальные линии
        for iqz:=0 to 4 do begin textout(adqz-17,adqz+dysqz*2*iqz-
5,FloatToStr(0.5-iqz*0.1)); end;                //текст по вертикали
        for iqz:=0 to 5 do begin textout(2*adqz+dxsqz*2*iqz-
10,imgqz.Height-adqz+5,FloatToStr(iqz*100)); end;       //текст по
горизонтали
       end;
      end;

      procedure TFrm.CBx1Change(Sender: TObject);
      begin
       if cbx1.ItemIndex=0 then
       begin
        edtq.text:=FloatToStr(0.3);       //производительность, кг/ч
        edtl.text:=FloatToStr(18);        //длина валка, см
        edtd.text:=FloatToStr(8);         //диаметр, см
       end;
       if cbx1.ItemIndex=1 then
       begin
        edtq.text:=FloatToStr(1);         //производительность, кг/ч
        edtl.text:=FloatToStr(32);        //длина валка, см
        edtd.text:=FloatToStr(16);        //диаметр, см
       end;
       if cbx1.ItemIndex=2 then
       begin
        edtq.text:=FloatToStr(5);         //производительность, кг/ч
        edtl.text:=FloatToStr(150);       //длина валка, см
        edtd.text:=FloatToStr(66);        //диаметр, см
       end;
      end;

      procedure TFrm.BtnrunClick(Sender: TObject);
      begin
       mm1.Clear;
       mm2.Clear;
       Btns.Enabled:=false;
       Lblend.Font.Color:=clRed;
       Lblend.Caption:='P a c ч e т ! ! !';
       h0:=StrToFloat(edth0.text);                //минимальный зазор между
валками
       {while h0>0.075 do
       begin
```

```
 edth0.text:=FloatToStr(h0);
 edtn.text:=FloatToStr(5);              //число оборотов, об/мин}
 n:=StrToFloat(edtn.text);              //число оборотов
{  while n<20 do}
  begin
//   edtn.text:=FloatToStr(n);
   if CB1.Checked then
   begin
    xn:=StrToFloat(Edtxn.Text);
    if (xn>=3.0999) and (xn<=3.10013) then
    begin
     xn:=xn+0.00025;
    end;
    analitxk();
    Edtxkn.Text:=FloatToStr(xkn);
    xkkt:=xkn;
    xkk:=xkn-0.0000001;
   end
   else
   begin
   qg();
   end;
   gammak();
{  n:=n+10;
  end;
 h0:=h0-0.025}
 end;
end;

//    Определение суммарной величины сдвига
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
procedure TFrm.gammak();
var
   adg,kxg,kyg: word;
   l0,lk,lkb,i1,e1: single;
   u2,u0,ly,y1:single;
   gamma_sr,it,gamma,delg,gammasum1,gammasum:single;
   tv1,tvsum,it1,itsum,gamma_sr1,gamma_srsum: single;
   label m1,mstop;
begin
 adg:=20;
 l1:=StrToFloat(edtl.text);              //длина валка, см
 fr:=StrToFloat(edtf.text);              //фрикция
```

```
        ro:=StrToFloat(edtro.text);                  //удельный вес
ленты(плотность)
        q:=StrToFloat(edtq.text);                    //производительность
        d:=StrToFloat(edtd.text);
        nn:=StrToFloat(Edtnn.Text);                    //индекс течения
        y1:=1;
        gammasum1:=0;
       m1:
        tv1:=0;
        it1:=0;
        gamma_sr1:=0;
        e1:=0.05;
        r:=d/2;                                  //радиус валка, см
        u1:=2*pi*r*n/60;                              //окружная скорость передне-
го валка, см/с
        u2:=u1*fr;
        u0:=(u1+u2)/2;
        ly:=(u2-u1)/(2*u0);
        l0:=0;                                  //нижний предел
        lk:=l1;                                 //верхний предел
        Mm1.Lines.Add('  Количество разбиений  '+FloatToStr(y1));
       // Mm2.Lines.Add('  Количество разбиений  '+FloatToStr(y1));
        gamma:=0;
        gammasum:=0;
        dl:=(lk-l0)/y1;                           //участок длинны
        lkb:=l0+dl/2;                             //средняя точка на участке
        Mm1.Lines.Add('dl='+FloatToStr(dl));
        i1:=0;
        while i1<=y1-1 do
        begin
         lt:=lkb+i1*dl;
         Mm1.Lines.Add('lt='+FloatToStr(lt));
         if i1=0 then begin xkk:=xkn-0.0000001; end;
         if i1=0 then begin xkkt:=xkk; end;
         tvi();
         if Lblend.Font.Color=clBlack then
         begin
          goto mstop;
         end;
         tvsum:=tv1+tv;
         tv1:=tv;
         if i1=0 then begin xkk:=xkn-0.0000001; end;
         qzg();
```

```
        if Lblend.Font.Color=clBlack then
        begin
         goto mstop;
        end;
       //  gamma_sr:=(1.5*(1-sqr(xkk))*arctan((xkk-xn)/(1-
xn*xkk))+((1+sqr(xkk)*xn)/(1+sqr(xn)))-sqr(xkk)*(1-ly)/(1-
ly*(1+sqr(xkk)))+(1-2*sqr(ly)*(1+sqr(xkk)))/(2*(1+sqr(xkk))*(1-
sqr(ly)*(1+sqr(xkk))))*(xkk/(1+sqr(xkk))-xn/(1+sqr(xn))+arctan((xkk-
xn)/(1-xn*xkk))))*power((2.8*h0*dl*(1+sqr(xkk))*(xkk-xn)),-1);
       //  gamma_sr:=(3*((1-sqr(xkk))*(arctan(xkk)-
arctan(xn))+(1+sqr(xkk))*xn/(1+sqr(xn))-sqr(xkk))/4)*(1-ly)/(1-
sqr(ly)*(1+sqr(xkk)))+(ly*(xkk/(1+sqr(xkk))-xn/(1+sqr(xn))+arctan(xkk)-
arctan(xn))/(4*(1+sqr(xkk))))/(2*sqrt(2)*sqr(h0)*dl*(1+sqr(xkk))*(xkk-
xn));
        gamma_sr:=((3/4*((1-sqr(xkk))*(arctan(xkk)-
arctan(xn))+(((1+sqr(xkk))*xn)/(1+sqr(xn)))-sqr(xkk)))*((1-ly)/(1-
ly*ly*(1+sqr(xkk))))+((ly)/((4*(1+sqr(xkk)))))*((xkk/(1+sqr(xkk)))+(xn/(1
+sqr(xn))) +arctan(xkk)-
arctan(xn)))/(2*sqrt(2)*sqr(h0)*dl*(1+sqr(xkk))*(xkk-xn));
        gamma_srsum:=gamma_sr1+gamma_sr;
        gamma_sr1:=gamma_sr;
        it:=(u0*tv*(1+sqr(xkk)))/((xkk-xn)*sqrt(2*r*h0));
        itsum:=it1+it;
        it1:=it;
        gamma:=gamma+gamma_sr*it*dl;
        Mm1.Lines.Add('     Средняя точка');
        Mm1.Lines.Add('xkk='+FloatToStr(xkk));
        Mm1.Lines.Add('xn='+FloatToStr(-xn));
        Mm1.Lines.Add('gamma_sr='+FloatToStr(gamma_sr));
        Mm1.Lines.Add('it='+FloatToStr(it));
        Mm1.Lines.Add('gamma='+FloatToStr(gamma));
        i1:=i1+1;
       end;
       gammasum:=gamma/l1;
       Mm1.Lines.Add('gammasum='+FloatToStr(gammasum));
       delg:=abs((gammasum-gammasum1)/gammasum);
      { Mm1.Lines.Add('delg='+FloatToStr(delg));
       Mm1.Lines.Add('gammasum1='+FloatToStr(gammasum1));
       mm2.Lines.Add('tvsum='+FloatToStr(tvsum));
       mm2.Lines.Add('itsum='+FloatToStr(itsum));
       mm2.Lines.Add('gamma_srsum='+FloatToStr(gamma_srsum));
       mm2.Lines.Add('gammasum='+FloatToStr(gammasum));}
       if delg>e1 then
```

