

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

**А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.Г. Однолько**

**РАСЧЁТ СМЕСИТЕЛЬНОГО И  
ВАЛКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ  
УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ**

*Утверждено Учёным советом университета  
в качестве учебного пособия  
для аспирантов, магистрантов и студентов вузов,  
обучающихся по специальностям и направлениям  
151900.68, 261201, 240801, 261700*



---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
2013

УДК 621.929.3  
ББК Л710.514  
К493

Рецензенты:

Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Гидравлика и теплотехника» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*Н.П. Жуков*

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
заместитель директора ОАО «НИИРТмаш»  
*В.Н. Шашков*

**Клишков, А.С.**

К493      Расчёт смесительного и валкового оборудования для утилизации отходов термопластов : учебное пособие / А.С. Клишков, М.В. Соколов, В.Г. Однолько. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1185-5.

Рассмотрены основные технологические и конструктивные аспекты расчёта смесительного и валкового оборудования для получения композитов из отходов термопластов. Особое внимание уделено вопросам моделирования процесса смешения в рабочих зазорах зон деформации перерабатываемого материала в смесителе и межвалковом зазоре. Приведена инженерная методика расчёта режимных и конструктивных параметров смесителей периодического действия типа роторных и специального валкового оборудования при обеспечении заданного качества получаемых композиционных термопластичных материалов.

Предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией смесительного и валкового оборудования по переработке полимерных материалов, а также аспирантов, магистрантов и студентов вузов старших курсов, обучающихся по специальностям и направлениям 151900.68, 261201, 240801, 261700, специализирующихся в области переработки пластмасс и эластомеров.

УДК 621.929.3  
ББК Л710.514

**ISBN 978-5-8265-1185-5**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2013

## ВВЕДЕНИЕ

---

В наши дни полимерные материалы широко распространены и находят своё применение практически во всех отраслях промышленности любой страны. Соответственно объёмам потребления полимеров образуется значительное количество их отходов, создающих серьёзную опасность для окружающей среды и человека. Повторная переработка решает проблемы охраны окружающей среды и восполнения дефицита первичного полимерного сырья.

Самыми потребляемыми и востребованными полимерами являются полиолефины. Соответственно, на производство пластиков этой группы уходит большая часть сырья, и они наносят самый большой урон экологии окружающей среды.

Стандартные технологии вторичной переработки не позволяют получить качественное вторсырьё. Решением проблемы создания качественных полимерных материалов и изделий из вторичных полиолефинов является его модификация, цель которой – экранирование функциональных групп и активных центров химическими или физико-химическими способами и создание однородного по структуре материала с воспроизводимыми свойствами [1].

Современные тенденции модификации полимерных материалов сводятся к введению малого количества мелкодисперсной фазы модифицирующей добавки. Для успешного протекания таких процессов наполнитель необходимо активировать, т.е. раскрыть его функциональные группы. Существуют следующие способы совмещения полимера с наполнителем: механохимическая активация наполнителей, полимеризационное наполнение, химическое аппретирование (аппретами обрабатывают наполнитель, очень трудоёмко и энергоёмко).

В настоящее время наиболее распространены полимеризационное наполнение и химическое аппретирование, но они требуют больших труд- и энергозатрат и в случае модификации вторичного сырья являются невозможными. Поэтому наиболее приемлемой является механохимическая активация.

Традиционным способом механохимической активации является механическое смешение расплава или раствора полимера с дисперсными наполнителями на специальном оборудовании [2]. Однако получение наполненного полимерного композиционного материала с хорошими механическими свойствами прямым смешением полимера с наполнителем затруднено из-за неравномерного распределения малых количеств наполнителя в большом объёме высоковязкого полимера, что делает данную задачу ещё более актуальной.

Учебное пособие посвящено расчёту смесительного и валкового оборудования с использованием интегрального критерия качества, позволяющего прогнозировать показатели качества модифицированных отходов термопластичных полимерных материалов.

Приведены примеры процесса модификации вторичного полиэтилена высокого давления (ВПВД) техническим углеродом (ТУ) в смесительном оборудовании, а так же примеры расчёта интегрального критерия качества при переработке отходов термопластичных полимерных материалов ВПВД, ВПНД, ВПС, ВПП.

В данной работе рассматривалось оборудование и процесс модификации вторичного полимерного сырья техническим углеродом, а так же процесс вторичной переработки отходов полимерных материалов по непрерывной технологии на валково-шнековом агрегате с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров.

В соответствие с поставленной целью решены следующие задачи:

- разработка способа модификации вторичных полимеров;
- создание специального смесительного оборудования периодического действия для модификации отходов полимеров с изменением в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров;
- разработка методики расчёта и программного обеспечения для определения интегрального критерия качества – суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных режимных и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого композиционного материала;
- создание методики инженерного расчёта основных параметров процесса смешения и конструкции смесителя с учётом заданных показателей качества получаемого композита;
- разработка методики расчёта и программного обеспечения для расчёта суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных технологических и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого вторичного термопластичного материала, на которое получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ;
- определены оптимальные режимы переработки отходов термопластичных полимерных материалов на примере ВПВД, ВПНД, ВПС, ВПП, позволяющих получать изделия с высокими физико-механическими показателями;
- разработана методика инженерного расчёта параметров процесса переработки отходов термопластов, позволяющая проектировать валково-шнековый агрегат или модернизировать стандартные промышленные вальцы.

# **1. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ И СМЕСИТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ТИПА БРАБЕНДЕР**

---

## **1.1. ПРОЦЕСС МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ**

В соответствии с поставленной целью и задачами научного исследования было подобрано оборудование и разработан процесс модификации полимерных отходов дисперсным углеродным наполнителем.

Технологический процесс осуществляется следующим образом: промытые и высушенные отходы с содержанием посторонних примесей не более 5% подвергаются сортировке, в процессе которой из них удаляют случайные инородные и металлические включения и выбраковывают сильно загрязнённые куски.

Делаются навески полимера и наполнителя в соответствии с выбранным технологическим режимом. Камера смесителя нагревается до температуры, необходимой для осуществления выбранного технологического режима.

Подготовленные отходы и наполнитель загружаются в рабочую камеру смесителя одновременно, где вращающиеся на малых оборотах рабочие органы под действием сдвиговых напряжений и сил адгезии затягивают их. Далее закрывают загрузочное отверстие затвором и выводят частоту вращения рабочих органов до значения, соответствующего выбранному технологическому режиму.

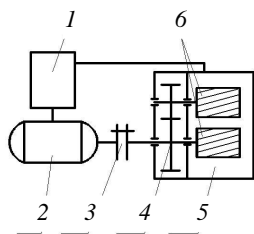
Смешение происходит в течение времени, заданного выбранным технологическим режимом. После остановки рабочих органов производится выгрузка полученной смеси.

## **1.2. ОПИСАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ ТИПА БРАБЕНДЕР**

Экспериментальная установка на основе смесителя Брабендера для реализации процесса введения малого количества активированного технического углерода в расплав полимера позволяет изменять в широком диапазоне режимные и конструктивные параметры (табл. 1.1).

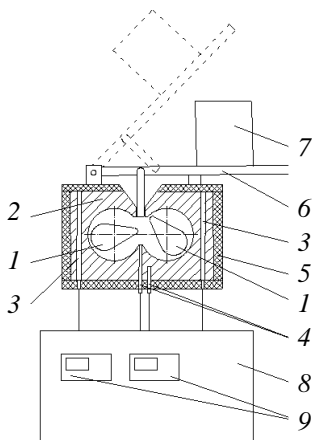
### **1.2.1. Описание и характеристики смесителя**

Смеситель (рис. 1.1) состоит из камеры смесительной 5, загрузочного устройства, станины с приводом 2, 3, 4 и электрооборудования 1. Смешение компонентов производится в камере, состоящей из собственно камеры смешения и сварного корпуса, на котором она закреплена двумя спе-



**Рис. 1.1. Схема смесителя Брабендера:**

- 1 – шкаф управления;
- 2 – электродвигатель;
- 3 – муфта;
- 4 – фрикционные шестерни;
- 5 – смесительная камера;
- 6 – смесительные органы



**Рис. 1.2. Схема камеры смесителя:**

- 1 – роторы; 2 – смесительная камера; 3 – трубчатые электронагреватели;
- 4 – термопары; 5 – пластины теплоизолятора; 6 – рычаг;
- 7 – груз; 8 – щит управления;
- 9 – приборы для измерения и задания температуры

циальными гайками. Смесительными органами являются два ротора 6 специального профиля, установленные в корпусе камеры консольно и вращающиеся в противоположные стороны. Опорами ротора являются передний подшипник скольжения и два задних подшипника качения. Вращение роторов производит мотор-редуктор 2, связанный муфтой 3 с валом приводного ротора; второй ротор получает вращение от приводного через зубчатую передачу 4 с передаточным отношением 1,5.

Камера обогревается шестью трубчатыми электронагревателями 3 (рис. 1.2), установленными снизу в вертикальные каналы камеры. Измерение температуры осуществляют два термосопротивления ТСП 4: одно контролирует температуру смеси, другое – температуру корпуса камеры. Задание и поддержание температуры осуществляется от термосопротивления, измеряющего температуру корпуса камеры. Сигналы от этих датчиков поступают на измеритель-регулятор 2ТРМ10-Щ1.У.Р.Р., который позволяет задавать и поддерживать в заданных пределах температуру камеры. Температура камеры измеряется прибором ТРМ1 9. На верхней плоскости камеры имеется отверстие 0,8 мм для установки при необходимости ртутного термометра. Для уменьшения теплоотдачи в окружающее пространство камера обложена пластинами фторопласта и стеклотекстолита 5.

Смесительная камера и мотор-редуктор закреплены на раме. Муфта закрыта кожухом. Приборы управления микросмесителем 9 размещены на щите управления 8.

Для предотвращения выдавливания смешиваемых компонентов из камеры наружу служит загрузочное устройство, состоящее из рычага 6, оснащённого аркой, внедряющейся в загрузочное отверстие камеры под действием груза 7.

Щит управления 1 (рис. 1.2) предназначен для управления электроприводом микросмесителя, а также нагревом и поддержанием температуры в рабочей зоне.

Скорость вращения регулируется поворотной ручкой потенциометра.

Не допускается длительная работа смесителя при показаниях вольтметра больше 2 В из-за нагрева редуктора выше допустимого предела.

Не рекомендуется длительная работа на пониженной скорости из-за ухудшения условий охлаждения электродвигателя.

### 1.1. Технические характеристики смесителя

Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
1. Свободный объём камеры, см <sup>3</sup>	200...20	
2. Тип ротора	двухлопастной	
3. Номинальная частота вращения роторов, об/мин на быстроходном валу	30...100	
4. Регулирование скорости	бесступенчатое	
5. Фрикция	1:1,5	
6. Обогрев камеры	электрический	
7. Температура нагрева камеры, max, °С	200	
8. Мощность, кВт: электродвигателя привода нагревателей	1,1 0,8	
9. Ток питающей электросети переменный однофазный с глухозаземлённой нейтралью: напряжение, В частота, Гц	220 ± 2 50 ± 1	
10. Габаритные размеры смесителя, мм, не более: длина ширина высота	480 550 450	
11. Габаритные размеры щита управления, мм, не более: длина ширина высота	210 400 600	
12. Масса смесителя, кг, не более	80	
13. Масса щита управления, кг, не более	20	

Преобразователь частоты программируется по приложенной инструкции. В процессе работы на выносном цифровом терминале отображается текущая величина нагрузки двигателя.

### 1.2.2. Принцип работы смесителя

Смесь загружается в загрузочную воронку камеры при вращающихся роторах и поддавливается загрузочным устройством. Смесительные роторы вращаются в корпусе камеры в противоположных направлениях с различной частотой, при этом ведущий ротор вращается с большей частотой, чем ведомый. В результате этого направление сил, действующих на находящуюся между роторами смесь, постоянно меняется, способствуя интенсивному перемешиванию.

В соответствии с технологическим регламентом устанавливается температура нагрева камеры и скорость вращения роторов.

При работе смесителя температура камеры может превысить установленную за счёт разогрева смешиваемого материала.

Во избежание перегрева смеси рекомендуется вводить поправку на величину предварительного нагрева камеры. Температура стенок камеры и смеси могут отличаться.

После окончания цикла смешения необходимо снять загрузочное устройство, отвернуть рукоятки крепления, снять камеру и выгрузить смесь.

### 1.2.3. Разработанные рабочие органы различной конфигурации

С целью интенсификации процесса диспергирования и изучения влияния различных конструктивных параметров на качество получаемого материала разработаны рабочие органы с различной геометрией фигурной части (рис. 1.3, 1.6): овальные, гладкие, рифлёные, винтовые многозаходные. Минимальный зазор при использовании гладких, рифлёных или винтовых многозаходных рабочих органов составляет  $h_0 = 0,15$  мм, что обеспечивает высокую сдвиговую деформацию.

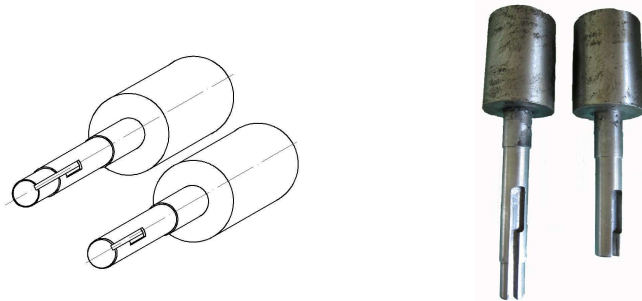
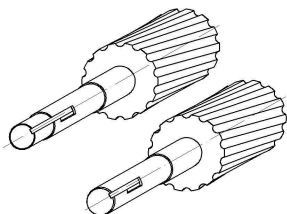
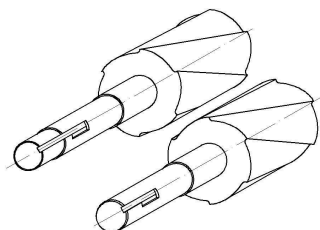


Рис. 1.3. Гладкие рабочие органы





**Рис. 1.4. Рифлёные рабочие органы**

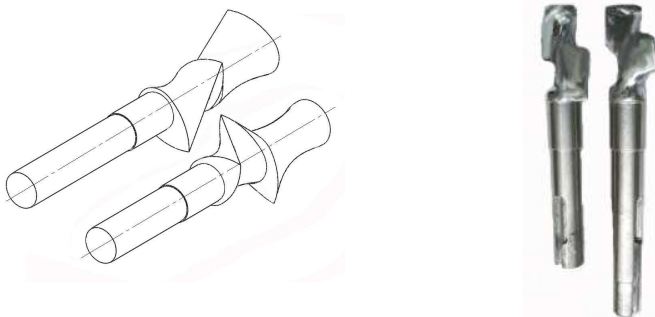


**Рис. 1.5. Винтовые многозаходные рабочие органы**

Конфигурация гладких рабочих органов (рис. 1.3) позволяет достичь максимальной деформации сдвига за короткий промежуток времени благодаря тому, что зона с минимальным зазором составляет 70% общей траектории, которую проходит материал за один оборот ротора. Но данная конфигурация фигурной части ротора не обеспечивает продольного перемещения материала вдоль оси ротора, что сказывается на неравномерности распределения вводимого наполнителя.

Для обеспечения продольного перемещения материала разработаны рабочие органы с наклонной нарезкой: рифлёные (рис. 1.4) и винтовые многозаходные (рис. 1.5). Нарезка на всех роторах сделана в одну сторону, чтобы при вращении их навстречу друг другу материал на одном роторе двигался вдоль оси вращения в одном направлении, а на втором роторе – в противоположном. При этом происходит сталкивание потоков, что интенсифицирует процесс смешения и диспергирования.

Геометрия фигурной части рифлёных рабочих органов (рис. 1.4) представляет собой чередование канала прямоугольного сечения и гребня. Данная конфигурация, являясь частным случаем многозаходных червяков экструзионных машин, позволяет исследовать некоторые аспекты часто встречающегося в полимерной промышленности процесса экструзии, а также интенсифицировать процесс диспергирования за счёт многозаходности.



**Рис. 1.6. Овальные рабочие органы**

Конфигурация винтовых многозаходных рабочих органов (рис. 1.5) представляет собой чередование серповидных зазоров. В однозаходном виде такая геометрия описывается теорией плоского слабосходящегося установившегося течения псевдопластичной жидкости. С подобной формой движения жидкости приходится иметь дело довольно-таки часто: зазор между гребнем лопасти смесителя и его стенкой, течение материала в канале червяка с коническим сердечником и т.д. Многозаходность данной конфигурации и малый минимальный зазор способствуют интенсификации процесса диспергирования вводимого наполнителя.

Геометрия фигурной части овальных рабочих органов (рис. 1.6) представляет собой наиболее распространённую в полимерной промышленности конфигурацию двухлопастных роторов, что позволяет исследовать процесс смешения и диспергирования на оборудовании наиболее приближённом к промышленному.

### **1.3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве объекта исследования принят периодический процесс модификации техническим углеродом марки К-354 отходов ПВД производственного и общественного потребления, а также первичного полиэтилена высокого давления марки 15803-020 на ЭУ. Отходы ПВД производственного и общественного потребления выбраны в качестве объекта исследования в связи с тем, что они составляют 38% от всего объёма отходов термопластов.

Свойства первичного ПВД (марка 15803-020, натуральный, сорт – высший) представлены в табл. 1.2, а вторичного – в табл. 1.3.

Технический углерод марки К-354 – каналный, активный, получаемый в диффузионном пламени при термоокислительном разложении природного или попутного газа, с высоким показателем дисперсности и низким показателем структурности. Его свойства представлены в табл. 1.4.

## 1.2. Свойства первичного ПВД (марка 15803-020)

Наименование показателя	Значение
1. Размер гранул, мм	от 2 до 5
2. Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,919 ± 0,01
3. Показатель текучести расплава с доп. в %, $I$ , г/10 мин	1,8 ± 6
4. Предел текучести при растяжении $\sigma_T$ , Па (кГс/см <sup>2</sup> )	93·10 <sup>5</sup> (95)
5. Прочность при разрыве $\sigma_p$ , Па (кГс/см <sup>2</sup> )	115·10 <sup>5</sup> (115)
6. Относительное удлинение при разрыве $\epsilon$ , %	780,5
7. Реологические свойства при температуре переработки ( $t = 130$ °С): индекс течения, $n$ коэффициент консистентности $K$ , МПа·с	0,2 0,2
8. Молекулярная масса, $M$	18 500

## 1.3. Требования предъявляемые к перерабатываемым отходам полимерной тары и упаковки

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

**1.4. Свойства технического углерода марки К-354  
в соответствии с ГОСТ 7885–86**

Наименование показателя	Норма для марки
1. Удельная геометрическая поверхность, м <sup>2</sup> /г	90...100
2. Удельная условная поверхность, м <sup>2</sup> /г	–
3. Удельная внешняя поверхность, м <sup>2</sup> /г	–
4. Йодное число, г/кг	–
5. Удельная адсорбционная поверхность, м <sup>2</sup> /г	не более 150
6. Адсорбционная дибутилфталата, см <sup>2</sup> /100 г	–
7. рН водной суспензии	3,7...4,5
8. Массовая доля потерь при 105 °С, %, не более	1,5
9. Зольность, %, не более	0,05
10. Массовая доля остатка, %, не более, после просева через сито с сеткой:	
0045	0,08
05	0,0010
014	0,004
11. Массовая доля общей серы, %, не более	–
12. Сопротивление гранул истиранию, %	–
13. Массовая доля пыли в гранулированном углероде, %, не более	–
14. Насыпная плотность гранулированного углерода, кг/м <sup>3</sup> , в пределах, не менее	–
15. Светопропускание толуольного экстракта, %, не менее	–
16. Прочность отдельных гранул, Н	–
17. Сопротивление гранул технического углерода разрушению на аппарате ГИТ-1, %	–
18. Массовая прочность гранул технического углерода, кг	–
19. Массовая доля пыли в гранулированном углероде на аппарате ГИТ-1, %, не более	–

## **2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЯ ТИПА БРАБЕНДЕР**

---

Установлено, что на качественные показатели получаемого модифицированного вторичного термопластичного материала (прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает суммарная величина сдвига, возникающая в рабочих зонах смесителя. Она зависит от различных конструктивных (геометрические размеры смесителя) и технологических (частота вращения рабочих органов смесителя, фрикция, температура внутри смесительной камеры) параметров процесса смешения.

Поставлена задача: определить комплексный интегральный критерий переработки материалов, характеризующий качественные показатели модифицированного вторичного термопластичного материала, величина которого может быть положена в основу при расчёте конструктивных и технологических параметров смесительных агрегатов.

Анализ литературных источников [3 – 6] показал, что в основу интегрального критерия качества может быть положена суммарная величина сдвига, возникающая в зазорах перерабатывающих машин.

### **2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ОВАЛЬНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

#### **2.1.1. Первый метод**

Рассмотрим кинематику движения материала в смесителе с овальными роторами, конструкции которых наиболее широко используются в промышленности переработки полимеров [4, 7]. В камеру смесителя в определённой последовательности загружают ряд компонентов. Роторы смесителя вращаются навстречу друг другу с различными угловыми скоростями. Процесс деформации и смешения компонентов осуществляется под действием соприкасающихся со смесью наружных поверхностей роторов, внутренней поверхности камеры, поверхности верхнего затвора.

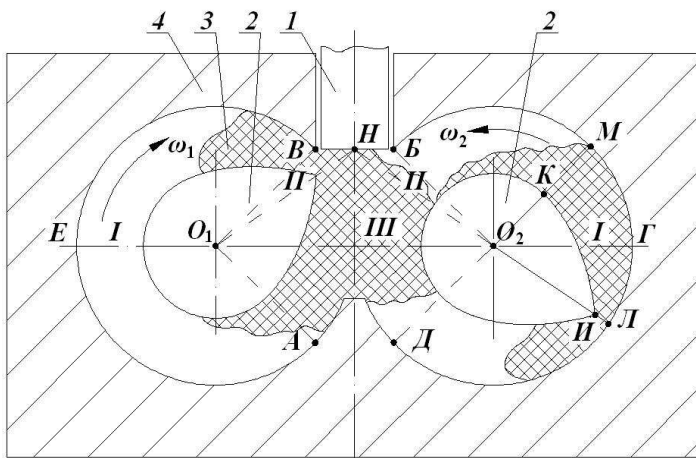
Различия в физических свойствах исходных компонентов, широкие вариации их количественного соотношения и порядка введения в камеру приводят к огромному числу возможных положений компонентов в рабочем пространстве машины. Это вызывает сложность аналитического определения энергосиловых параметров процесса, величины смесительного воздействия и т.д.

Увеличение поверхности раздела между компонентами происходит за счёт деформации сжатия, сдвига и растяжения в зазорах между роторами и стенкой камеры и в зазоре между роторами, причём в различных частях рабочей камеры смесителя интенсивность деформации смеси различна. В каждой части рабочего объёма, благодаря сложной конфигурации роторов, создаются различные градиенты скорости сдвига, а, следовательно, и различная интенсивность смешения.

По интенсивности сдвиговых деформаций рабочую камеру смесителя можно разбить на три зоны [2, 7]. Наиболее интенсивное воздействие роторов на материал, т.е. наибольшая величина сдвига, происходит в серповидных пространствах (рис. 2.1) – *МКИЛ* между поверхностью гребня ротора и стенкой камеры. Таким образом, наиболее интенсивный сдвиг осуществляется в объёмах *ВЕАО<sub>1</sub>* и *БМГЛДО<sub>2</sub>* – *I*.

В зонах деформации *ВО<sub>1</sub>Н* и *НО<sub>2</sub>Б* – *II* материал, увлекаемый вращающимися роторами, создаёт импульсное давление на крышку верхнего затвора, поднимая её толчками вверх. В зоне *III* – *НО<sub>1</sub>АДО<sub>2</sub>* перемещаемые роторами потоки смеси сталкиваются, и здесь происходит смешение потоков – вминание и вдавливание компонентов смеси в полимер. Далее смесь захватывается гребнями роторов и, ударяясь о выступ нижней части смесительной камеры, разделяется на два потока, и увлекается в серповидную зону деформации *I*.

Гребни каждого из овальных роторов выполнены в виде прерывистой спирали и представляют собой как бы две винтовые нарезки. В любом поперечном сечении ротора каждый гребень имеет форму сужающе-



**Рис. 2.1. Схема работы смесителя:**

*I* – верхний затвор, *2* – роторы, *3* – полимерная смесь, *4* – камера;  
*I, II, III* – зоны смешения

гося в одну сторону эллипса. Поверхность каждого из роторов выполняется в виде двух винтообразных лопастей, одна из которых (длинная) имеет угол подъёма винтовой линии  $30^\circ$  к образующей эллипса, а другая (короткая) –  $45^\circ$ . Угол закручивания каждой из лопастей  $90^\circ$ . Длина короткой лопасти составляет 0,35 рабочей длины ротора, а длинной – 0,65 рабочей длины. Благодаря такой конфигурации ротора, возникает осевое перемещение смеси.

Вследствие того, что длинный гребень одного ротора находится против короткого гребня другого ротора, наблюдается осевое перемещение смеси в виде пространственной восьмёрки, и в камере смесителя образуются линии тока компонентов, обеспечивающие получение высококачественного смешения. Как отмечалось выше, наибольшая величина сдвига создаётся в серповидных пространствах между поверхностью гребня ротора и стенкой камеры. Деформацию смеси в этих зонах можно рассматривать как деформацию сдвига в канале с переменным уклоном при большом различии в расстояниях между ограничивающими поверхностями на входе и выходе из канала.

При повороте ротора одновременно с деформацией сдвига в объёме смеси возникает давление, увеличивающееся к узкой части объёма. На некотором расстоянии от кромки гребня ротора возникает критическая точка с максимальным давлением. Под влиянием давления ниже критической точки ускоряется течение смеси в зазоре, и над критической точкой возникает противоток по отношению течения смеси в зазоре. Противоток направлен в сторону вращения лопасти и опережает скорость перемещения последней. Вследствие различной скорости течения смеси в объёме происходит неравномерное разрушение структуры. При нормальном зазоре незначительная часть смеси, расположенная у стенки камеры, проходит через зазор между стенкой камеры и гребнем ротора смесителя, основная же часть смеси под влиянием давления составляет противоток в средней части объёма, и первоначальное поле скоростей течения резко меняется.

Деформация сдвига в объёме смеси может происходить в том случае, если смесь заключена между относительно перемещаемыми ограничивающими поверхностями и при этом отсутствует скольжение. В пространстве между стенкой камеры и поверхностью лопасти смесь находится под давлением и плотно прилегает к металлическим поверхностям. Объём этой смеси выталкивается длинной лопастью в среднюю часть камеры, где она практически не подвергается деформациям сдвига.

В средней части смесительной камеры расстояния между вращающимися частями роторов большие и пространство не заполнено смесью. Длинные лопасти роторов в средней части камеры могут встречаться в зависимости от соотношения частот вращения роторов через 5 – 7 оборотов. Винтовые линии при встрече длинных лопастей пересекаются, образуя между собой угол  $60^\circ$ . Короткие лопасти в средней части камеры во-

обще не встречаются. Длинные и короткие лопасти встречаются лишь своими концами под углом  $75^\circ$ . Заполнение свободного объёма в средней части камеры в зависимости от положения лопастей роторов по ориентировочным подсчётам колеблется в пределах 30...70%, поэтому эффект смешения здесь крайне мал.

При разделении потоков смеси ребром нижней части камеры развивающаяся деформация также незначительна, так как лопасти основную массу смеси отталкивают от себя в полость противоположной полукамеры.

**Расчёт смесительного воздействия.** Строгий гидродинамический анализ процесса смешения полимерных материалов в роторных смесителях с учётом их неньютоновских свойств в настоящее время отсутствует. Рассмотрение кинематических особенностей процесса показывает, что наибольшему смесительному воздействию перерабатываемый материал подвергается в эффективном объёме между стенкой камеры и поверхностью гребня ротора.

В первом приближении смесительное воздействие может быть рассчитано на основании гидродинамической модели движения материала в сходящемся потоке [2, 8]. Примем допущения, являющиеся традиционными при решении подобных задач: процесс изотермический, ламинарный и установившийся, перерабатываемый материал несжимаем и изотропен, выполняется условие прилипания материала к поверхности роторов и стенкам камеры; осевое перемещение материала в камере смесителя не учитывается. Принципиальная схема деформации материала в эффективном объёме смесителя представлена на рис. 2.2.

Вследствие вынужденного движения отдельных элементов материала в эффективном объёме возникают деформации сдвига, растяжения и сжатия. Для анализа поля скоростей и напряжений, возникающих в эффективном объёме, пренебрегаем радиусами кривизны роторов и стенки

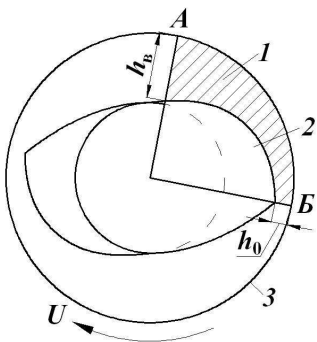


Рис. 2.2. Схема деформации материала в камере смесителя

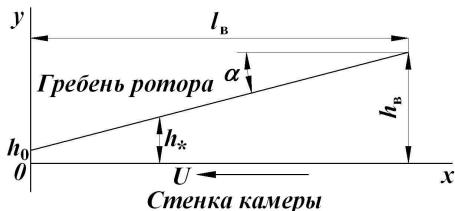


Рис. 2.3. Геометрическая схема деформации эффективного объёма материала



смесительной камеры. В результате геометрического построения развёртки гребней ротора относительно горизонтальной плоскости стенки камеры получим упрощённую модель деформации материала в эффективном объёме в системе наклонная плоскость–плоскость (рис. 2.3). С целью сохранения неподвижности системы координат относительно гребня ротора будем считать гребень неподвижным, а стенку камеры – движущейся со скоростью  $U$  (рассматривается обращённая задача). При этом ось абсциссов совмещаем с плоскостью стенки камеры смесителя. Считаем, что область между стенкой смесительной камеры и гребнем ротора заполнена материалом, реологическое поведение которого описывается степенным законом.