```
        begin
         y1:=y1+1;
         gammasum1:=gammasum;
         goto m1;
        end
        else
       { imgg.Canvas.ellipse(2*adg+round(kxg*(gammasum/350))-
5,imgg.height-(adg+round(kyg*(n/25)))-
5,2*adg+round(kxg*(gammasum/350))+5,imgg.height-
(adg+round(kyg*(n/25)))+5);

imgg.Canvas.pixels[2*adg+round(kxg*(gammasum/350)),imgg.height-
(adg+round(kyg*(n/25)))]:=clBlack;
        sleep(2);
        application.processmessages;
        if n=5 then begin
imgg.Canvas.textout(adg+round(kxg*(gammasum/350)),imgg.height-
(adg*3),FloatToStrF(h0,ffFixed,5,2)); end;}
        mm2.Lines.Add('          Количество разбиений  '+FloatToStr(y1));
        mm2.Lines.Add('Производительность
вальцев.....Q= '+FloatToStr(q));
        mm2.Lines.Add('Диаметр валков
вальцев.....D= '+FloatToStr(d));
        mm2.Lines.Add('Длина валков
вальцев.....L= '+FloatToStr(l1));
        mm2.Lines.Add('Частота вращения переднего валка валь-
цев.....n= '+FloatToStr(n));
        mm2.Lines.Add('Межвалковый за-
зор.....h0= '+FloatToStr(h0));
        mm2.Lines.Add('Индекс течения расплава
полимера.....nn= '+FloatToStr(nn));
        mm2.Lines.Add('Время процесса вальцева-
ния.....t= '+FloatToStr(tvsum));
       // mm2.Lines.Add('itsum= '+FloatToStr(itsum));
       // mm2.Lines.Add('gamma_srsum= '+FloatToStr(gamma_srsum));
        mm2.Lines.Add('Величина суммарного
сдвига.....gammasum= '+FloatToStr(gammasum));
        Mm1.Lines.Add('          **********          ');
        Lblend.Font.Color:=clGreen;
        Lblend.Caption:='Расчет закончен';
       mstop:
       end;
```

```
      //   Определение удельной мощности
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      procedure TFrm.qg();
      var
        a,b,c: single;
        bl,kimv,ko,max,xnmax: single;
        f0,q1,kx,ky: single;
        mu0,rh: single;
        n1,xk0,zn,i,zn1,del,e: single;
        d12,d1,d2,psi: single;
        sb,n11,xk,dx,xb,sa,x,f,sa1,sb1: single;
        del2,del1: extended;
        ad: word;
        label m1,m2,m3;
      begin
       max:=0;
       ad:=20;
       mu0:=StrToFloat(edtmu0.text);              //вязкость материала
       l1:=StrToFloat(edtl.text);                 //длина валка, см
       fr:=StrToFloat(edtf.text);                 //фрикция
       ro:=StrToFloat(edtro.text);                //удельный вес
ленты(плотность)
       q:=StrToFloat(edtq.text);                  //производительность
       d:=StrToFloat(edtd.text);
       nn:=StrToFloat(Edtnn.Text);                //индекс течения
       bl:=1;                                     //ширина ленты, см
       kimv:=0.85;                                //коэффициент использования
машинного времени
       ko:=1;                                     //коэффициент опережения
      // q:=d*(60*pi*ko*kimv*n*h0*bl*ro/1000);
//производительность
      // edtq.text:=FloatToStr(q);      //производительность, кг/ч
       r:=d/2;                                    //радиус валка, см
       u1:=2*pi*r*n/60;                           //окружная скорость передне-
го валка, см/с
       rh:=4*r/h0;
       e:=0.05;                                   //точность
      {расчет знаменателя}
       n1:=2;                                     //количество разбиений
       xkk:=0.1;
       while xkk<0.5 do
       begin
        xk0:=0;                                   //нижний предел
```

```
      m1:
        zn:=0;
        dxk:=(xkk-xk0)/n1;
        xkb:=xk0+dxk/2;
        i:=0;
        while i<n1 do
        begin
         xkt:=xkb+i*dxk;
         {Mm1.Lines.Add('xkt='+FloatToStr(xkt));
         xu();
         Mm1.Lines.Add('зз  xn='+FloatToStr(xn));}
         analitxn();
         d1:=(8.88/sqrt(rh))*(1+sqr(xkt))*(rh+(1+sqr(xkt)));

d2:=(1+sqr(xkt))*(xkt+xn)+(xn+xkt+(power(xn,3)+power(xkt,3))/3);
         d12:=d1-d2;

a:=(((6*power(xkt,4)+10*sqr(xkt))/(sqr(1+sqr(xkt))))*(xkt+power(xkt,3)+0.
6*power(xkt,5)+(1/7)*power(xkt,7)-xn-power(xn,3)-0.6*power(xn,5)-
(1/7)*power(xn,7)));

b:=6*xkt*arctan(xn)*(xn+power(xn,3)+0.6*power(xn,5)+(1/7)*power(xn,7
))-6*xkt*arctan(xkt)*(xn+power(xn,3)+0.6*power(xn,5)+
(1/7)*power(xn,7))-
power(xkt,3)*(118/35+(116/35)*sqr(xkt)+(6/7)*power(xkt,4));

c:=xkt*sqr(xn)*(118/35+(116/35)*sqr(xn)+6/7*power(xn,4))+(48/35)*xkt*l
n(1+sqr(xkt))-(48/35)*xn*ln(1+sqr(xn));
         psi:=a+b+c;
         zn:=zn+psi*d12*dxk;
         del:=abs((zn-zn1)/zn);
        i:=i+0.1;
        end;
        if del>e then
        begin
         n1:=n1*2;
         zn1:=zn;
         goto m1;
        end;
      {расчет числителя}
        n1:=2;                    //количество разбиений
        xk0:=0;                    //нижний предел
      m3:
```