Известно [2, 5] что расход материала  $Q$  в системе наклонная плоскость–плоскость определяется значением высоты слоя смеси на входе  $h_b$  и индексом течения  $m$ :

$$Q = \frac{U h_b m}{2m + 1}. \quad (2.1)$$

Расход смеси через сечение  $h_*$ , отвечающее максимальному давлению, выражается уравнением

$$Q = \frac{U h_*}{2}. \quad (2.2)$$

Из зависимостей (2.1) и (2.2) определяется

$$h_* = \frac{2h_b m}{2m + 1}. \quad (2.3)$$

Подставляя значения  $h_*$  и эффективной вязкости  $\mu_{эфф} = \mu \gamma^{m-1}$  в известные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в системе наклонная плоскость–плоскость [2, 9], получены следующие уравнения для поля скоростей:

– обращённая задача

$$v_x = U \left( 1 - \frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2\mu_{эфф}} \frac{dp}{dx} (yh - y^2); \quad (2.4)$$

– реальная задача

$$v'_x = U - U \left( 1 - \frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2\mu_{эфф}} \frac{dp}{dx} (yh - y^2), \quad (2.5)$$

где

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12\mu_{эфф}}{h^3} U \left( \frac{h}{2} - \frac{h_b m}{2m + 1} \right). \quad (2.6)$$

Как следует из полученных данных, существуют две принципиально различные области течения: поступательное движение (в направлении движения ротора) и противоток. Неоднородное распределение скоростей течения материала связано с тем, что одновременно с деформацией сдвига в эффективном объёме возникает гидродинамическое давление, наибольшее значение которого находится на некотором удалении от минимального зазора  $h_0$ . В связи с поступательным движением материала и наличием градиента давления при деформации материала в эффективном объёме происходит течение слоёв материала с разной скоростью. При этом происходит вытягивание слоёв деформируемого материала в направлении течения.

С увеличением сечения эффективного объёма уменьшается противоток и наблюдается движение слоёв материала только в направлении движения ротора. Следует отметить, что слои материала, прилегающие к поверхности ротора, движутся со скоростью, равной скорости ротора. В некотором сечении эффективного объёма эпюра скоростей принимает треугольную форму, что свидетельствует о постоянной скорости сдвига. Сечение с треугольной эпюрой скоростей делит эффективный объём на две зоны, отличающиеся по интенсивности смещения и диспергирования. Для сечения входа  $h_b$  характерно ускорение потока материала на некотором удалении от поверхности ротора. С уменьшением индекса течения ускорение движения материала в сечении  $h_b$  возрастает. При этом слои материала, движущиеся со скоростью, превышающей скорость движения ротора, смещаются ближе к его поверхности. В случае ньютоновской жидкости наблюдается значительное возрастание объёма жидкости, участвующей в противотоке. В сечении  $h_b$  эпюра скоростей ньютоновской жидкости незначительно отличается от треугольной формы.

Таким образом, форма эпюры скоростей в эффективном объёме определяется реологическими свойствами деформируемого материала и эффективным объёмом.

Уравнение для определения скоростей сдвига может быть записано в виде

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{h} + \frac{1}{2\mu_{\text{эфф}}} \frac{dp}{dx} (h - 2y). \quad (2.7)$$

Подставляя выражение (2.6) в данное выражение, получим

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{h} \left( 1 + \frac{6}{h^2} \left( \frac{h}{2} - \frac{h_b m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right). \quad (2.8)$$

Для нахождения величины сдвига, который накладывается на материал за всё время процесса и приходится на единицу длины, необходимо формулу (2.8) проинтегрировать по  $h$  и  $y$  и умножить на время процесса  $t$ :

$$\gamma = t \int_{h_0}^{h_b} \int_0^h \frac{U}{h} \left( 1 + \frac{6}{h^2} \left( \frac{h}{2} - \frac{h_b m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) dy dh. \quad (2.9)$$

Данная формула не зависит от длины дуги захвата, в результате чего даёт неточное значение величины деформации сдвига. Чтобы получить необходимый результат, следует выразить  $h$  через длину проекции дуги захвата на стенку камеры  $l_B$ , и проинтегрировать по длине  $l$  (рис. 2.3):

$$h = h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B}. \quad (2.10)$$

Тогда, подставляя выражение (2.10) в выражение (2.8) и интегрируя полученную формулу по  $l$  и по  $y$ , получается выражение для нахождения величины сдвига  $\gamma$ :

$$\gamma = t \int_0^{l_B} \int_0^h \frac{U}{h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B}} \left( 1 + \frac{6}{\left( h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} \right)^2} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{1}{2} \left( h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} \right) - \frac{h_B m}{2m + 1} \right) \left( h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} - 2y \right) \right) dy dl. \quad (2.11)$$

Данная теория не учитывает действия продольной деформации. Чтобы учесть продольное воздействие, необходимо представить развёртку ротора относительно горизонтальной плоскости стенки камеры, для этого следует разорвать его боковую поверхность по линии, проходящей через точки А, В и Г и развернуть полученную поверхность так, чтобы боковая поверхность цилиндра радиусом  $R_{\min}$  полностью лежала на плоскости (рис. 2.4) [10].

В результате получена рельефная поверхность, показанная на рис. 2.5.

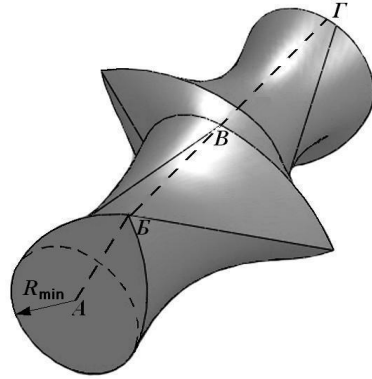


Рис. 2.4. Двухлопастной ротор

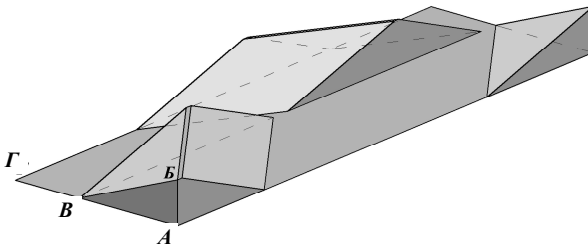
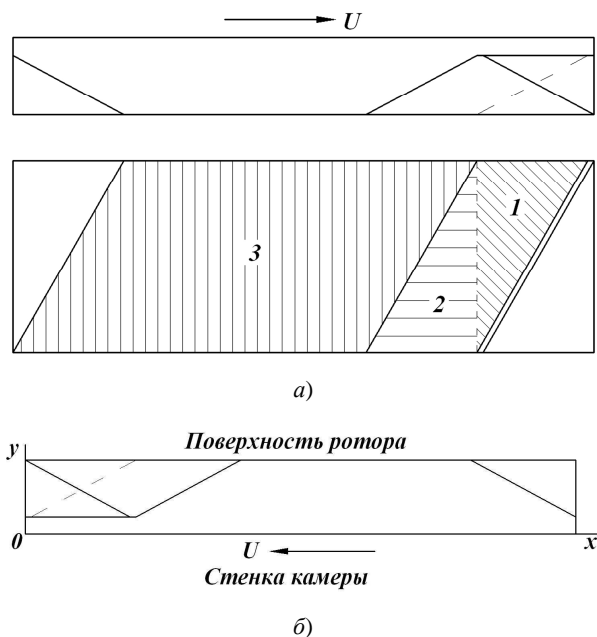


Рис. 2.5. Развёртка двухлопастного ротора

Так как на обеих лопастях ротора происходят идентичные процессы, то далее рассмотрели только одну лопасть. Представили развёртку лопасти не как изометрическое изображение, а как два вида, отображающие пространство, заключённое между поверхностью лопасти и поверхностью стенки камеры, которая после развёртывания будет представлять собой плоскость (рис. 2.6, а). С целью сохранения неподвижности системы координат относительно гребня ротора считали гребень неподвижным, а стенку камеры движущейся со скоростью  $U$  (рассматривали обращённой задачей), рис. 2.6, б).

Данную систему можно разбить на три зоны (рис. 2.6, а). В зоне 1 материал испытывает воздействие как в направлении вращения ротора, так и вдоль оси ротора, а профиль зоны в обоих случаях представляет собой развёртку серповидного зазора (рис. 2.3). В зоне 2 перерабатываемый материал испытывает воздействие только в направлении вращения ротора, профиль также представляет собой развёртку серповидного зазора. Воздействие на материал в зоне 3 описывается теорией изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коак-



**Рис. 2.6. Развёртка лопасти ротора:**  
 а – 2 вида (1, 2, 3 – зоны деформирования материала);  
 б – схема обращённой задачи

сиальными цилиндрами. В области, которая находится после гребня лопасти, воздействие является незначительным и им можно пренебречь.

Рассмотрим каждую зону в отдельности. Представим трёхмерное изображение первых двух зон, оно представляет собой шестигранник  $KLMNN'M'L'K'$  (рис. 2.7). Его грань  $LMM'L'$  лежит на плоскости развёртки стенки камеры и представляет собой параллелограмм, один из углов которого равен  $\alpha_z$  – углу наклона винтовой линии. Противоположная грань  $KNN'K'$  также представляет собой параллелограмм и является проекцией параллелограмма  $LMM'L'$  на плоскость развёртки поверхности гребня лопасти, которая находится под углом  $\alpha$  к плоскости развёртки стенки камеры. В результате такого построения шестигранник  $KLMNN'M'L'K'$  имеет ряд особенностей:

- две противоположные грани  $KLMN$  и  $N'M'L'K'$  параллельны друг другу и по форме представляют собой равные прямоугольные трапеции;
- две противоположные грани  $MNN'M'$  и  $KL'L'K'$  параллельны друг другу и по форме представляют собой прямоугольники.

Деление шестигранника  $KLMNN'M'L'K'$  на две зоны происходит плоскостью  $MNK'L'$ , перпендикулярной граням  $LM'M'L'$  и  $KNN'K'$  и проходящей через соответствующие диагонали данных параллелограммов  $MN$  и  $K'L'$ . Плоскость  $MNK'L'$  образует прямые углы с гранями шестигранника, представляющими собой прямоугольные трапеции.

*Зона 1.* В данном случае направление воздействия на материал перпендикулярно ребру гребня ротора, поэтому для удобства решения данной задачи её можно разделить на две более простые. В первой задаче стенка камеры будет двигаться вдоль оси  $x$  со скоростью  $U$ ; во второй – вдоль оси  $z$  (вдоль оси вращения ротора) в направлении, перпендикуляр-

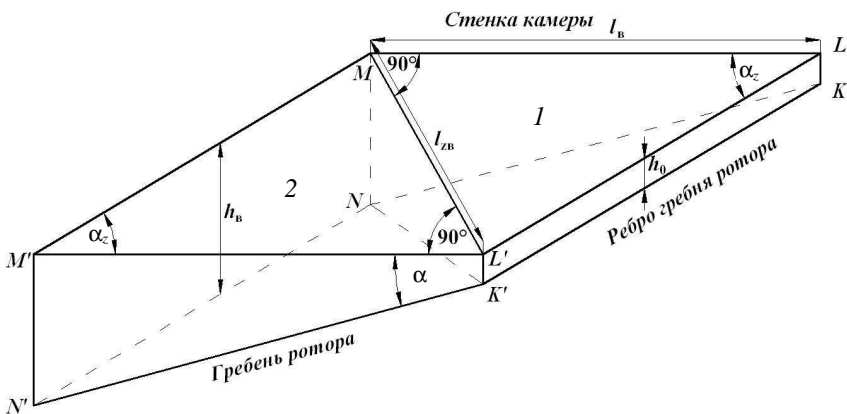
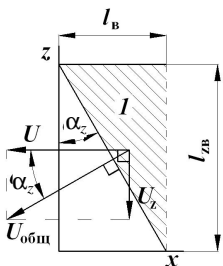


Рис. 2.7. Трёхмерное изображение 1 и 2 зоны совместно



**Рис. 2.8.** Геометрическая схема зоны  $I$

Каждая из предложенных задач представляет собой расчёт величины сдвига, описанный ранее. Только в данном случае необходимо учитывать не только изменение высоты  $h$  вдоль оси  $x$ , но также изменение длины  $l_B$  вдоль оси  $z$ , из чего следует, что необходимо провести интегрирование выражения (2.8) ещё и по  $l_z$ .

В результате для направления воздействия вдоль оси  $x$

$$\gamma = t \int_0^{l_{zB}} \int_0^{l_B} \int_0^h \left[ \frac{U}{h} \left( 1 + \frac{6}{h^2} \left( \frac{h}{2} - \frac{h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}}}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) \right] dy dl dl_z, \quad (2.13)$$

где  $h = h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} - \frac{l}{(l_{zB} - l_z) \operatorname{tg} \alpha_z} \left( h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} - h_0 \right)$ ;  $l_B = l_z \operatorname{tg} \alpha_z$ ;

$l_{zB}$  – длина лопасти;  $\alpha_z$  – угол наклона винтовой линии.

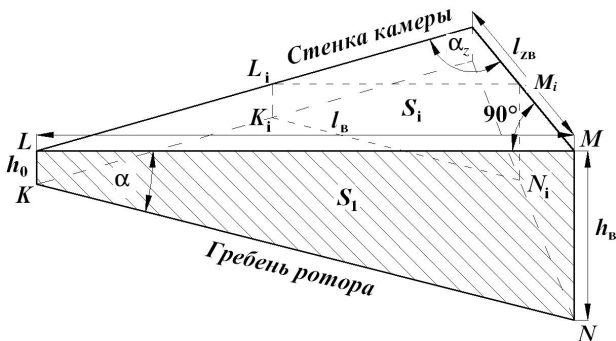
В случае движения стенки камеры вдоль оси  $z$  необходимо учитывать изменение высоты  $h$  вдоль оси  $z$ , изменение длины  $l_z$  вдоль оси  $x$ , из чего следует, что необходимо провести интегрирование выражения (2.8) по  $y$ ,  $l_z$  и  $l$ :

$$\gamma_z = t \int_0^{l_B} \int_0^{l_{zB}} \int_0^h \left[ \frac{U_z}{h_z} \left( 1 + \frac{6}{h_z^2} \left( \frac{h_z}{2} - \frac{h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} m}{2m+1} \right) (h_z - 2y) \right) \right] dy dl dl_z, \quad (2.14)$$

где  $h_z = h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} - \frac{l_z \operatorname{tg} \alpha_z \left( h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} - h_0 \right)}{l_B - l}$ ;  $l_{zB} = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha_z}$ .

Результирующая суммарная величина сдвига в данной зоне находится по формуле

$$\gamma_{\text{общ}} = \sqrt{\gamma^2 + \gamma_z^2}. \quad (2.15)$$



**Рис. 2.9. Геометрическое изображение эффективного объема первой зоны деформирования**

Чтобы получить среднее значение суммарной величины сдвига, приходящейся на единицу объема, необходимо полученное значение разделить на объем, занимаемый данной зоной. Фигура, объем которой необходимо найти, представляет собой пятигранник (рис. 2.9).

Как видно из рис. 2.9, одна из сторон пятигранника представляет собой прямоугольную трапецию  $KLMN$ , площадь которой легко определить:

$$S_1 = 0,5ML(KL + MN). \quad (2.16)$$

Для нахождения объема данной фигуры (рис. 2.9) следует проинтегрировать выражение (2.16) по  $l_{zB}$ , при этом учитываем, что большее основание трапеции и высота будут меняться, и выразить их через  $h_B$  и  $l_z$  соответственно. В результате получено выражение для нахождения объема фигуры, ограничивающей первую зону (рис. 2.9):

$$V_1 = \int_0^{l_{zB}} 0,5(l_{zB} - l_z) \operatorname{tg} \alpha_z \left( h_0 + h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} \right) dl_z. \quad (2.17)$$

Разделив выражение (2.15) на выражение (2.17), получим окончательную формулу для нахождения суммарной величины сдвига в данной зоне:

$$\gamma_1 = \frac{\sqrt{\gamma^2 + \gamma_z^2}}{V_1}. \quad (2.18)$$

**Зона 2.** В данном случае будет решаться только первая задача из предыдущих двух, так как материал в этой зоне не испытывает продольного воздействия, а подвергается деформированию только в направлении вращения. В результате выводов получено следующее выражение:

$$\gamma_g = t \int_0^{l_{gb}} \int_0^{l_b} \int_0^h \left[ \frac{U}{h} \left( 1 + \frac{6}{h^2} \left( \frac{h}{2} - \frac{h_b m}{2m+1} \right) (h-2y) \right) \right] dy dl dl_g, \quad (2.19)$$

где  $l_b = (l_{gb} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z$ ;  $h = h_b - \frac{l(h_b - h_0)}{l_b}$ .

Геометрическое отличие данной зоны состоит в том, что высота на входе будет постоянной ( $h_b = \text{const}$ ), а минимальный зазор  $h_0$  будет меняться от минимального значения до величины высоты на входе  $h_b$  (рис. 2.10).

Из рисунка видно, что одна из сторон пятигранника представляет собой прямоугольную трапецию  $K'L'M'N'$ , площадь которой вычисляется по формуле

$$S'_1 = 0,5 M'L'(K'L' + M'N''). \quad (2.20)$$

Интегрируя выражение (2.20) по  $l_{gb}$  для нахождения объёма фигуры (рис. 2.10), следует учитывать, что меньшее основание трапеции и высота будут меняться и выразить их через  $h_b$  и  $l_g$  соответственно. В результате получено выражение для нахождения объёма фигуры, ограничивающей вторую зону (рис. 2.10):

$$V_2 = \int_0^{l_{gb}} 0,5(l_{gb} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z \left( 2h_b - (l_{gb} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} \right) dl_g. \quad (2.21)$$

Разделив выражение (2.19) на выражение (2.21), получим окончательную формулу для нахождения суммарной деформации сдвига в данной зоне:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_g}{V_2}. \quad (2.22)$$

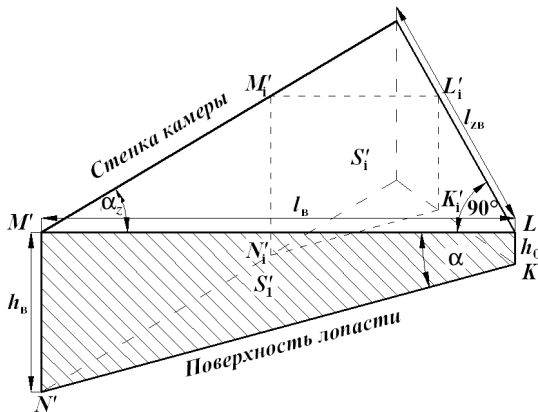


Рис. 2.10. Геометрическое изображение эффективного объёма второй зоны деформирования



Зона 3. Воздействие на материал в этой зоне описывается теорией изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. Данная теория описана в подпункте 2.2.2.

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал в данной зоне за время  $t$ , определяется следующим образом:

$$\gamma_3 = \frac{U}{R} \frac{2}{n \left( 1 - \beta^n \right)} t. \quad (2.23)$$

Суммарная величина сдвига на всей лопасти будет равна алгебраической сумме суммарных величин сдвига в трёх рассмотренных зонах:

$$\gamma_{L1} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3, \quad (2.24)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – суммарные величины сдвига в зонах лопасти 1, 2 и 3 соответственно.

Для второй лопасти ротора вычисления будут идентичными, изменится только длина лопасти  $l'_{zB}$ , угол наклона винтовой линии  $\alpha_z$ , в связи с чем изменится скорость движения по оси  $z$  и объёмы соответствующих зон  $V'_1$  и  $V'_2$ , а следовательно, и значения суммарных величин сдвига в первой  $\gamma_1$  и второй  $\gamma_2$  зонах. Суммарная величина сдвига на всей лопасти будет равна алгебраической сумме суммарных величин сдвига в трёх зонах:

$$\gamma'_{L1} = \gamma'_1 + \gamma'_2 + \gamma_3, \quad (2.25)$$

где  $\gamma'_1, \gamma'_2, \gamma_3$  – суммарные величины сдвига в зонах лопасти 1, 2 и 3 соответственно.

Чтобы найти суммарную величину сдвига, приходящуюся на всю длину ротора, необходимо учитывать относительный расход материала, приходящийся на каждую лопасть. Для этого следует ввести коэффициенты  $p = \frac{l_{zB}}{l_{ro}}$  и  $p' = \frac{l'_{zB}}{l_{ro}}$ , где  $l_{zB}$  – длина первой лопасти;  $l'_{zB}$  – длина второй лопасти;  $l_{ro}$  – длина фигурной части ротора. В результате получено выражение

$$\gamma_{p1} = p\gamma_{L1} + p'\gamma'_{L1}. \quad (2.26)$$

Таким образом, на втором роторе суммарная величина сдвига будет находиться таким же способом, как и на первом, изменится только величина скорости  $U_2 = fU$ , где  $f$  – фрикция. Формула для нахождения суммарной величины сдвига на втором роторе

$$\gamma_{p2} = p\gamma_{L2} + p'\gamma'_{L2}. \quad (2.27)$$

В итоге для нахождения суммарной величины сдвига, действующей на материал во время процесса смешения и диспергирования во всём объёме смесительной камеры, необходимо суммировать суммарные величины сдвига на каждом роторе, используя при этом коэффициент, учитывающий объёмный расход, приходящийся на каждый ротор, и перекрытие зон деформации:

$$\gamma_{\text{сум}} = q(\gamma_{p1} + \gamma_{p2}), \quad (2.28)$$

где  $q$  – коэффициент, учитывающий объёмный расход, приходящийся на каждый ротор, и перекрытие зон деформации.

Для данной методики расчёта суммарной величины сдвига в зонах деформации двухроторных смесителей с овальными рабочими органами написана программа на ЭВМ с использованием программного обеспечения Delphi 4 [11]. Задаваясь технологическими и конструктивными параметрами процесса смешения на данном типе оборудования, можно определить суммарную величину сдвига, возникающую в зонах деформации смесительного устройства [12 – 14].

### 2.1.2. Второй метод

Во втором методе за основу взята модель определения мощности привода смесителя через среднюю скорость сдвига, возникающую в материале между кромкой лопасти и стенкой камеры [5]:

$$N = k \dot{\gamma}^{n+1} V, \quad (2.29)$$

где  $V$  – объём перерабатываемой смеси,  $\text{см}^3$ ;  $\dot{\gamma}$  – средняя скорость сдвига,  $1/\text{с}$ ;  $n$  и  $k$  – реологические константы.

Также технологическую мощность для закрытого смесителя можно найти по геометрическим параметрам смесителя [2]. В виду сложной кинематики перемешиваемых масс в рабочем объёме двухроторных машин существующие теоретические методы анализа процесса ограничены косвенной оценкой смешения по энергетическим затратам на деформирование материала в зазоре между ротором и стенкой камеры. Используется гипотеза об изотермичности процесса и рассматривается плоское течение вязкой жидкости вдоль этого зазора.

Значение технологической мощности  $N$ , необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала, определяется формулой

$$N = 2k \left( \frac{\pi n_{\text{ср}}}{60} \right)^{n+1} \left\{ \left[ l_1 \left( 0,5^{n+1} + 0,865^{n+1} \right) + 2l_2 0,705^{n+1} \right] F + \left( \frac{D_{\text{гр}}}{h_0} \right)^{n+1} h_0 \delta (l_1 + l_2) \right\}, \quad (2.30)$$

где  $n_{cp}$  – средняя частота вращения заднего и переднего ротора, об/мин;  $l_1$  и  $l_2$  – длина длинного и короткого гребней ротора, см;  $D_{гр}$  – диаметр гребня ротора по кромке, см;  $F$  – коэффициент;  $h_0$  – зазор между кромкой гребня ротора и камерой, см;  $\delta$  – ширина кромки, см;  $n$  и  $k$  – реологические константы.

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{D_k}{h_i} - 2 \right)^{n+1} f_i, \quad (2.31)$$

где  $i$  – число элементов, на которые разбивается деформируемый объём или ширина зоны деформации материала, в зазоре между ротором и камерой;  $D_k$  – внутренний диаметр камеры смесителя, см;  $h_i$  – зазор между гребнем ротора и камерой для  $i$ -го элемента, см;  $f_i$  – площадь сечения  $i$ -го элемента, см<sup>2</sup>.

Выразив скорость сдвига из формулы (2.29), подставив в полученное выражение вместо мощности  $N$  формулу (2.30) и умножив на время процесса  $t$ , получим следующую зависимость для нахождения суммарной величины сдвига:

$$\gamma = t \left( \frac{\pi n_{cp}}{60} \right) \times \sqrt[n+1]{2 \left\{ [l_1 (0,5^{n+1} + 0,865^{n+1}) + 2l_2 \cdot 0,705^{n+1}] F + \left( \frac{D_{гр}}{h_0} \right)^{n+1} h_0 \delta (l_1 + l_2) \right\}} V}. \quad (2.32)$$

Для данного метода расчёта суммарной величины сдвига в зонах деформации двухроторного смесителя с овальными рабочими органами написана программа на ЭВМ с использованием программного обеспечения Delphi 4. Задаваясь технологическими и конструктивными параметрами процесса смешения на данном типе оборудования, можно определить суммарную величину сдвига, возникающую в зонах деформации смесительного устройства [12 – 14].

### **2.1.3. Сравнительный анализ двух методов определения суммарной величины сдвига в рабочих пространствах двухроторных смесителей с овальными рабочими органами**

На оба метода разработаны программы расчёта на ЭВМ [11]. По результатам работы программ построены графические зависимости и проведен сравнительный анализ. Оба метода показали сходимость при изменении соответствующих параметров. Выявлено, что расхождение между методами составляет не более 8% (рис. 2.11), и изменение в методах какого-либо одного параметра при прочих неизменных не влияет на это расхождение.

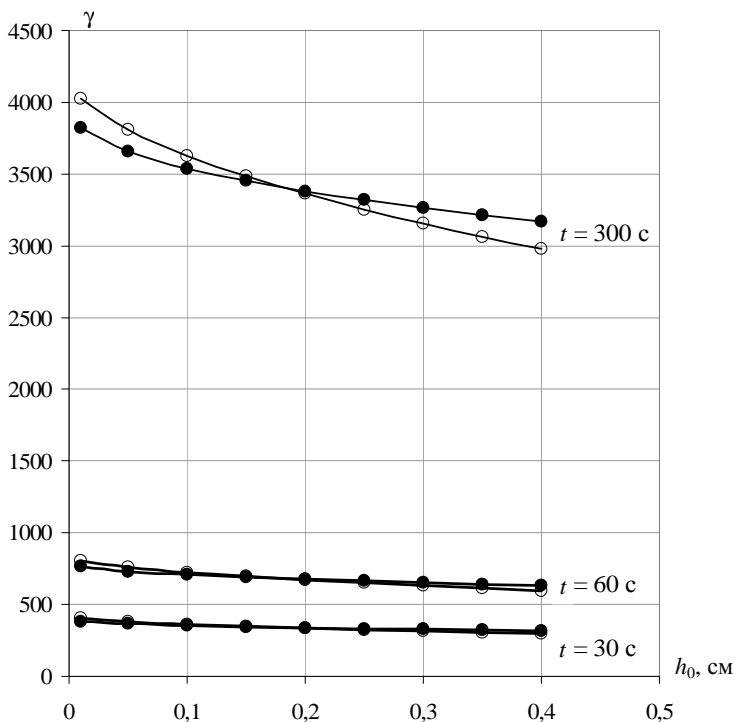


Рис. 2.11. Зависимость суммарной величины сдвига от минимального зазора за время  $t$ :

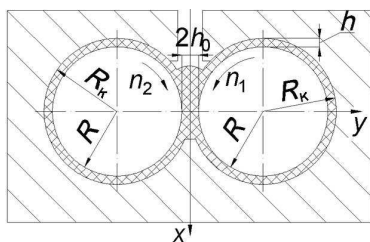
● 1 метод; ○ 2 метод

## 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ГЛАДКИМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

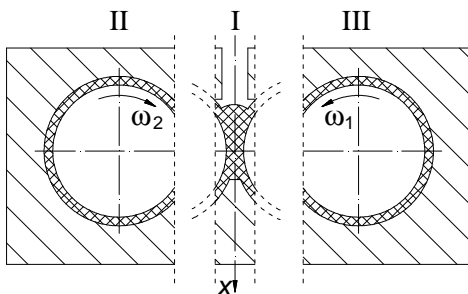
Суммарная величина сдвига для процесса смешения и модификации отходов термопластов на смесительном оборудовании (валковые рабочие органы) (рис. 2.12) может быть представлена как алгебраическая сумма суммарных величин сдвига для периодического процесса вальцевания (зона I рис. 2.13) и изотермического течения вязкой жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами (зоны II и III рис. 2.13) с учётом коэффициента перекрытия зон деформации [15]:

$$\gamma_{\text{сум}} = \gamma_{\text{в}} + k(\gamma_{\text{лц}} + \gamma_{\text{пц}}), \quad (2.33)$$

где  $\gamma_{\text{в}}$ ,  $\gamma_{\text{лц}}$ ,  $\gamma_{\text{пц}}$  – суммарная величина сдвига для периодического процесса вальцевания в зазорах между стенкой камеры и вращающимися левым и



**Рис. 2.12.** Общая схема процесса смешения  
(гладкие рабочие органы)



**Рис. 2.13.** Схема деформирования с использованием гладких рабочих органов  
(I, II, III – зоны деформирования материала)

правым валковыми рабочими органами, соответственно;  $k$  – коэффициент, учитывающий перекрытие зон деформации и расход материала в различных зонах.