```
        sb:=0;
        dxk:=(xkk-xk0)/n1;
        xkb:=xk0+dxk/2;
        i:=0;
        while i<n1 do
        begin
         xkt:=xkb+i*dxk;
         {Mm1.Lines.Add('xkt='+FloatToStr(xkt));
         xu();
         Mm1.Lines.Add('чч  xn='+FloatToStr(xn));}
         analitxn();
         d1:=(8.88/sqrt(rh))*(1+sqr(xkt))*(rh+(1+sqr(xkt)));

d2:=(1+sqr(xkt))*(xkt+xn)+(xn+xkt+(power(xn,3)+power(xkt,3))/3);
         d12:=d1-d2;

a:=(((6*power(xkt,4)+10*sqr(xkt))/(sqr(1+sqr(xkt))))*(xkt+power(xkt,3)+0.
6*power(xkt,5)+(1/7)*power(xkt,7)-xn-power(xn,3)-0.6*power(xn,5)-
(1/7)*power(xn,7)));

b:=6*xkt*arctan(xn)*(xn+power(xn,3)+0.6*power(xn,5)+(1/7)*power(xn,7
))-6*xkt*arctan(xkt)*(xn+power(xn,3)+0.6*power(xn,5)+
(1/7)*power(xn,7))-
power(xkt,3)*(118/35+(116/35)*sqr(xkt)+(6/7)*power(xkt,4));

c:=xkt*sqr(xn)*(118/35+(116/35)*sqr(xn)+6/7*power(xn,4))+(48/35)*xkt*l
n(1+sqr(xkt))-(48/35)*xn*ln(1+sqr(xn));
         psi:=a+b+c;
         n11:=2;                    //количество разбиений
         xk:=xkt;
        m2:
         dx:=(xn-xk)/n11;
         xb:=xk+dx/2;
         sa:=0;
         j:=0;
         while j<n11 do
         begin
          x:=xb+j*dx;
          if sqr(x)>sqr(xk) then f:=(power((sqr(x)-
sqr(xk)),1/nn))/(power((1+sqr(x)),(2*1/nn+1)))*psi;
          if sqr(x)<sqr(xk) then f:=(power((sqr(xk)-
sqr(x)),1/nn))/(power((1+sqr(x)),(2*1/nn+1)))*psi;
          sa:=sa+f*dx*dxk;
```

```
          del2:=abs((sa-sa1)/sa);
         j:=j+0.1;
         end;
         if del2>e then
         begin
          n11:=n11*2;
          sa1:=sa;
          goto m2;
         end;
         sb:=sa+sb;
        i:=i+0.1;
        end;
        del1:=abs((sb-sb1)/sb);
        if del1>e then
        begin
         n1:=n1*2;
         sb1:=sb;
         goto m3;
        end;
        f0:=abs(sb/zn);
        q1:=mu0*power(u1/h0,1/nn+1)*power((2*1/nn+1)/1/nn,1/nn)*f0;
        kx:=round((img1.width-3*ad)/1);
        ky:=round((img1.height-2*ad)/1);
        img1.Canvas.pixels[2*ad+round(kx*(-xn/10)),img1.height-
(ad+round(ky*(f0*10)))]:=clBlack;
        sleep(2);
        application.processmessages;
        {Mm1.Lines.Add('xkt='+FloatToStr(xkt));
        Mm1.Lines.Add('зз  xn='+FloatToStr(xn));}
        if max<q1 then
        begin
         max:=q1;
         xnmax:=xn;
        end
        else
        begin
         Lblmax.Caption:=FloatToStrF(max,ffGeneral,5,7);
         Edtxn.Text:=FloatToStrF(-xnmax,ffGeneral,4,7);
        end;
       xkk:=xkk+0.005;
      end;
       xn:=StrToFloat(Edtxn.Text);
      if (xn>=3.0999) and (xn<=3.10013) then
```

```
        begin
         xn:=3.2;              //xn+0.00025;
        end;
        analitxk();
        Edtxkn.Text:=FloatToStr(xkn);
        xkkt:=xkn;
        xkk:=xkn-0.0000001;
       end;

      //   Определение безразмерного комплекса Q*z
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      procedure Tfrm.qzg();
      var
        lqz,mqz: single;
        adqz,kxqz,kyqz: word;
        n1qz,delqz,del1qz,s1,hk,qzr,qzt,z,qstop: single;
        aqz,bqz,cqz,dqz,eqz,qz,eps,eps1,xxx: single;
      label m4,m5;
      begin
       adqz:=20;
       delqz:=0.08;
       del1qz:=0.008;
       s1:=0;
        kxqz:=round((imgqz.width-3*adqz)/1);
        kyqz:=round((imgqz.height-2*adqz)/1);
       z:=lt/sqrt(2*r*h0);
       qzr:=((4*q*1000/(3600*ro))/(u1*h0*sqrt(2*r*h0)))*z;
       xxx:=StrToFloat(Edtxn.Text);
       if xxx<2.1 then
       begin
        hk:=0.0001;
       end;
       if (xxx>=2.1) and (xxx<2.4) then
       begin
        hk:=0.00001;
       end;
       if (xxx>=2.4) and (xxx<3) then
       begin
        hk:=0.000005;
       end;
       if (xxx>=3) and (xxx<3.95) then
       begin
        hk:=0.0000005;
```

```
        end;
        if (xxx>=3.95) and (xxx<5)then
        begin
         hk:=0.000001;
        end;
        if xxx>=5 then
        begin
         hk:=0.0000005;
        end;
        if (h0>=0.05) and (h0<0.2)then
        begin
         hk:=0.000001;
        end;
        if (h0>=0.2) and (h0<0.5)then
        begin
         hk:=0.0000001;
        end;
        if (h0>=0.5) and (h0<1)then
        begin
         hk:=0.00000002;
         del1qz:=0.01;
        end;
        if (h0>=1) and (h0<2)then
        begin
         hk:=0.00000002;
         del1qz:=0.05;
        end;
        Mm1.Lines.Add('qzr='+FloatToStr(qzr));
        while xkk>0.1 do
        begin
         qzt:=0;
         n1qz:=2;
       m4:
         dxk:=(xkn-xkk)/n1qz;        //шаг по xk
         xkb:=xkk+dxk/2;
         j:=0;
         while j<n1qz do
         begin
          xkt:=xkb+j*dxk;
          analitxn();
          aqz:=2*sqr(xkt)*(3*sqr(xkt)+5)/sqr(1+sqr(xkt));
          bqz:=(xkt+power(xkt,3)+(3/5)*power(xkt,5)+(1/7)*power(xkt,7)-xn-
power(xn,3)-(3/5)*power(xn,5)-(1/7)*power(xn,7));
```