Из нижеприведённых изложений следует, что суммарная величина сдвига для процесса смешения и модификации отходов термопластов на смесительном оборудовании (гладкие рабочие органы) может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{сум}} = & \frac{3}{4} \left[ (1 - X_k^2) (\arctg X_k - \arctg X_n) + \frac{(1 + X_k^2) X_n - X_k^2}{1 + X_n^2} \right] \times \\ & \times \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^2 (1 + X_k^2)} + \frac{\lambda}{4(1 + X_k^2)} \left( \frac{X_k}{1 + X_k^2} - \frac{X_n}{1 + X_n^2} + \arctg X_k - \arctg X_n \right) \times \\ & \times \frac{U_0 t (1 + X_k^2)}{(X_k - X_n) \sqrt{2Rh_0}} + 0,7 \frac{t \cdot 2(U_1 + U_2)}{Rn \left( 1 - \beta^n \right)}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

### 2.2.1. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\Sigma}$ при периодическом режиме процесса вальцевания термопластов

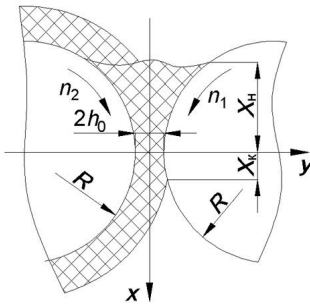


Рис. 2.14. Схема процесса вальцевания

Поэтому величина сдвига в пределах этой зоны определится выражением [2, 6]

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

$$= \left(\frac{R}{h_0}\right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \left\{ \frac{3\eta}{4} \left[ (1 - X_K^2)(\arctg X_K - \arctg X_H) + \frac{(1 + X_K^2)X_H - X_K}{1 + X_H^2} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{X_K}{1 + X_K^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \arctg X_K - \arctg X_H \right) \right\}, \quad (2.35)$$

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

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

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{-1}^{+1} \gamma d\eta}{Q \frac{x_K x_H}{U_0}}. \quad (2.36)$$

При этом

$$X_k^2 = \frac{Q}{2U_0 h_0} - 1. \quad (2.37)$$

Учитывая выражение (2.36),

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{-1}^{+1} \gamma d\eta}{2h_0(2h_0 R)^{1/2}(1+X_k^2)(X_k - X_H)}. \quad (2.38)$$

Определённый интеграл, входящий в уравнение (2.36):

$$\int_{-1}^{+1} \frac{\eta d\eta}{v_x} \approx \frac{1}{U_0} \frac{1-\lambda}{[1-\lambda^2(1+X_k^2)]}; \quad (2.39)$$

$$\int_{-1}^{+1} \frac{d\eta}{v_x} = \frac{1}{2U_0(1+X_k^2)}. \quad (2.40)$$

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

$$\bar{\gamma} = \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{3}{4} \left[ (1-X_k^2)(\text{arctg} X_k - \text{arctg} X_H) + \frac{(1+X_k^2)X_H}{1+X_H^2} - X_k^2 \right] \times \right. \\ & \left. \times \frac{1-\lambda}{1-\lambda^2(1+X_k^2)} + \frac{\lambda}{4(1+X_k^2)} \left( \frac{X_k}{1+X_k^2} - \frac{X_H}{1+X_H^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \text{arctg} X_k - \text{arctg} X_H \right) \right] \times \end{aligned} \right\} \times \frac{1}{[2\sqrt{2}h_0^2(1+X_k^2)(X_k - X_H)]}. \quad (2.41)$$

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

$$\gamma_n = \bar{\gamma} i(t), \quad (2.42)$$

где  $i(t) = \frac{U_0 t (1+X_k^2)}{(X_k - X_H) \sqrt{2Rh_0}}$  – число проходов;  $t$  – время процесса, с.

### 2.2.2. Определение суммарной величины сдвига в зазорах между стенкой смесительной камеры и цилиндрическими рабочими органами $\gamma_{\text{лц}}$ и $\gamma_{\text{шц}}$

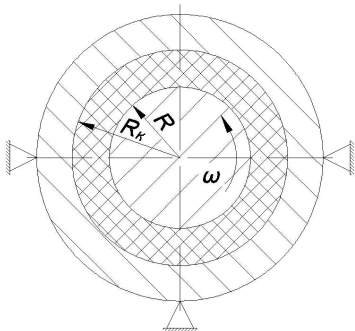


Рис. 2.15. Схема установившегося изотермического течения жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами

Оценка смесительного воздействия на полимерный материал в случае изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых наружный – неподвижен, а внутренний вращается с некоторой окружной скоростью (рис. 2.15), была рассмотрена в работах [4, 16]. Для левого и правого рабочих пространств формулы будут идентичными за исключением величин скоростей.

Величина скорости сдвига вычисляется по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{R} \frac{2}{n \left( 1 - \beta^{\frac{2}{n}} \right)}, \quad (2.43)$$

где  $U$  – окружная скорость внутреннего цилиндра;  $R$  – радиус внутреннего цилиндра;  $\beta = \frac{R_k}{R}$  – отношение радиуса внешнего цилиндра к радиусу внутреннего цилиндра;  $n$  – индекс течения расплава.

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за время  $t$ , определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{U}{R} \frac{2}{n \left( 1 - \beta^{\frac{2}{n}} \right)} t. \quad (2.44)$$

Для данной методики расчёта суммарной величины сдвига в зонах деформации двухроторного смесителя с валковыми рабочими органами написана программа на ЭВМ с использованием программного обеспечения Delphi 4 [17]. Задаваясь технологическими и конструктивными параметрами процесса смешения на данном типе оборудования, можно определить суммарную величину сдвига, возникающую в зонах деформации смесительного устройства [12 – 14, 18, 19].



### 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С РИФЛЁНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Для определения суммарной величины сдвига при использовании рифлёных рабочих органов (рис. 1.4) рассмотрим развёртку ротора (рис. 2.16). Она представляет собой повторяющееся чередование гребней и каналов одинаковой геометрии. Следовательно, развёртку можно разбить на две чередующиеся между собой зоны: в зоне I суммарная величина сдвига будет определяться как воздействие при экструзии, описанное в работах [5], а в зоне II – как течение жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами [16].

Суммарная величина сдвига для процесса смешения с использованием рифлёных рабочих органов равна алгебраической сумме суммарных величин в первой и второй зонах:

$$\gamma_p = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (2.45)$$

В зоне I суммарная величина сдвига определяется следующим образом: для нахождения суммарной величины сдвига, возникающей в канале червяка за время  $t$ , используют формулу

$$\gamma_{\text{ш}} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{zy}^2}, \quad (2.46)$$

где  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{zy}$  – суммарные величины сдвига, которым подвергается элемент объёма в направлении  $x$  и  $z$ , соответственно.

В отличие от экструзии рассматривается периодический процесс, представляющий систему с закрытым выходом и циркуляцией объёма от одного торца смесительной камеры до другого. В результате такого рассмотрения предполагается, что элемент объёма, пройдя всю длину канала на одном роторе за время  $t$ , перебрасывается в канал другого ротора и продолжает движение по этому каналу в течение времени  $t'$ .

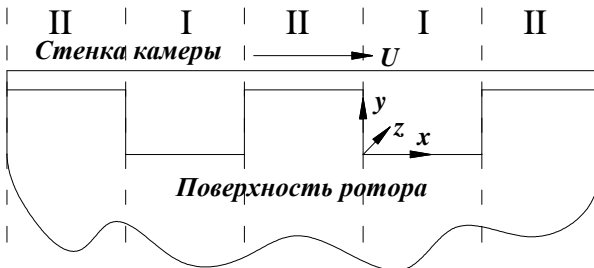


Рис. 2.16. Развёртка рифлёного ротора  
(I, II – зоны деформирования материала)

Время пребывания элемента потока в канале червяка определяется следующим образом [5]:

$$t = \frac{l_d}{\sin \phi v_z}, \quad (2.47)$$

где  $l_d$  – длина развёрнутого винтового канала;  $v_z$  – средняя скорость поступательного течения, зависящая от положения элемента потока.

Для второго ротора время пребывания элемента потока в канале находится идентичным образом.

Для периодического процесса время воздействия задаётся изначально, соответственно для нахождения суммарного воздействия необходимо учитывать временной расход на пребывание элемента потока в каналах двух роторов и при прохождении гребня. Для этого необходимо заданное время процесса  $t_3$  разделить на сумму времени пребывания элемента потока в канале первого ротора  $t$ , времени, затрачиваемого на переход через гребень первого ротора  $t_r$ , времени пребывания элемента потока в канале второго ротора  $t'$  и времени, затрачиваемого на переход через гребень второго ротора  $t'_r$ .

В итоге получим формулу для нахождения суммарной величины сдвига в первой зоне за всё время процесса:

$$\gamma_1 = \frac{t_3}{t + t_r + t' + t'_r} \gamma_{ш}. \quad (2.48)$$

Суммарная величина сдвига в зоне II находится по формуле (2.44).

Суммарная величина сдвига во всём деформируемом объёме находится по формуле (2.28).

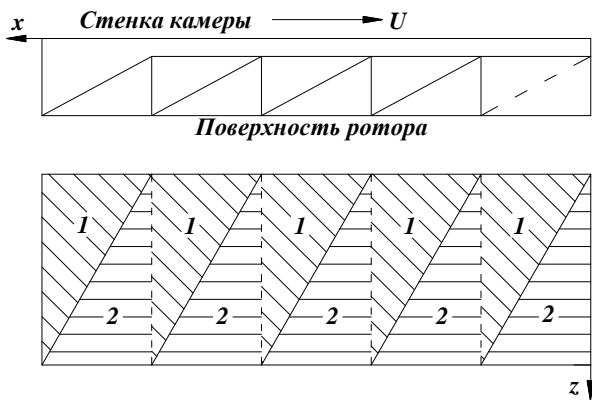
#### **2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{сум}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ВИНТОВЫМИ МНОГОЗАХОДНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

При нахождении суммарной величины сдвига для процесса смешения на смесителе с винтовыми многозаходными рабочими органами используется та же теория, что и для смесителя с овальными рабочими органами. В данном случае исключается зона 3 (рис. 2.6) и увеличивается число заходов (рис. 2.17).

Тогда формула для нахождения суммарной величины сдвига на всём роторе немного видоизменится:

$$\gamma_p = j(\gamma_1 + \gamma_2), \quad (2.49)$$

где  $j$  – количество заходов;  $\gamma_1, \gamma_2$ , – суммарные величины сдвига в зонах ротора 1 и 2 соответственно, которые находятся по формулам (2.18) и (2.22) соответственно.



**Рис. 2.17. Развёртка винтового многозаходного ротора**  
(1, 2 – зоны деформирования материала)

Суммарная величина сдвига во всём деформируемом объёме находится по формуле (2.28).

### 3. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА СМЕСИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

---

В качестве исходных параметров, необходимых для расчёта, принимаются:

1) реологические константы перерабатываемого материала: мера консистентности  $k$  и индекс течения  $n$ ;

2) плотность перерабатываемого материала  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>.

При расчёте основных параметров процесса модификации на смесительном оборудовании решаются два типа задач:

1) при заданных геометрических размерах смесителя необходимо определить производительность  $G$  процесса получения композиционного материала с наилучшими физико-механическими показателями;

2) при заданной производительности процесса  $G$  необходимо определить основные геометрические размеры смесителя (диаметр и длину роторов).

#### 3.1. РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ

Изначально дополнительно должны быть заданы: величина фрикции и геометрические размеры рабочих органов и камеры смесителя (диаметр рабочего органа, диаметр стенки камеры, длина рабочей части ротора, длины лопастей ротора, углы наклона винтовых линий, минимальный зазор между гребнем ротора и стенкой камеры).

Расчёт проводится в следующей последовательности:

1. Исследование на разработанном устройстве с целью определения суммарной величины сдвига, соответствующей наилучшим показателям по качеству для конкретного композиционного материала, в результате чего выбираются технологические параметры, необходимые для дальнейшего расчёта (время смешения, частота вращения рабочих органов) [19 – 34].

2. Определение производительности смесителя при непрерывном режиме работы –  $G$  по методике, изложенной в [35].

Производительность смесителя определяется по формуле

$$G = 60 \frac{V \varphi \rho \eta}{t}, \quad (3.1)$$

где  $V$  – свободный объём смесительной камеры, м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – коэффициент загрузки смесительной камеры ( $\varphi = 0,56 \dots 0,76$ );  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент использования машинного времени ( $\eta = 0,8 \dots 0,9$ );  $t$  – время смешения, мин.

3. Расчёт силовых и энергетических параметров процесса смешения (технологической мощности  $N_T$ , мощности привода смесителя  $N_D$ , удельной мощности  $N_{уд}$ ) по общепринятой методике, изложенной в [3].

Значение технологической мощности  $N_T$ , необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала, определяется по формулам (4.29):

$$N_T = k \dot{\gamma}^{n+1} V .$$

4. Расчёт на прочность основных деталей и узлов машины (рабочих органов, смесительной камеры и др.) по общепринятой методике.

5. Тепловой расчёт процесса смешения с учётом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов.

Вся энергия, потребляемая электродвигателем смесителя, за исключением потерь в приводе роторов, в конечном счёте, расходуется на деформирование смешиваемых компонентов и выделяется в виде теплоты в смесительной камере, где происходит диссипация механической энергии, переход её в тепловую. Тепловой баланс выражает равенство между количеством теплоты, подводимой к системе, и количеством теплоты, отводимой от неё. Для смесителя это равенство можно записать так:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 . \quad (3.2)$$

Здесь  $Q = AN_{cp}\eta$  – количество теплоты, выделяемой в камере смесителя;  $A$  – механический эквивалент тепловой энергии;  $N_{cp}$  – средняя потребляемая мощность электродвигателя привода роторов смесителя;  $\eta$  – КПД привода роторов;  $Q_1 = Gc_1(t_k - t_n)$  – количество теплоты, необходимой для нагрева смеси;  $G$  – производительность смесителя;  $c_1$  – удельная массовая теплоёмкость смеси;  $t_k$ ,  $t_n$  – конечная и начальная температура смеси;  $Q_2 = (\alpha_k + \alpha_n)F(t_{ст} - t_b)$  – количество теплоты, теряемой боковой поверхностью смесительной камеры в окружающую среду за счёт лучеиспускания и конвекции;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду за счёт конвекции;  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду за счёт лучеиспускания;  $F$  – поверхность боковых стенок смесительной камеры;  $t_{ст}$  – температура стенки;  $t_b$  – температура окружающего воздуха;  $Q_3 = Wc_2(t_2 - t_1) = KF\Delta t_{ст}$  – количество теплоты, уносимой охлаждающей водой;  $W$  – расход охлаждающей воды;  $c_2$  – удельная массовая теплоёмкость охлаждающей воды;  $t_2$ ,  $t_1$  – температура охлаждающей воды на входе в смеситель и на выходе из него, соответственно;  $K = 1 / \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$  – коэффициент теплопередачи;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от смеси к стенке камеры;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки камеры к охлаждающей воде;  $\delta$  – толщина стенки камеры;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, из которого сделана стенка камеры.

Для нахождения мощности, затрачиваемой на весь процесс  $N$ , следует сделать расчёт удельной мощности, приходящейся на килограмм продукта:

$$N_{\text{уд}} = \frac{N}{G}. \quad (3.3)$$

б. Составить техническую характеристику смесителя, в которую входят все заданные и рассчитанные параметры.

### Пример расчёта пластосмесителя СП-45

*Исходные данные для проектирования:*

Материал – вторичный полиэтилен высокого давления, плотность –  $\rho = 919 \text{ кг/м}^3$ ; реологические константы –  $m = 0,3$ ;  $k = 0,3311 \text{ кгс/см}^2$ .

1. Для данного материала на разработанном устройстве определяем суммарную величину сдвига, при которой качественные показатели композиционного материала являются наилучшими  $\gamma = 3600$ . При данных заданных параметрах этой величине соответствует время смешения, равное  $t = 19$  мин.

#### 3.1. Характеристики пластосмесителя СП-45

Наименование параметров	Значения
Рабочий объём $V_p$ , л	45
Свободный объём $V_c$ , л	70
Диаметр ротора $D$ , мм	365
Длина ротора $L$ , мм	607
Диаметр камеры $D_k$ , мм	368
Длина короткой лопасти $L_1$ , мм	146
Длина длинной лопасти $L_2$ , мм	255,5
Величина минимального зазора между гребнем ротора и стенкой камеры $h_0$ , мм	1,5
Частота вращения переднего ротора $n$ , об/мин	29,7
Частота вращения заднего ротора $n_3$ , об/мин	33,9
Фрикция $f$	1,143

2. Определяем производительность смесителя по формуле (3.1):

$$G = 60 \cdot \frac{0,07 \cdot 0,65 \cdot 0,85 \cdot 919}{19} = 112,23 \text{ кг/ч.}$$

3. Находим значение технологической мощности по формуле (2.29):

$$N_T = 0,3311 \cdot 3600^{1,3} \cdot 45000 = 67,89 \text{ кВт.}$$

4. Проводим поверочный прочностной расчёт основных деталей и узлов машины по общепринятой методике.