```
cqz:=6*xkt*arctan(xn)*(xn+power(xn,3)+(3/5)*power(xn,5)+(1/7)*power(
xn,7));

dqz:=power(xkt,3)*((118/35)+(116/35)*sqr(xkt)+(6/7)*power(xkt,4));
        eqz:=xkt*sqr(xn)*((118/35)+(116/35)*sqr(xn)+(6/7)*power(xn,4));

lqz:=6*xkt*arctan(xkt)*(xn+power(xn,3)+(3/5)*power(xn,5)+(1/7)*power(
xn,7));
         mqz:=(48/35)*xkt*ln(1+sqr(xkt))-(48/35)*xn*ln(1+sqr(xkt));
         qz:=aqz*bqz+cqz-dqz+eqz-lqz+mqz;
         qzt:=qzt+qz*dxk;
         eps:=abs((qzt-s1)/qzt);
        j:=j+1;
        end;
        if eps>delqz then
        begin
         s1:=qzt;
         n1qz:=n1qz*2;
        goto m4;
        end
        else
        imgqz.Canvas.pixels[2*adqz+round(kxqz*(qzt/500)),imgqz.height-
(adqz+round(kyqz*(xkk*2)))]:=clBlack;
        sleep(2);
        application.processmessages;
        eps1:=abs((qzt-qzr)/qzt);
        qstop:=qzt/qzr;
        if qstop>2 then
        begin
         Lblend.Font.Color:=clBlack;
         Lblend.Caption:='Неверные параметры';
         Btns.Enabled:=true;
         goto m5;
        end;
      //  Mm2.Lines.Add('eps1='+FloatToStr(eps1));
      //  Mm2.Lines.Add('qzt='+FloatToStr(qzt));
        Edtqz.Text:=FloatToStr(qzt);
        if (xkk>0.1) and (xkk<0.101) then
        begin
         Lblend.Font.Color:=clBlack;
         Lblend.Caption:='Q*zt << Q*zr';
         Btns.Enabled:=true;
```

```
  goto m5;
 end;
 if eps1<del1qz then
 begin
  edtqzr.text:=FloatToStrF(qzr,ffGeneral,6,7);
  edtqzt.text:=FloatToStrF(qzt,ffGeneral,6,7);
  edtxkk.text:=FloatToStrF(xkk,ffGeneral,6,7);
  goto m5;
 end;
xkk:=xkk-hk;
end;
m5:
end;

//    Определение времени вальцевания  !!!!  ИНТЕГРАЛ
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
procedure TFrm.tvi();
var
   av,bv,cv,dv,fi1: single;
   n1,ltt: single;
   i,at,bt,ct,dt,dxkt,xkbt,xknt,xkkk: single;
begin
 ltt:=lt+dl/2;
 lt:=ltt;
 n1:=2;
 fi1:=0;
 xkkk:=xkk;
 xknt:=xkkt;
 qzg();
 dxkt:=(xknt-xkk)/n1;
 xkbt:=xknt-dxkt/2;
 i:=0;
 while i<n1 do
 begin
  xkt:=xkbt-i*dxkt;
  analitxn();

at:=(((6*power(xkt,4)+10*sqr(xkt))/(sqr(1+sqr(xkt))))*(xkt+power(xkt,3)+
0.6*power(xkt,5)+(1/7)*power(xkt,7)-xn-power(xn,3)-0.6*power(xn,5)-
(1/7)*power(xn,7)));

bt:=6*xkt*arctan(xn)*(xn+power(xn,3)+0.6*power(xn,5)+(1/7)*power(xn,
7))-6*xkt*arctan(xkt)*(xn+power(xn,3)+0.6*power(xn,5)+
```

```
(1/7)*power(xn,7))-power(xkt,3)*(118/35+(116/35)*sqr(xkt)+
(6/7)*power(xkt,4));

ct:=xkt*sqr(xn)*(118/35+(116/35)*sqr(xn)+6/7*power(xn,4))+(48/35)*xkt*
ln(1+sqr(xkt))-(48/35)*xn*ln(1+sqr(xn));
        dt:=(8.88/sqrt(r/h0))*(1+sqr(xkt))*((r/h0)+(1+sqr(xkt)))-
(1+sqr(xkt))*(xkt+xn)+(xn+xkt+1/3*(power(xn,3)+power(xkt,3)));
         fi1:=fi1+dt*(at+bt+ct)*dxkt;
        i:=i+0.1;
        end;
        tv:=(r*power(h0,3)*u1*sqrt(2*r*h0)*fi1)/sqr(q*1000/(3600*ro));
        Mm1.Lines.Add('    Крайняя точка');
        Mm1.Lines.Add('tv='+FloatToStr(tv));
        Mm1.Lines.Add('xkk='+FloatToStr(xkk));
       // Mm1.Lines.Add('xn='+FloatToStr(-xn));
        xkkt:=xkk;
        xkk:=xkkk;
        lt:=ltt-dl/2;
       end;

       //    Определение Xn через Xk    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
       procedure TFrm.analitxn();
       var
         aa,bb,cc,dd,ee: single;
       begin
        aa:=-0.0017113647;
        bb:=-1.7858874;
        cc:=2.4536515;
        dd:=-0.14893896;
        ee:=-3.1512369;
        xn:=(aa+cc*xkt+ee*sqr(xkt))/(1+bb*xkt+dd*sqr(xkt));
        xn:=-1*xn;
       end;

       //    Определение Xk через Xn    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
       procedure TFrm.analitxk();
       var
         aa,bb,cc,dd,ee,ff,gg,hh,ii: single;
       begin
        aa:=0.00061743023;
        bb:=0.77067434;
        cc:=0.42032885;
        dd:=0.54246109;
```

```
        ee:=0.13832066;
        ff:=0.55612236;
        gg:=0.36746326;
        hh:=-0.27259481;
        ii:=-0.14707472;

xkn:=(aa+cc*xn+ee*sqr(xn)+gg*power(xn,3)+ii*power(xn,4))/(1+bb*xn+d
d*sqr(xn)+ff*power(xn,3)+hh*power(xn,4));
      end;
      //    Определение Xn через Xk    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      procedure TFrm.xu();
       var
       i: word;
       t,p: longword;
       dx: single ;
       g,x,a,b,xa,xb,eS,af,bf,xk,hxk: single;
       epsa,epsb,epsS,sa,sb,sa1,sb1: single;
       label mx1,mx2,mx3,mx4,mx5;
      begin
       //Mm1.Lines.Add(' xn xn xn xn xn xn xn ');
       nn:=StrToFloat(Edtnn.Text);   //Индекс течения
      // for nn:=1 to 5 do
      // begin
        g:=1/nn ;
        xk:=0.0001;
        while xk<xkt do
        begin
         hxk:=0.0015;
         t:=2;
      mx2:
         a:=xk;
         b:=-xk;
         dx:=(b-a)/t;
         xb:=a+dx/2;
         sa:=0;
         for i:=0 to t-1 do
         begin
          xa:=xb+i*dx;
          if sqr(xa)>sqr(xk) then af:=power((xa*xa-
xk*xk),g)/power((1+xa*xa),(2*g+1));
          if sqr(xa)<sqr(xk) then af:=power((xk*xk-
xa*xa),g)/power((1+xa*xa),(2*g+1));
          sa:=sa+af*dx;
```

```
          epsa:=abs((sa-sa1)/sa);
         end;
         if epsa<0.005 then goto mx1;
         sa1:=sa;
         t:=t*t;
         goto mx2;
       mx1:
         xn:=0;
         while xn<5 do
         begin
          p:=2;
       mx3:
          a:=xn;
          b:=xk;
          dx:=(b-a)/P;
          xb:=a+dx/2;
          sb:=0;
          for i:=0 to P-1 do
          begin
           x:=xb+i*dx;
           if sqr(x)>sqr(xk) then bf:=power((x*x-
xk*xk),g)/power((1+x*x),(2*g+1));
           if sqr(x)<sqr(xk) then bf:=power((xk*xk-
x*x),g)/power((1+x*x),(2*g+1));
           sb:=sb+bf*dx;
           epsb:=abs((sb-sb1)/sb);
          end;
          if epsb<0.005 then goto mx4;
          sb1:=sb;
          p:=p*p;
          goto mx3;
       mx4:
          es:=0.005 ;
          epsS:=abs(sb-sa);
         { if (nn = 1) and (xk > 0.165) then es := 0.001;
          if (nn = 1) and (xk > 0.1)and (xk < 0.165) then es := 0.001;
          if (nn = 1) and (xk < 0.1)and (xk > 0.05) then es := 0.000025;
          if (nn = 1) and (xk < 0.05)and (xk > 0.025) then es := 0.00001;
          if (nn = 1) and (xk < 0.025) then es := 0.000001;

          if (nn = 2) and (xk < 0.1) then es := 0.001;
          if (nn = 2) and (xk < 0.025) then es := 0.00025;
          if (nn = 2) and (xk > 0.4) then es := 0.01;
```

```
        if (nn = 3) and (xk < 0.05) then es := 0.001;
        if (nn = 3) and (xk > 0.4) then es := 0.01;
        if (nn = 3) and (xk > 0.45) then es := 0.005;

        if (nn = 4) and (xk < 0.025) then es := 0.001;}

        if (nn = 5) and (xk < 0.025) then es := 0.001;
        if epsS<es then goto mx5;
        xn:=xn+0.01 ;
       end;
     mx5:
       { if (nn = 2) and (xk > 0.4) then  hxk:= 0.0009;
        if (nn = 3) and (xk > 0.45) then  hxk:= 0.0045;
        if (nn = 4) and (xk > 0.43) then  hxk:= 0.005;}
        if (nn = 5) and (xk > 0.42) then  hxk:= 0.005;
        if (nn = 5) and (xk > 0.45) then  hxk:= 0.003;
       Mm1.Lines.Add('xn='+FloatToStr(xn));
       xk:=xk+hxk;
       end;
      end;

     procedure TFrm.BtnsClick(Sender: TObject);
     begin
       if Lblend.Caption='Неверные параметры' then
       begin
       FrmS.Show;
       FrmS.Mms.Clear;
       FrmS.Mms.Lines.Add('    В данном случае произошел пропуск
точки сравнения');
       end;
       if Lblend.Caption='Q*zt << Q*zr' then
       begin
       FrmS.Show;
       FrmS.Mms.Clear;
       FrmS.Mms.Lines.Add(' В данном случае сравнение теоретическо-
го и расчетного значений безразмерного комплекса Q*z невозможно,
так как теоретическое значение на протяжении всего участка меньше
расчетного значения и не может попасть в допускаемую точность
сравнения');
       FrmS.Mms.Lines.Add(' Необходимо одно из следующих действий
при прежних остальных параметрах:');
       FrmS.Mms.Lines.Add('  – уменьшить межвалковый зазор h0;');
```

```
  FrmS.Mms.Lines.Add('  – увеличить частоту вращения валка n;');
  FrmS.Mms.Lines.Add('  – уменьшить производительность Q;');
  end;
end;
procedure TFrm.N2Click(Sender: TObject);
begin
close;
end;
procedure TFrm.NSvClick(Sender: TObject);
var FName: string;
begin
 SD1.FileName:=FName;
 if SD1.Execute then
 begin
  FName:=SD1.FileName;
  Mm2.Lines.SaveToFile(FName);
 end;
end;
procedure TFrm.N3Click(Sender: TObject);
begin
 FrmS.Show;
 FrmS.Mms.Clear;
 FrmS.Mms.Lines.Add('   1. Первым делом необходимо задать значения параметров необходимых для расчета,');
 FrmS.Mms.Lines.Add('т.е. заполнить все ячейки исходных данных числовыми  значениями.  А если они уже');
 FrmS.Mms.Lines.Add('заполнены, то  изменить  значения  на необходимые.  Для  заполнения  ячеек');
 FrmS.Mms.Lines.Add(' геометрических  параметров  валков вальцев  можно  воспользоваться  выпадающим');
 FrmS.Mms.Lines.Add('списком "Тип валцев".');
 FrmS.Mms.Lines.Add('   2. Произведя  все  вышеописанные  действия  можно  нажимать  кнопку “Расчет”, в');
 FrmS.Mms.Lines.Add('результате чего начинается работа программы.');
 FrmS.Mms.Lines.Add('Расчитывается максимальное значение удельной мощности и одновременно строится');
 FrmS.Mms.Lines.Add('график зависимости функции удельной мощности от безразмерной координаты входа xn.');
 FrmS.Mms.Lines.Add(' Затем  расчитывается  значение  безразмерного комплекса Q*z, и также строится');
 FrmS.Mms.Lines.Add('зависимость безразмерной координаты выхода xk от расчетного значения Q*z.');
```

```
FrmS.Mms.Lines.Add('Когда расчетное значение Q*z совпадает с
теоретическим значением Q*z происходит');
FrmS.Mms.Lines.Add('вывод результатов.');
FrmS.Mms.Lines.Add('  3. Возможно сохранение результатов в
отдельный текстовый файл, при этом');
FrmS.Mms.Lines.Add('необходимо прописывать расширение фай-
ла (txt, doc):');
FrmS.Mms.Lines.Add('      Файл – Сохранить');