5. Проводим тепловой расчёт процесса смешения.  $A = 1$ ;  $\eta = 0,6$ ;  $c_1 = 1700 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$ ;  $t_k = 150 \text{ °C}$ ,  $t_H = 30 \text{ °C}$ ;  $\alpha_k = 0,37 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$ ;  $\alpha_{л} = 5,95 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$ ;  $F = 0,817 \text{ м}^2$ ;  $t_{ст} = 150 \text{ °C}$ ;  $t_b = 25 \text{ °C}$ ;  $Q_3 = 0 \text{ Вт}$ .

$$Q_1 = 112,23 \cdot 1700 \cdot (150 - 30) = 6,36 \text{ кВт};$$

$$Q_2 = (0,37 + 5,95) \cdot 0,817 \cdot (150 - 25) = 0,64 \text{ кВт};$$

$$Q = 6,36 + 0,64 + 0 = 7 \text{ кВт.}$$

С учётом КПД привода мощность, расходуемая на нагрев смеси и потери тепла, будет равна

$$N_{cp} = 7/0,6 = 11,66 \text{ кВт.}$$

Тогда мощность, затрачиваемая на процесс, будет равна

$$N = 67,89 + 11,66 = 79,55 \text{ кВт.}$$

Проводим расчёт удельной мощности, приходящейся на килограмм продукта по формуле (5.3):

$$N_{уд} = \frac{79,55}{112,23} = 0,71 \text{ кВт/кг.}$$

б. Составляем техническую характеристику.

### 3.2. Техническая характеристика пластосмесителя СП-45 для переработки ВПВД

Наименование параметров	Значения
Рабочий объём $V_p$ , л	45
Свободный объём $V_c$ , л	70
Диаметр ротора $D$ , мм	365
Длина ротора $L$ , мм	607

Наименование параметров	Значения
Диаметр камеры $D_k$ , мм	368
Длина короткой лопасти $L_1$ , мм	146
Длина длинной лопасти $L_2$ , мм	255,5
Частота вращения переднего ротора $n$ , об/мин	29,7
Частота вращения переднего ротора $n_3$ , об/мин	33,9
Фрикция $f$	1,143
Перерабатываемый материал	ВПВД
Производительность $G$ , кг/ч	112,23
Технологическая мощность $N_T$ , кВт	67,894
Удельная мощность $N_{уд}$ , кВт/кг	0,605

### 3.2. РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЕГО ПРОЕКТИРОВАНИИ

1. Первоначально определяется объём единовременной загрузки материала в смеситель  $V$  по методике, изложенной в [36]:

$$V = \frac{Gt}{60\varphi\rho\eta}, \quad (3.4)$$

где  $G$  – заданная производительность, кг/ч;  $\varphi$  – коэффициент загрузки смесительной камеры ( $\varphi = 0,56 \dots 0,76$ );  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент использования машинного времени ( $\eta = 0,8 \dots 0,9$ );  $t$  – время смешения, мин.

2. По ГОСТ 11996–79 выбираем наиболее близкий в большую сторону по величине объёма смеситель со всеми необходимыми для дальнейшего расчёта геометрическими параметрами.

3. После этого определяем суммарную величину сдвига; силовые и энергетические параметры процесса смешения; проводим прочностной расчёт основных деталей и узлов смесительного оборудования и тепловой расчёт процесса смешения по методике как для первого варианта расчёта основных параметров процесса и оборудования.

4. Составляем техническую характеристику спроектированного смесителя, в которую входят все заданные и полученные в ходе расчёта параметры.

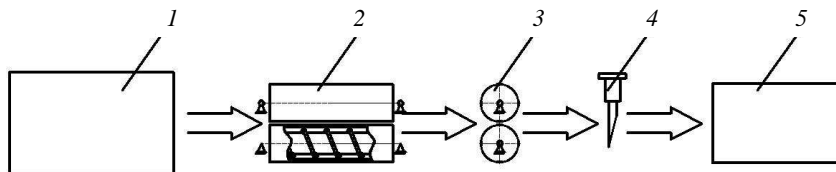


## 4. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ УСТАНОВКИ

### 4.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ

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. 4.1).

Разработанный технологический процесс (рис. 4.1.) вторичной переработки отходов термопластов по непрерывной технологии осуществляется следующим образом: отходы с содержанием посторонних примесей не более 5% поступают на участок сортировки отходов 1, в процессе которой из них удаляют случайные инородные включения и выбраковывают сильно загрязнённые куски. Отходы полимеров непрерывно загружаются через загрузочный бункер, с левой стороны валцов, на рабочие поверхности валково-шнекового агрегата 2, на котором происходит плавление отходов, удаление летучих компонентов, пластикация, транспортировка материала вдоль оси валков по направлению к загрузочному отверстию, где за счёт максимального давления в зоне деформации валцов расплав продавливается в загрузочное отверстие и захватываясь витками шнека транспортируется в сторону формирующей головки. На выходе из которой получают прутки (стренги) заданного сечения. Полученные стренги сохраняют свой размер за счёт установки тянущего устройства 3, далее они режутся ножом 4, после чего полученные гранулы собираются в ёмкости 5. По данной технологии могут перерабатываться не только плёночные отходы термопластов производственного и общественного потребления, но и различные технологические отходы термопластов.



**Рис. 4.1. Схема технологического процесса  
вторичной переработки отходов термопластов:**

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

## 4.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

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

Экспериментальная установка (рис. 4.2) выполнена на базе лабораторных валцов СМ 200 80/80 и представляет собой горизонтально расположенные полые валки 4, 8 диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм. Передний валок 1 является подвижным (число оборотов валка: от 0 до 30 об/мин). Привод валка осуществляется от электродвигателя постоянного тока АО52/2 1. Использование данного типа двигателя позволяет плавно регулировать частоту вращения валка, задний валок 2 является неподвижным, в нём имеется загрузочное отверстие 5, расположенное в зоне максимального давления под углом, равным углу подъёма винтовой нарезки шнека.

Внутри неподвижного валка установлен шнек 3, привод которого осуществляется от электродвигателя 8. Шнек 3 осуществляет захват материала, транспортировку и создание давления перед формующей головкой. Механизм регулировки зазора 6 позволяет перемещать передний валок по направляющим станины и фиксировать его в заданном положении. Регулировка зазора производится при помощи пары винт-гайка, расположенных по обе стороны переднего валка.

Механизм регулировки зазора снабжён предохранительным устройством. При переработке отходов полимеров выставленная величина зазора проверялась прокатыванием между валками с левой и правой стороны свинцовых полос и измерением её толщины ручным калиброммером с точностью до  $\pm 0,05$  мм.

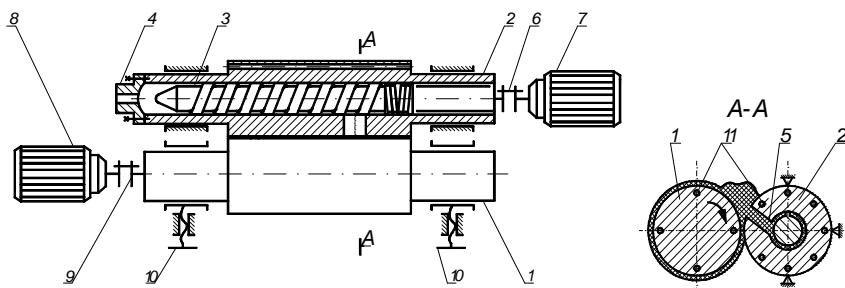


Рис. 4.2. Схема экспериментальной валково-шнековой установки

(Пат. РФ 2417881 RU C2 B29B 7/64):

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

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

### 4.3 РАСЧЁТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШНЕКОВОГО УСТРОЙСТВА

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

Таким образом, расчёт сводится к определению частоты вращения шнека, при которой может быть обеспечена заданная производительность процесса. При этом геометрические размеры шнека (шаг винтовой нарезки шнека, глубина винтового канала шнека, длина нарезной части шнека, радиальный зазор, угол подъёма винтовой нарезки шнека) могут быть выражены через коэффициенты [37].

Так производительность вальцов, работающих по непрерывной схеме, может быть определена [38, 39]:

$$Q_v = 60\pi D_v n_v F_{л} \rho \eta, \quad (4.1)$$

где  $D_v$  – диаметр валка вальцов, м;  $n_v$  – число оборотов переднего валка, об/мин;  $F_{л}$  – площадь поперечного сечения ленты материала, снимаемого с валка, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент использования машинного времени ( $\eta = 0,8 \dots 0,9$ ).

Производительность шнекового устройства определяем из уравнения [37, 40, 41]:

$$Q_{ш} = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} n_{ш}, \quad (4.2)$$

где  $K$  – коэффициент геометрической формы головки, м<sup>3</sup>;  $n_{ш}$  – частота вращения шнека, с<sup>-1</sup>;  $\alpha$  – постоянная прямого потока, м<sup>3</sup>;  $\beta$  – постоянная обратного потока, м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – постоянная потока утечки, м<sup>3</sup>.

Значения постоянных прямого потока  $\alpha$ , обратного  $\beta$  и потока утечки  $\gamma$  определяются следующим образом:

$$\alpha = \frac{\pi D_{ш} h (t - ie) \cos^2 \varphi}{2}; \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{h^3 (t - ie) \sin 2\varphi}{24l_0}; \quad (4.4)$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D_{\text{ш}}^2 \delta^3 \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi}{10el_0}, \quad (4.5)$$

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;  $l_0$  – длина зоны дозирования (в данном случае длина нарезной части шнека), м;  $\delta$  – величина радиального зазора между гребнем нарезки и внутренней поверхностью материального цилиндра, м;  $\varphi$  – угол наклона винтовой нарезки.

В конечном итоге условие, обеспечивающее согласование, может быть записано приравниванием производительностей по формулам (4.1) и (4.2):

$$60\pi D n_{\text{в}} F_{\text{лр}} \eta = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} n_{\text{ш}}. \quad (4.6)$$

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 устройства в целом зависит не только от геометрических параметров шнека и частоты его вращения, но и в значительной степени от геометрии формующей головки [37, 42].

На основании полученной зависимости разработан алгоритм расчёта геометрических размеров шнекового устройства (приложение 1). Результатом работы программы является множество значений диаметров  $D_{\text{ш}}$  и частот вращения  $n_{\text{ш}}$  шнека шнекового устройства при которых обеспечивается условие согласования (4.6) для заданных геометрических размеров профилирующей формующей головки и коэффициентов для геометрических размеров шнека.

#### 4.1. Идентификатор к программе расчёта геометрических размеров отборочно-шнекового 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
$K_0$	$\kappa$	Коэффициент консистентности	Па·с <sup>n</sup>
$lc$	$l$	длина формующей части	мм
$dc$	$d$	диаметр формующей части	мм

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения
$Nv$	$Nv$	частота вращения валков	
$Dv$	$Dv$	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
$Kh$	$Kh$	глубина нарезки	мм
$Kdelta$	$\delta k$	радиальный зазор	мм
$Qv$	$Qv$	производительность вальцов по непрерывной схеме	кг/час
$Nch$	$Nch$	частота вращения шнека	об/мин
$alfa$	$\alpha$	постоянная прямого потока шнека с постоянными геометрическими размерами	$m^3$
$beta$	$\beta$	постоянная обратного потока шнека с постоянными геометрическими размерами	$m^3$
$Fa$	$Fa$	коэффициент прямотока	
$Fb$	$Fb$	коэффициент противотока	
$Kg$	$Kg$	коэффициент геометрической формы	$m^3$
$Q$	$Q$	производительность	$m^3/c$
$Sc$	$Sc$	скорость сдвига в формирующей полости	

**Объект исследования для примера расчёта.** В качестве объекта исследования принят непрерывный процесс переработки отходов ПВД, ПНД, ПП, ПС производственного и общественного потребления, а также первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020 на ЭУ. Отходы ПВД, ПНД, ПП, ПС производственного и общественного потребления выбраны в качестве объекта исследования в связи с тем, что они составляют 80% от всего объёма отходов термопластов используемых при производстве тары и упаковки.

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

Наименование показателя	Значение
1. Размер гранул, мм	от 2 до 5
2. Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,919 ± 0,01
3. Показатель текучести расплава с доп. в %, $I$ , г/10мин	1,8 ± 6
4. Предел текучести при растяжении $\sigma_t$ , Па (кГс/см <sup>2</sup> )	93·10 <sup>5</sup> (95)
5. Прочность при разрыве $\sigma_p$ , Па (кГс/см <sup>2</sup> )	115·10 <sup>5</sup> (115)
6. Относительное удлинение при разрыве $\epsilon$ , %	780,5
7. Реологические свойства при температуре переработки ( $t = 130$ °С)	
индекс течения, $n$	0,2
коэффициент консистентности $K$ , МПа·с	0,2
8. Молекулярная масса, $M$	18 500

#### **4.3. Требования, предъявляемые к перерабатываемым отходам полимерной тары и упаковки**

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

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ДЛЯ ПРОЦЕССА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ

---

При переработке отходов термопластов на качественные показатели получаемого вторичного термопластичного материала (прочности при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает суммарная величина сдвига, возникающая в рабочих органах валково-шнекового агрегата, которая зависит от различных технологических (частота вращения валка, частота вращения шнека, величина минимального зазора между валками, «запас» материала на валках) и конструктивных параметров процесса.

Таким образом, была поставлена задача: определить такой параметр переработки отходов термопластов, характеризующий качественные показатели вторичного термопластичного материала, величина которого может быть положена в основу при расчёте конструктивных и технологических параметров валково-шнековых агрегатов.

Анализ литературных источников показал [38, 44, 45], что в основу такого параметра может быть положена суммарная величина сдвига, возникающая в зазорах перерабатывающих машин.

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

$$\gamma_{\text{сум}} = \gamma_{\text{в}} + \gamma_{\text{зо}} + \gamma_{\text{ш}} + \gamma_{\text{фк}}, \quad (5.1)$$

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

### 5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ПРИ ВАЛЬЦЕВАНИИ ТЕРМОПЛАСТОВ

Суммарная величина сдвига, возникающая в межвалковом зазоре при переработке отходов термопластов на вальцах, у которых один валок является неподвижным (рис. 5.1), определяется по уравнению 5.2.

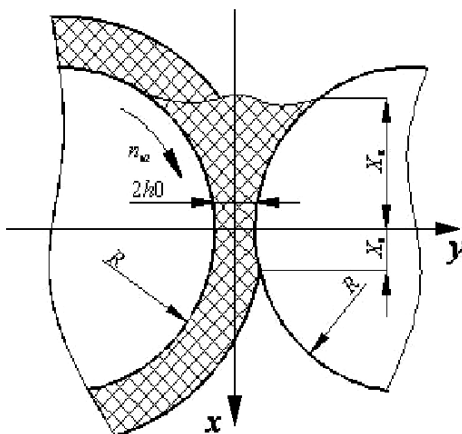


Рис. 5.1. Схема процесса вальцевания с одним неподвижным валком

$$\gamma_B = \frac{1}{l_B} \int_0^{l_B} \gamma_n dl, \quad (5.2)$$

где  $\gamma_n = \bar{\gamma} \cdot i(t)$  – суммарная величина сдвига при периодическом режиме

вальцевания на валково-шнековом агрегате,  $i(t) = \frac{U_0 t (1 + X_k^2)}{(X_k - X_H) \sqrt{2Rh_0}}$  –

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

Средняя удельная деформация сдвига, которой подвергается материал в процессе переработки на валково-шнековом агрегате определяется выражением 5.3.

$$\bar{\gamma} = \left\{ \frac{3}{4} \left[ (1 - X_k^2)(\arctg X_k - \arctg X_H) + \frac{(1 + X_k^2)X_H - X_k^2}{1 + X_H^2} \right] \right. \\ \left. \frac{0,5}{1 - 0,25(1 + X_k^2)} + \frac{0,5}{4(1 + X_k^2)} \left( \frac{X_k}{1 + X_k^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \arctg X_k - \arctg X_H \right) \right\} \\ \times \frac{1}{\left[ 2\sqrt{2} h_0^2 (1 + X_k^2)(X_k - X_H) \right]}. \quad (5.3)$$



## 5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА В ЗАГРУЗОЧНОМ ОТВЕРСТИИ

В процессе переработки, материал с поверхности валков направляется в загрузочное отверстие (рис. 5.2), расположенное в зоне максимального давления.