FrmS.Mms.Lines.Add(' В процессе расчета могут быть следующие
ошибки работы программы:');
FrmS.Mms.Lines.Add('      1) Пропуск точки сравнения');
FrmS.Mms.Lines.Add('      2) Сравнение теоретического и рас-
четного значений безразмерного комплекса');
FrmS.Mms.Lines.Add('Q*z  невозможно,  так  как  теоретическое
значение на протяжении всего участка меньше');
FrmS.Mms.Lines.Add('расчетного значения и не может попасть в
допускаемую точность сравнения');
FrmS.Mms.Lines.Add('  Чтобы узнать какая именно ошибка про-
изошла, необходимо нажать на знак вопроса,');
FrmS.Mms.Lines.Add('который при этом становится активным.');
end;
end.
```

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сводная таблица экспериментов (к разделу 4)

Непрерывный процесс вальцевания полиэтилена высокого давления марки 15803-020

3.1. Определение показателя текучести расплава

Температура в цилиндре ИИРТа T = 190 °С. Вес груза P = 2,16 кг.
Время между отбором образцов τ = 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
Величина фрикции f = 1:1,2 Минимальный зазор между валками h_0 = 1 мм $n_в$ = 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 $n_в$ = 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 $n_в$ = 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 $n_в$ = 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

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m, г	Показатель текучести расплава I, г/10 мин	Номера образцов	Масса m, г	Показатель текучести расплава I, г/10 мин
Среднее значение I = 1,011					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
Величина фрикции f = 1:1,2					
Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм					
Частота вращения переднего валка					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m, г	Показатель текучести расплава I, г/10 мин	Номера образцов	Масса m, г	Показатель текучести расплава I, г/10 мин
Среднее значение I = 1,380					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
Величина фрикции f = 1:1,2					
Минимальный зазор между валками h_0 = 2 мм					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин	Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин
Среднее значение I = 1,608					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм					
Величина фрикции f = 1:1					
Частота вращения переднего валка					
$n_в$ = 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

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин	Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин
Среднее значение I = 1,509					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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					
$n_в$ = 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

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин	Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин
Среднее значение I = 1,308 Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм Величина фрикции f = 1:1,36 $n_в$ = 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 $n_в$ = 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 $n_в$ = 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 $n_в$ = 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 $n_в$ = 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

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин	Номера образцов	Масса *m*, г	Показатель текучести расплава *I*, г/10 мин
Среднее значение I = 1,440					
$n_в$ = 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					

3.2. Определение предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве*

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
Непрерывный процесс вальцевания полиэтилена высокого давления марки 15803-020						
Величина фрикции f = 1:1,2						
Минимальный зазор между валками h_0 = 1 мм						
$n_в$ = 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
		ср. 9,32		ср. 12,09		ср. 635,9
$n_в$ = 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
		ср. 9,2		ср. 11,83		ср. 601,5
$n_в$ = 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
		ср. 9,15		ср. 12,91		ср. 648,6

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
$n_в$ = 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
		ср. 9,15		ср. 13,44		ср. 736,4
$n_в$ = 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
		ср. 9,17		ср. 12,69		ср. 631,5
$n_в$ = 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
		ср. 8,9		ср. 12,49		ср. 637
Величина фрикции f = 1:1,2 Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм Частота вращения переднего валка						
$n_в$ = 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
		ср. 9,05		ср. 13,05		ср. 657,8
$n_в$ = 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
		ср. 8,8		ср. 11,97		ср. 611,6

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
$n_в$ = 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
		ср. 9,15		ср. 13,29		ср. 660,2
$n_в$ = 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
		ср. 9,16		ср. 13,8		ср. 703,3
$n_в$ = 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
		ср. 8,94		ср. 13,34		ср. 659,3
$n_в$ = 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
		ср. 8,9		ср. 12,63		ср. 640,2
Величина фрикции f = 1:1,2 Минимальный зазор между валками h_0 = 2 мм $n_в$ = 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
		ср. 9,08		ср. 12,46		ср. 640,1

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
			$n_в$ = 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
		ср. 8,71		ср. 11,59		ср. 598,9
			$n_в$ = 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
		ср. 9,02		ср. 13,06		ср. 665,1
			$n_в$ = 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
		ср. 8,92		ср. 13,57		ср. 687,9
			$n_в$ = 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
		ср. 8,98		ср. 12,83		ср. 669
			$n_в$ = 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
		ср. 8,75		ср. 11,96		ср. 626,3

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм Величина фрикции f = 1:1 Частота вращения переднего валка $n_в$ = 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
		ср. 9,49		ср. 12,93		ср. 620,3
$n_в$ = 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
		ср. 9,23		ср. 12,5		ср. 603
$n_в$ = 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
		ср. 9,12		ср. 13,21		ср. 654,1
$n_в$ = 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
		ср. 9		ср. 13,4		ср. 665,1
$n_в$ = 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
		ср. 9,19		ср. 13		ср. 640,3

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
			$n_в$ = 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
		ср. 9		ср. 12,43		ср. 615,2
Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм Величина фрикции f = 1:1,36						
			$n_в$ = 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
		ср. 9,2		ср. 13,2		ср. 633,2
			$n_в$ = 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
		ср. 8,99		ср. 12,63		ср. 613,9
			$n_в$ = 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
		ср. 8,74		ср. 13,06		ср. 642,7
			$n_в$ = 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
		ср. 8,79		ср. 13,16		ср. 650,5

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	$P_т$, кГс	$\sigma_т$, МПа	$P_р$, кГс	$\sigma_р$, МПа	Δl, мм	ε, %
$n_в$ = 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
		ср. 8,66		ср. 12,66		ср. 626,4
$n_в$ = 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
		ср. 8,6		ср. 12,15		ср. 603

[*] Ширина рабочей части b = 3,5 мм; толщина рабочей части h = 2 мм; начальная база образца l_0 = 16 мм.

3.3. Определение производительности

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
Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм Величина фрикции f = 1:1,2 Частота вращения переднего валка $n_в$ = 5 об/мин							
1	10,4		1,49	6	10,5		1,50
2	10,6		1,51	7	10,4		1,49
3	10,2	7	1,46	8	10,4	7	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 $n_в$ = 10 об/мин							
1	9,7		2,43	6	9,5		2,38
2	9,5		2,38	7	9,4		2,35
3	9,7	4	2,43	8	9,5	4	2,38
4	9,3		2,33	9	9,8		2,45
5	9,4		2,35	10	9,7		2,43

Продолжение табл. 3.3

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
Среднее значение Q = 2,39							
$n_в$ = 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							
$n_в$ = 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							
$n_в$ = 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							
$n_в$ = 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							

3.4. Определение удельной мощности

Номер образца	Ток нагрузки двигателя $I_н$, А	Напряжение двигателя U, В	Мощность, расходуемая на процесс вальцевания N, Вт	Производительность Q, кг/ч	Удельная мощность q_N, кВт/кг
Минимальный зазор между валками h_0 = 1,5 мм Величина фрикции f = 1:1,2 Частота вращения переднего валка $n_в$ = 5 об/мин					
1	2,1	220	475,2	0,0900	5,28
2	2,2				
3	2,2				
4	2,1				
5	2,2				
$n_в$ = 10 об/мин					
1	2,5	220	563,2	0,1434	3,93
2	2,6				
3	2,5				
4	2,6				
5	2,6				
$n_в$ = 15 об/мин					
1	2,9	220	638	0,1920	3,32
2	2,9				
3	2,8				
4	3,0				
5	2,9				
$n_в$ = 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				
$n_в$ = 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				
$n_в$ = 30 об/мин					
1	3,6	220	792	0,3912	2,02
2	3,6				
3	3,6				
4	3,6				
5	3,6				

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сводная таблица экспериментов (к разделу 4)

Непрерывный процесс утилизации на валково-шнековом агрегате полиэтилена высокого давления марки 15803-020

4.1. Определение показателя текучести расплава

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

Время между отбором образцов τ = 60 с

Частота вращения шнека $n_ш$, об/мин	Частота вращения валков $n_в$, об/мин						
	5	7,5	10	12,5	15	17,5
28	1,46					
35	1,41	1,307				
42	1,48	1,326	1,4	1,6793	1,529	1,61
49	1,48	1,377	1,4058	1,69	1,532	1,61
56	1,47	1,414	1,42	1,73	1,554	1,59
63		1,443	1,456	1,77	1,513	1,58
70		1,529	1,425	1,82	1,49	1,575
77					1,479	1,62
84						1,6

4.2. Определение прочности при разрыве*

Частота вращения шнека $n_ш$, об/мин	Частота вращения валков $n_в$, об/мин					
	5	7,5	10	12,5	15	17,5
28	13,54					
35	14,82	14,5				
42	14,96	14,43	14,25	14,49	15,67	13,68
49	15,5	15,21	14,31	15,54	15,76	13,77
56	15,03	14,69	14,68	15,5	15,84	13,85
63		14,52	14,31	15,23	16,19	14,02
70		14,49	14,15	15,16	15,26	14,03
77					15,19	14,37
84						14

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

4.3. Определение предела текучести при растяжении*

Частота вращения шнека $n_ш$, об/мин	Частота вращения валков $n_в$, об/мин					
	5	7,5	10	12,5	15	17,5
28	9,21					
35	9,27	9,42				
42	9,32	9,46	9,08	9,07	8,67	9,1
49	9,38	9,52	9,14	9,08	8,67	8,87
56	9,1	9,21	9,14	9,32	9,14	8,94
63		9,13	9,31	9,34	8,76	8,84
70		8,7	9,14	9,26	9,16	8,58
77					8,8	9,11
84						9,16