Для расчёта геометрических параметров загрузочного отверстия была предложена следующая методика.

Определяем площадь поперечного сечения загрузочного отверстия:

$$F = \pi r^2; \quad (5.4)$$

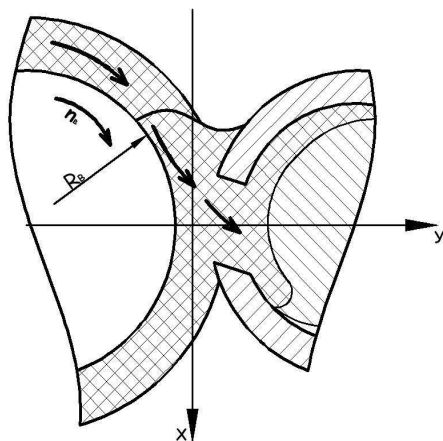
где  $r$  – радиус загрузочного отверстия, м;

$$r = \frac{L(X_k)}{0,06 \left( \frac{R}{h_0} \right) [g_2(X_k)]^{1/2}}; \quad (5.5)$$

$L(X_k)$  – глубина загрузочного отверстия, рассчитывается в соответствии с прочностными характеристиками неподвижного валка;  $R$  – радиус валка, м;  $h_0$  – половина межвалкового зазора, м;  $X_H$ ,  $X_K$  – безразмерные координаты входа и выхода материала соответственно.

Функция  $g_2(X_k)$  определяется следующим выражением:

$$g_2(X_k) = \frac{X_k + X_H}{1 + X_H^2} [X_H - X_k + 5X_k^3(1 + X_H^2)] + (1 - 3X_k^2)(X_k \arctg X_k - \arctg X_H). \quad (5.6)$$



**Рис. 5.2. Схема движения материала с поверхности валка  
в загрузочное отверстие винтового канала шнека**

Для продавливания материала через загрузочное отверстие необходимо выполнение следующего условия:

$$P_{\max} \geq P_{30}. \quad (5.7)$$

Величину максимального давления определяем исходя из гидродинамической теории вальцевания следующим выражением:

$$P_{\max} = \frac{5\mu_0 U^{1/n}}{h^{1/n}} \left( \frac{9R}{8h_0} \right)^{1/2} X_k^3, \quad (5.8)$$

$h$  – расстояние от оси симметрии зазора до поверхности валков:

$$h = h_0 (1 + X_k^2). \quad (5.9)$$

Перепад давления в загрузочном отверстии

$$P_{30} = \frac{Q\mu_0}{K_{\text{ц}}}; \quad (5.10)$$

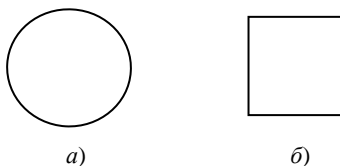
где  $Q$  – производительность валково-шнекового агрегата,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $K_{\text{ц}}$  – коэффициент геометрической формы,  $\text{м}^3$

$$K_{\text{ц}} = \frac{\pi d^4}{128L}. \quad (5.11)$$

После предварительных расчётов было предложено два варианта загрузочного отверстия: круглое и прямоугольное (рис. 5.3).

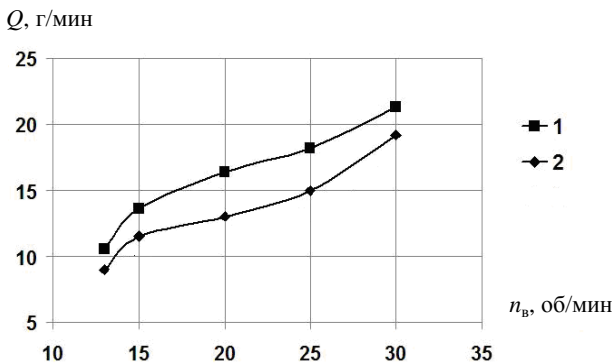
Далее были проведены экспериментальные исследования по определению производительности с каждым типом загрузочного отверстия и сделан сравнительный анализ.

Из графической зависимости (рис. 5.4) видно, что максимальная производительность наблюдается при круглом поперечном сечении загрузочного отверстия при прочих равных условиях. Следовательно, дальнейшие эксперименты проводились с круглым типом загрузочного отверстия.



**Рис. 5.3. Виды загрузочного отверстия:**

$a$  – круглое;  $b$  – прямоугольное



**Рис. 5.4. Зависимость производительности от формы загрузочного отверстия:**  
1 – круглое; 2 – прямоугольное

Величина сдвига в загрузочном отверстии определится следующим выражением:

$$\gamma_{30} = \dot{\gamma}\tau, \quad (5.12)$$

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

$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi d^3}, \quad (5.13)$$

$Q$  – объёмная производительность машины,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $d$  – диаметр загрузочного отверстия, м.

$$\tau = \frac{FL}{Q} \quad (5.14)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения загрузочного отверстия,  $\text{м}^2$ .

### 5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА В КАНАЛАХ ШНЕКОВОГО УСТРОЙСТВА И ФОРМУЮЩЕЙ ГОЛОВКЕ

Далее материал с поверхности валков вальцов через загрузочное отверстие направляется в винтовой канал шнека, расположенный в неподвижном валке. Таким образом, дальнейшая переработка представляет собой процесс экструзии, о качестве которого можно судить также по суммарной величине сдвига в винтовых каналах шнека  $\gamma_{ш}$  и гранулирующей головке  $\gamma_{фк}$ , которая представляет собой функцию различных конструктивных параметров шнека, формирующих каналов профилирующей головки и технологических параметров процесса экструзии [46 – 49].

Суммарная величина сдвига в каналах шнека определяется следующим образом:

$$\gamma_{\text{ш}} = \dot{\gamma}_p \tau_{\text{ш}}, \quad (5.15)$$

где  $\dot{\gamma}_p$  – расчётная скорость сдвига в каналах шнека,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\dot{\gamma}_p = \frac{0,5D\omega \left( \frac{1}{n} + 1 \right)}{h}; \quad (5.16)$$

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

$$\tau_{\text{ш}} = \frac{WhL}{Q \sin \varphi}, \quad (5.17)$$

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

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

$$\gamma_{\text{фг}} = \sum_{i=1}^n \gamma_{\text{ф}i}, \quad (5.18)$$

где  $\gamma_{\text{ф}i} = \dot{\gamma}_i \tau_{\text{ф}i}$ ;  $\tau_{\text{ф}i} = \frac{F_i l_i}{Q_i}$ ;  $\gamma_{\text{ф}i}$ ,  $\dot{\gamma}_i$ ,  $\tau_{\text{ф}i}$  – величина сдвига, 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.

Таким образом, решение уравнения 5.1 совместно с 5.2, 5.11, 5.15, 5.18 позволяет определить величину суммарного сдвига для процесса валково-шнековой утилизации термопластичных полимерных материалов с получением профильного изделия заданного сечения.

## 6. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЁТА ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ

---

В качестве исходных параметров, необходимых для расчёта, принимаются:

- 1) реологические константы перерабатываемого материала  $K$  и  $n$ ;
- 2) температура переработки –  $T$ , К;
- 3) производительность установки –  $Q$ , кг/ч.

При расчёте основных параметров процесса переработки отходов термопластов 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 устройства);
- 2) оснащение вальцов разработанным шнековым устройством – при заданных геометрических размерах валков вальцов необходимо определить производительность процесса  $Q$  и основные геометрические размеры шнекового устройства (диаметр и длину шнека).

### 6.1. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАЛКОВО-ШНЕКОВОГО АГРЕГАТА

Так как валково-шнековая технология переработки отходов полимерных материалов – это технология совмещённых процессов вальцевания и экструзии, расчёт основных параметров процесса и оборудования целесообразно вести отдельно как для валковых так и для шнековых машин.

Расчёт ведём в следующей последовательности:

- 1) определяем объём единовременной загрузки материала на вальцы  $q_1$  по формуле [43, 50]:

$$q_1 = \frac{Q_n \tau_b}{60\rho\alpha}, \quad (6.1)$$

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

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

2) для выбранного типоразмера валкового оборудования задаёмся интервалом изменений величины минимального межвалкового зазора  $h_0$  и частоты вращения заднего валка  $n_b$ ;

3) определяем суммарную величину сдвига для непрерывного процесса вальцевания  $\gamma_b$  по формуле 5.2;

4) производим расчёт геометрических размеров загрузочного отверстия по формулам 5.4 – 5.11;

5) определяем суммарную величину сдвига в загрузочном отверстии по формуле 5.12;

6) определяем диаметр шнека шнекового устройства и его геометрию (см. раздел 4.3) в зависимости от производительности вальцов и свойств перерабатываемого материала;

7) определяем суммарную величину сдвига в каналах шнека  $\gamma_{ш}$  и профилирующей формирующей головке  $\gamma_{фк}$  по формулам (5.15 – 5.18);

8) определяем суммарную величину сдвига для процесса переработки отходов термопластов на валково-шнековом агрегате  $\gamma_{\text{сум}}$  по формуле (5.1). Если полученное значение суммарной величины сдвига  $\gamma_{\text{сум}}$  отличается от суммарной величины сдвига, обеспечивающей заданные физико-механические показатели перерабатываемого материала, то расчёт продолжается путём корректировки одного из следующих параметров: межвалковый зазор  $2h_0$ ; частота вращения валка  $n_b$ ; площадь поперечного сечения загрузочного отверстия  $F$ , шаг нарезки  $t$ ; глубина нарезки  $h$ ; ширина гребня  $e$ ; частота вращения шнека  $n_{ш}$ .

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

9) находим силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания (распорное усилие  $F_n$  и технологическую мощность  $N_n$ , а также мощность привода вальцов  $N_d$ ) по методике, изложенной в [38, 43].

Величина распорного усилия  $F_n$  определяется по формуле:

$$F_n = \frac{\mu U_1 R_b^2 h_0^2 (1+f) \left(\frac{U}{h_0}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n}{2Q} f_1(X_k, n), \quad (6.2)$$

где

$$\begin{aligned}
f_1(X_K, n) = & \int_{X_{K0}}^0 \int_{X_K}^{X_H} \int_{X_K}^X \frac{(\pm X^2 \pm X_K^2)^n}{(1+X^2)^{2n+1}} \times \\
& \times \left[ \frac{6X_K^4 + 10X_K^2}{(1+X_K^2)^2} (X_K + X_K^3 + 0,6X_K^5 + 0,143X_K^7 - X_H + X_H^3 - 0,6X_H^5 + \right. \\
& + 0,143X_H^7) + 6X_K \operatorname{arctg} X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\
& - X_K^3 (3,4 + 3,34X_K^2 + 0,86X_K^4) + X_K X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\
& \left. + 1,4X_K \ln(1+X_K^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dX dX dX_K. \quad (6.3)
\end{aligned}$$

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

$$N_n = \frac{\mu U_1^2 R_B h_0^2 \sqrt{2Rh_0} \left( \frac{U_1}{h_0} \right)^n \left( \frac{1+2n}{n} \right)^n \left( \frac{f+1}{2} \right)}{Q} f_2(X_K, n), \quad (6.4)$$

где

$$\begin{aligned}
f_2(X_K, n) = & \int_{X_{K0}}^0 \int_{X_K}^{X_H} \frac{(\pm X^2 \mp X_K^2)}{(1+X^2)^{2n}} \left[ \frac{6X_K^4 + 10X_K^2}{(1+X_K^2)^2} (X_K + X_K^3 + 0,6X_K^5 + 0,143X_K^7 - \right. \\
& - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + 6X_K \operatorname{arctg} X_H (X_H + X_H^3 + \\
& + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - 6X_K \operatorname{arctg} X_K (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\
& - X_K^3 (3,4 + 3,34X_K^2 + 0,86X_K^4) + X_K X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\
& \left. + 1,4X_K \ln(1+X_K^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dX dX_K. \quad (6.5)
\end{aligned}$$

Мощность электродвигателя привода вальцов  $N_d$  определяется по формуле:

$$N_d = \frac{N_n}{\eta_{пр}}, \text{ кВт}, \quad (6.6)$$

где  $\eta_{пр}$  – КПД привода машины;

10) находим энергетические параметры процесса экструзии (технологическая мощность  $N_n$ ) и проводим прочностной расчёт основных деталей и узлов шнекового устройства по общепринятой методике [37, 52 – 55];

11) проводим прочностной расчёт основных деталей и узлов машины (станины [53], валков [54], механизма регулировки зазора и др.) по общепринятой методике [41, 55 – 57];

12) проводим тепловой расчёт процесса экструзии с учётом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов [37, 52 – 55];

13) проводим тепловой расчёт процесса непрерывного вальцевания с учётом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов [55, 56].

Составляем техническую характеристику спроектированного валково-шнекового агрегата.

Алгоритм методики инженерного расчёта параметров процесса и оборудования при проектировании валково-шнекового агрегата приведён в приложении 1, а программа расчёта геометрических размеров шнекового устройства приведён в приложении 2.

## **6.2. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОСНАЩЕНИИ ВАЛЬЦОВ ШНЕКОВЫМ УСТРОЙСТВОМ**

Расчёт ведём в следующей последовательности:

1) определяем производительность вальцов при непрерывном режиме работы –  $Q$  по методике, изложенной в [50];

2) определяем суммарную величину сдвига для непрерывного процесса вальцевания  $\gamma_{\text{в}}$  по формуле 5.2;

3) определяем диаметр шнека шнекового устройства и его геометрию (см. раздел 4.3) в зависимости от производительности вальцов и свойств перерабатываемого материала;

4) производим расчёт геометрических размеров загрузочного отверстия по формулам 5.4 – 5.11;

5) определяем суммарную величину сдвига в загрузочном отверстии по формуле 5.12;

6) определяем диаметр шнека шнекового устройства и его геометрию (см. раздел 4.3) в зависимости от производительности вальцов и свойств перерабатываемого материала;

7) определяем суммарную величину сдвига в каналах шнека  $\gamma_{\text{ш}}$  и профилирующей формирующей головке  $\gamma_{\text{фк}}$  по формулам (5.15 – 5.18);

8) определяем суммарную величину сдвига для процесса переработки отходов термопластов на валково-шнековом агрегате  $\gamma_{\text{сум}}$  по формуле (5.1). Если полученное значение суммарной величины сдвига  $\gamma_{\text{сум}}$  отличается от суммарной величины сдвига обеспечивающей заданные физико-механические показатели перерабатываемого материала, то расчёт продолжается путём корректировки одного из следующих параметров: межвалковый зазор  $2h_0$ ; частота вращения вала  $n_{\text{в}}$ ; площадь поперечного сечения загрузочного отверстия  $F$ , шаг нарезки  $t$ ; глубина нарезки  $h$ ; ширина гребня  $e$ ; частота вращения шнека  $n_{\text{ш}}$ .



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

9) находим силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания (распорное усилие  $F_n$  и технологическую мощность  $N_n$ , а также мощность привода вальцов  $N_d$ ) (6.2, 6.4, 6.6);

10) находим энергетические параметры процесса экструзии (технологическая мощность  $N_n$ ) и проводим прочностной расчёт основных деталей и узлов шнекового отборочного устройства по общепринятой методике;

11) проводим прочностной расчёт основных деталей и узлов машины (валков, станины, механизма регулировки зазора и др.) по общепринятой методике;

12) проводим тепловой расчёт процесса непрерывного вальцевания с учётом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов;

13) проводим тепловой расчёт процесса экструзии с учётом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов.

Составляем техническую характеристику спроектированного валково-шнекового агрегата.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

**К разделам 1 – 3:**  $U_0$  – средняя величина окружной скорости валков;  $h_0$  – половина межвалкового зазора;  $X_n, X_k$  – безразмерные координаты сечений входа и выхода;  $i$  – число проходов;  $R$  – радиус;  $t$  – время процесса;  $n$  – индекс течения расплава;  $l$  – длина;  $\alpha$  – угол;  $\delta$  – ширина кромки;  $V$  – объём;  $D$  – диаметр;  $h$  – зазор между гребнем ротора и камерой;  $f$  – площадь сечения;  $\sigma_t$  – предел текучести при растяжении;  $\sigma_p$  – предел прочности при разрыве;  $\varepsilon$  – относительное удлинение при разрыве;  $\gamma$  – величина суммарной деформации сдвига.

**К разделам 4 – 6:**  $Q$  – производительность;  $N$  – мощность;  $V$  – объём;  $\Delta P$  – перепад давления;  $n, K$  и  $m$  – реологические константы;  $\mu$  – вязкость;  $R$  – радиус;  $l_b$  – длина рабочей части валка;  $X_n, X_k$  – безразмерные координаты сечений входа и выхода;  $P$  – удельная мощность, характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал;  $d$  – диаметр;  $I$  – показатель текучести расплава;  $\sigma_t$  – предел текучести при растяжении;  $\sigma_p$  – предел прочности при разрыве;  $\varepsilon$  – относительное удлинение при разрыве;  $h_0$  – величина минимального зазора;  $h_{02}$  – половина величины минимального зазора;  $q_N$  – удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции;  $u$  – частота вращения переднего валка;  $t$  – время вальцевания;  $\gamma$  – величина сдвига;  $z_j$  – элементарный участок.

### Индексы

**К разделам 1 – 3:**  $n$  – начальное;  $k$  – конечное;  $v$  – периодический процесс вальцевания;  $лц$  – левый цилиндр;  $пц$  – правый цилиндр;  $сум$  – суммарная;  $гр$  – гребень ротора;  $ср$  – средняя;  $к$  – камера.

**К разделам 4 – 6:**  $\phi$  – фильера;  $n$  – начальное;  $k$  – конечное;  $с$  – суммарная;  $x$  – вдоль оси  $X$ .

### Аббревиатуры

**К разделам 1 – 3:** ПТР – показатель текучести расплава; ПЭ – полиэтилен; ПВХ – поливинилхлорид; ПП – полипропилен; ПС – полистирол; ПЭТФ – полиэтилентерефталат; ПО – полиолефины; ПНД и ПВД – полиэтилен высокой и низкой плотности; ВПВД – вторичный полиэтилен низкой плотности; ТУ – технический углерод (сажа); АТУ – активированный технический углерод; УЗ – ультразвук; ЭУ – экспериментальная установка.

**К разделам 4 – 6:** ПЭ – полиэтилен; ПВХ – пластифицированный поливинилхлорид; ПП – полипропилен; ПС – полистирол; ПЭТФ – полиэтилентерефталат; ПО – полиолефины; ПА – полиамид; ПНД и ПВД – полиэтилен высокой и низкой плотности; ЭУ – экспериментальная установка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В учебном пособии показаны современные методики расчёта смесителей типа роторных и валкового оборудования, и решены вопросы расчёта рабочих органов смесителей периодического действия типа роторных и валкового оборудования при условии заданных показателей качества получаемого композита.

Разработаны усовершенствованные математические выражения для расчёта интегрального критерия качества в различных зонах деформации перерабатываемого материала при получении из отходов термопластов композиционного материала в смесителе периодического действия типа роторного и валковом оборудовании.

В работе исследованы и проведены примеры расчётов интегрального критерия качества в рабочих зонах деформации перерабатываемого материала, на базе которых решена конкретная техническая задача, направленная на изучение процесса получения композита на основе вторичных полимеров. Исследован совмещённый процесс утилизации широкого класса отходов термопластичных полимерных материалов, определены конструктивные параметры смесительного и валкового оборудования и режимные параметры процесса, при которых достигаются заданные физико-механические показатели получаемого композита. Разработана методика расчёта суммарной величины сдвига процесса смешения, определяющая физико-механические показатели получаемого вторичного материала, методику инженерного расчёта конструкционных параметров смесительного и валкового оборудования и режимных параметров процесса получения композита.

Предложены методики инженерного расчёта режимных и конструктивных параметров смесителя периодического действия и валкового оборудования при условии получения термопластичного композиционного материала с заданными показателями качества с использованием суммарного сдвига как интегрального критерия качества.

Учебное пособие предназначено для аспирантов, магистрантов и студентов вузов старших курсов, обучающихся по специальностям и направлениям 151900.68, 261201, 240801, 261700, специализирующихся в области переработки пластмасс и эластомеров, и для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией смесителей периодического действия типа роторных и валковых машин для переработки полимерных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Абдуллаев, Р.А. Модификация вторичных полимеров для изготовления изделий различного функционального назначения : дис. ... канд. техн. наук / Р.А. Абдуллаев. – Саратов, 2007.
2. Ким, В.С. Диспергирование и смешение в процессе производства и переработки пластмасс / В.С. Ким, В.В. Скачков. – М. : Химия, 1988. – 240 с.
3. Смешение полимеров / В.В. Богданов, Р.В. Торнер, В.Н. Красовский, Э.О. Регер. – Л. : Химия, 1979. – 192 с.
4. Бернхардт, Э. Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт. – М. : Изд-во Химия, 1965. – 747 с.
5. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров / Д.М. Мак-Келви. – М. : Химия, 1965. – 442 с.
6. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.
7. Ким, В.С. Теория и практика экструзии полимеров / В.С. Ким. – М. : Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
8. Бекин, Н.Г. Машины и агрегаты заводов резиновой промышленности / Н.Г. Бекин. – Ярославль, 1976. – Ч. II. – 128 с.
9. Порчхидзе, Г.Д. Влияние геометрии шнека и параметров переработки на процесс диспергирования при экструзии наполненных полимеров : автореф. ... канд. техн. наук / Г.Д. Порчхидзе. – М. : МГУИЭ, 2002.
10. Слезкин, Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н.А. Слезкин. – М. : Гостехиздат, 1955. – 519 с.
11. Гуреев, С.С. Определение интегрального критерия качества в рабочих зонах двухроторных смесителей / С.С. Гуреев, А.С. Клинков, В.Г. Однолько // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 417 – 423.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617845. Расчёт интегрального критерия качества в зонах деформации смесительных устройств / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2010616018 ; заявл. 01.10.2010 ; зарег. 26.11.2010.
13. Сван, Т. Delphi 4. Библия разработчика / Т. Сван ; пер. с англ. – СПб. : Диалектика, 1998. – 672 с.
14. Озеров, В. Delphi. Советы программистов / В. Озеров. – СПб. : Символ-Плюс, 2003. – 976 с.
15. Осипов, Д. Delphi. Профессиональное программирование / Д. Осипов. – СПб. : Символ-Плюс, 2006. – 1056 с.
16. Гуреев, С.С. Методика определения интегрального критерия качества в зонах деформации смесительных устройств / С.С. Гуреев, А.С.

Клинок // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 905 – 909.

17. Оборудование для переработки пластмасс : справочное пособие / под ред. В.К. Завгороднего. – М. : «Машиностроение», 1976. – 407 с.

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

19. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А.С. Клинок, М.В. Соколов, Д.Л. Полушкин и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.

20. Разработка конструкции валково-шнекового агрегата и совмещенного технологического процесса утилизации полимерной тары и упаковки / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинок, П.В. Макеев, С.С. Гуреев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 578 – 587.

21. Прогнозирование качества вторичного гранулята при утилизации пленочных термопластов / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинок, М.В. Соколов и др. // Прогрессивные технологии развития : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. 10–11 декабря 2005 г. – Тамбов : Першина, 2005. – С. 170–171.

22. Непрерывная валково-шнековая технология утилизации отходов термопластов / Д.Л. Полушкин, С.С. Гуреев, А.С. Клинок, М.В. Соколов // Наука на рубеже тысячелетий «Progressive technologies of Development» : 3-я Междунар. науч.-практ. конф. 24–25 ноября 2006 г. – Тамбов, 2006. – С. 123–124.

23. Гуреев, С.С. Разработка полимерных композиционных материалов на основе вторичного сырья и технического углерода / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, И.В. Шашков // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы Всерос. науч.-инновац. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 27 – 29 октября 2009 г. – Тамбов, 2009. – С. 248 – 250.

24. Макеев, П.В. Разработка технологии и оборудования для переработки полимерной тары и упаковки / П.В. Макеев, С.С. Гуреев, И.В. Шашков // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы Всерос. науч.-инновац. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 27 – 29 октября 2009 г. – Тамбов, 2009. – С. 294–295.

25. Макеев, П.В. Разработка технологии и оборудования для переработки отходов полимерной тары и упаковки / П.В. Макеев, С.С. Гуреев // Экология России и сопредельных территорий : материалы XIV Междунар. экологической студ. конф. – Новосибирск, 2009. – С. 155–156.

26. Гуреев, С.С. Разработка полимерных композиционных материалов на основе вторичного сырья и технического углерода / С.С. Гуреев // Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов : материалы Всерос. конф. с элементами научной школы для молодежи. 16 – 20 ноября 2009 г. – Белгород, 2009. – С. 223 – 226.

27. Гуреев, С.С. Исследование композитов на основе вторичного полимерного сырья и технического углерода / С.С. Гуреев // Аспекты ноосферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. 5 февраля 2010 г. – Тамбов, 2010. – С. 30 – 32.

28. Исследование процесса получения композитов на основе вторичного полимерного сырья и технического углерода // С.С. Гуреев, П.В. Макеев, А.С. Клинков, С.П. Хрущев // Труды Тамбовского государственного технического университета : сб. науч. ст. – Тамбов, 2010. – Вып. 23. – С. 160 – 163.

29. Влияние параметров процесса вторичной переработки отходов полимерной тары и упаковки на качественные показатели получаемого вторматериала / П.В. Макеев, С.С. Гуреев, А.С. Клинков, Д.Л. Полушкин // Труды Тамбовского государственного технического университета : сб. науч. ст. – Тамбов, 2010. – Вып. 23. – С. 163 – 166.

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

31. Гуреев, С.С. Разработка технологии получения саженаполненного композиционного материала / С.С. Гуреев, Д.М. Ремизов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов, 2011. – Вып. II. – С. 155 – 158.

32. Макеев, П.В. Инновационная технология рециклинга отходов термопластов / П.В. Макеев, С.С. Гуреев, И.В. Шашков // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов, 2011. – Вып. II. – С. 158 – 161.

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

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

35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2008613114. Расчёт интегрального критерия качества суммарной вели-

чины сдвига для непрерывного вальцевания / С.С. Гуреев, Д.Л. Полушкин, М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев ; Тамбовский государственный технический университет. № 2008612201 ; заявл. 19.05.2008 ; зарег. 27.06.2008.

36. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов : монография / А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.И. Кочетов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 320 с.

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

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

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

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

41. Автоматизированное проектирование и расчёт шнековых машин : монография / М.В. Соколов, А.С. Клинков, О.В. Ефремов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 248 с.

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

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

44. Торнер, Р.В. Исследование механики экструзии полимеров : дис. ... д-ра техн. наук / Р.В. Торнер. – М., 1968.

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

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

47. Проектирование экструзионных машин с учётом качества резино-технических изделий : монография / М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 292 с.

48. Соколов, М.В. Расчёт шнековых машин для переработки резиновых смесей при заданном качестве экструдата / М.В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4А. – С. 468 – 474.

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

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

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

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

53. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2008610876. Расчёт 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.

54. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2008612658. Расчёт 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.

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

56. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров / Ю.Е. Лукач, Л.Г. Воронин, Л.И. Ружинская и др. – К. : Тэхніка, 1988. – 208 с.

57. Бекин, Н.Г. Валковые машины для переработки резиновых смесей (основы теории) / Н.Г. Бекин. – Ярославль : ЯТИ, 1969. – 264 с.

58. Рябинин, Д.Д. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей / Д.Д. Рябинин, С.Е. Лукач. – М. : Машиностроение, 1972. – 143 с.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

---

### III. АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШНЕКОВОГО УСТРОЙСТВА

*Блок 1.* Начало.

*Блок 2.* Осуществляется ввод исходных данных.

*Блок 3.* Рассчитывается производительность вальцов  $Q_B$ , работающих по непрерывной схеме:

$$Q_B = 60\pi D n_B F_{л} \rho \eta .$$

*Блок 4.* Задаётся счётчик по диаметру шнека от  $D_H$  до  $D_K$  с шагом 2.

*Блок 5.* Задаётся счётчик по частоте вращения шнека от  $n_{шн}$  до  $n_{шк}$  с шагом 2.

*Блок 6.* Рассчитывается производительность шнекового устройства  $Q_{ш}$

$$Q_{ш} = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} n_{ш} .$$

*Блок 7.* Если условие  $\left| \frac{Q_B - Q_{ш}}{Q_B} \right| \leq \varepsilon$  соблюдается, то переходят на *блок 8*, если условие не соблюдается, то переходят на *блок 5*.

*Блок 8.* Выводятся результаты работы программы.

*Блок 9.* Конец.

## П2. ТЕКСТ ПРОГРАММЫ «РАСЧЁТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШНЕКОВОГО 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;
        EdtMul: 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;
        Label15: TLabel;
        Edt10: 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;
Edt1c: TEdit;
Panel14: TPanel;
Label9: TLabel;
Edt1c: TEdit;
Panel15: TPanel;
Panel16: TPanel;
Label10: TLabel;
EdtDv: TEdit;
Label11: TLabel;
EdtH1: 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;
Edt1i: TEdit;
Edt1i: TEdit;
procedure
BtnClick(Sender: TObject);
procedure BtnUmoC-
lick(Sender: TObject);
procedure
FormCreate(Sender: TObject);
procedure
N5Click(Sender: TObject);
procedure
N3Click(Sender: TObject);
procedure
N4Click(Sender: TObject);
procedure CBKt-
Change(Sender: TObject);
procedure CBKh-
Change(Sender: TObject);
procedure CBKe-
Change(Sender: TObject);
procedure
CBK10Change(Sender: TOB-
ject);
procedure CBKdelta-
Change(Sender: TObject);

private
{ Private declarations }
public

{ Public declarations }
end;

var
Form1: TForm1;

implementation

{$R *.DFM}

procedure
TForm1.BtnClick(Sender: TOB-
ject);

```

```

var
LeftXOff-
set,RightXOffset,TopYOffset