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

4.4. Определение относительного удлинения при разрыве

Частота вращения шнека $n_ш$, об/мин	Частота вращения валков $n_в$, об/мин					
	5	7,5	10	12,5	15	17,5
28	726					
35	725	720				
42	736	730	748,43	812	811	676
49	722,5	746	739	835	809	689
56	743,75	725	740	840	799	711
63		719	738	836,25	821	721
70		712	737	798,43	796	731,75
77					789	718,75
84						725

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

4.5. Определение удельной мощности

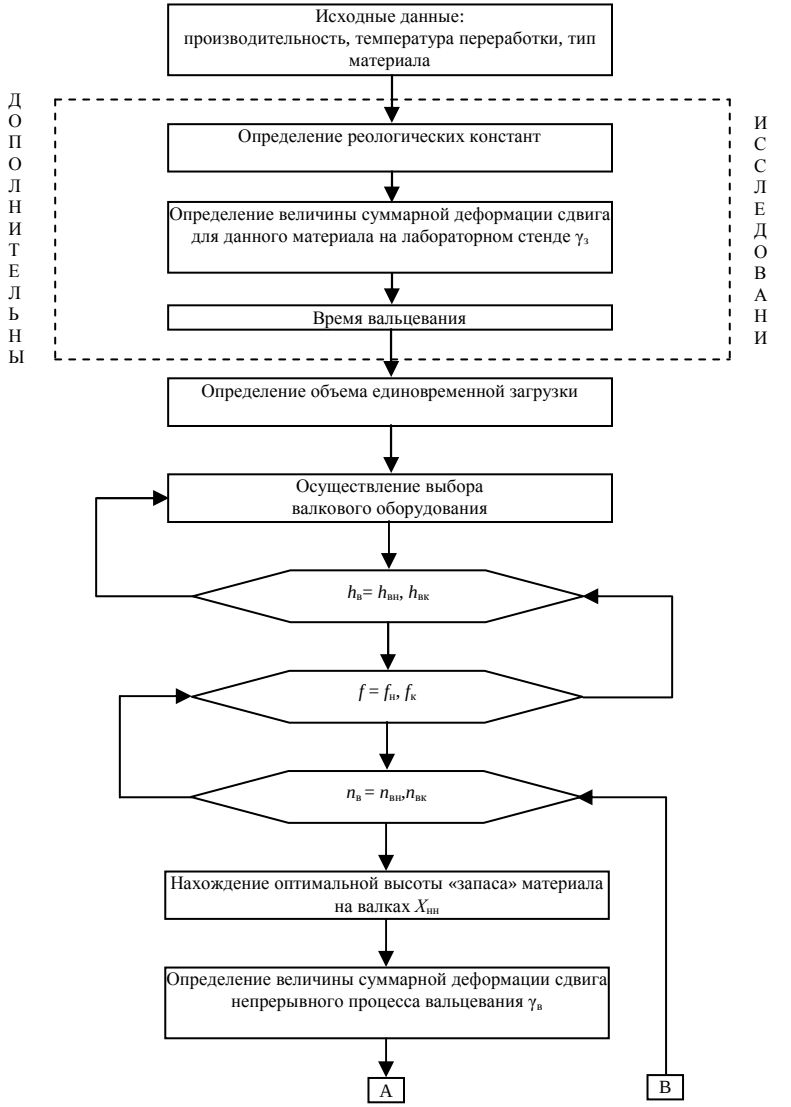
Частота вращения шнека $n_ш$, об/мин	Процесс экструзии			Процесс вальцевания			Суммарная мощность, расходуемая на процесс утилизации $N_с$, Вт	Производительность процесса Q, кг/ч	Удельная мощность q_N, кВт/кг
	Ток нагрузки $I_н$, А	Напряжение U, В	Мощность, расходуемая на процесс экструзии $N_э$, Вт	Ток нагрузки $I_н$, А	Напряжение U, В	Мощность, расходуемая на процесс вальцевания $N_в$, Вт			
Частота вращения переднего валка $n_в$ = 5 об/мин									
28	0,9	86	77,4	2,1	220	462	539,4	0,248	2,175
35		104	93,6				555,6	0,3072	1,80859375
42		121	108,9				570,9	0,3516	1,623720137
49		139	125,1				587,1	0,3688	1,59191974
56		159	143,1				605,1	0,3744	1,616185897
Частота вращения переднего валка $n_в$ = 7,5 об/мин									
35	0,9	106	95,4	2,3	220	506	601,4	0,3372	1,783511269
42		121	108,9				614,9	0,36	1,708055556
49		140	126				632	0,3964	1,594349142
56		158	142,2				648,2	0,4092	1,584066471
63		177	159,3				665,3	0,4212	1,579534663
70		195	175,5				681,5	0,4272	1,595271536
Частота вращения переднего валка $n_в$ = 10 об/мин									
42	0,9	120	108	2,5	220	550	658	0,378	1,740740741
49		139	125,1				675,1	0,4152	1,625963391
56		157	141,3				691,3	0,477	1,449266247
63		177	159,3				709,3	0,4944	1,434668285
70		195	175,5				725,5	0,5256	1,380327245

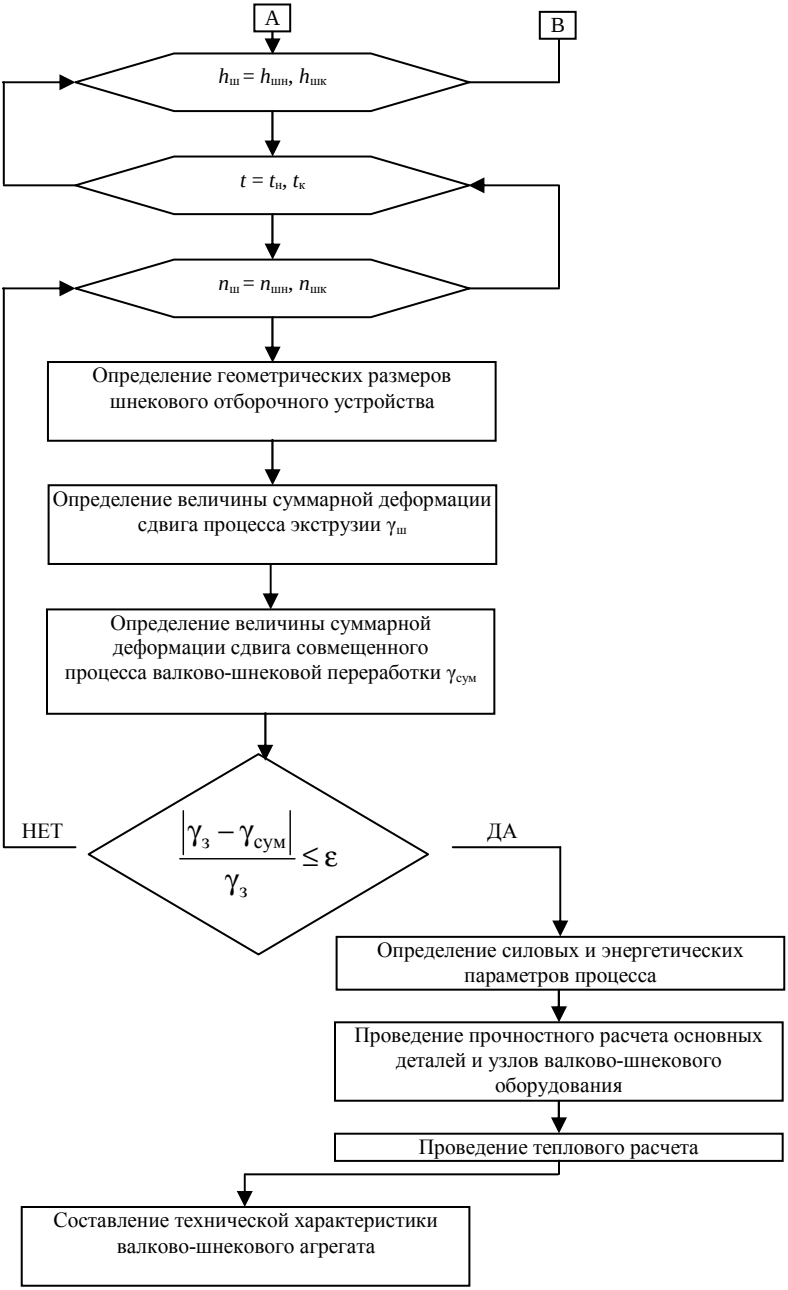
Продолжение табл. 4.5

Частота вращения шнека $n_ш$, об/мин	Процесс экструзии			Процесс вальцевания			Суммарная мощность, расходуемая на процесс утилизации $N_с$, Вт	Производительность процесса Q, кг/ч	Удельная мощность q_N, кВт/кг
	Ток нагрузки $I_н$, А	Напряжение U, В	Мощность, расходуемая на процесс экструзии $N_э$, Вт	Ток нагрузки $I_н$, А	Напряжение U, В	Мощность, расходуемая на процесс вальцевания $N_в$, Вт			
Частота вращения переднего валка $n_в$ = 12,5 об/мин									
42	0,9	120	108	2,7	220	594	702	0,4186	1,677018634
49		139	125,1				719,1	0,4952	1,452140549
56		159	143,1				737,1	0,537	1,372625698
63		177	159,3				753,3	0,6023	1,250705628
70		195	175,5				769,5	0,622	1,237138264
Частота вращения переднего валка $n_в$ = 15 об/мин									
42	0,9	120	108	2,9	220	638	746	0,5784	1,289764869
49		141	126,9				764,9	0,6294	1,215284398
56		160	144				782	0,6954	1,124532643
63		178	160,2				798,2	0,7326	1,08954409
70		195	175,5				813,5	0,7752	1,049406605
77		215	193,5				831,5	0,7969	1,043418246
Частота вращения переднего валка $n_в$ = 17,5 об/мин									
42	0,9	121	108,9	3	220	660	768,9	0,606	1,268811881
49		140	126				786	0,6682	1,176294523
56		160	144				804	0,7134	1,126997477
63		178	160,2				820,2	0,7632	1,074685535
70		197	177,3				837,3	0,7923	1,056796668
77		215	193,5				853,5	0,8194	1,041615816
84		239	215,1				875,1	0,8623	1,014844022

АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВОГО АГРЕГАТА

(Блок-схема)




A
B
$h_ш = h_{шн}, h_{шк}$
$t = t_н, t_к$
$n_ш = n_{шн}, n_{шк}$
Определение геометрических размеров шнекового отборочного устройства
Определение величины суммарной деформации сдвига процесса экструзии $\gamma_ш$
Определение величины суммарной деформации сдвига совмещенного процесса валково-шнековой переработки $\gamma_{сум}$
НЕТ
$\frac{|\gamma_з - \gamma_{сум}|}{\gamma_з} \le \varepsilon$
ДА
Определение силовых и энергетических параметров процесса
Проведение прочностного расчета основных деталей и узлов валково-шнекового оборудования
Проведение теплового расчета
Составление технической характеристики валково-шнекового агрегата

УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА ПРОИЗВОДСТВО 1КГ ПРОДУКЦИИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

№ п/п	Технология	Удельная мощность, кВт·ч/кг
1	Завод вторичной переработки полимеров «MINIMUM»	1,59
2	Завод по вторичной переработке полимеров «MEDIUM»	1,09
3	Завод по вторичной переработке полимеров «MAXIMUM»	1,104
4	Линии грануляции SM-75WPR	1,196
5	Переработка валково-шнековым методом (Диаметр валков 80 мм; Диаметр шнека 32 мм)	1,014
6	Проектное решение для промышленного варианта валково-шнекового агрегата (Диаметр валков 660 мм; Диаметр шнека 90 мм)	0,93

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

КЛИНКОВ Алексей Степанович,
БЕЛЯЕВ Павел Серафимович,
ПОЛУШКИН Дмитрий Леонидович

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВОГО АГРЕГАТА И СОВМЕЩЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ

Редактор *И.В. Калистратова*
Инженер по компьютерному макетированию *М.А. Филатова*

Сдано в набор 02.10.2012 г.
Подписано в печать 02.11.2012 г.
Формат 60 × 84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 9,5.
Тираж 400 экз. Заказ № 559

ООО «Издательский дом «Спектр»,
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
Http://www.idspektr.ru. E-mail: idspektr@rambler.ru

Подготовлено к печати и отпечатано
в Издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(475-2)63-81-08
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru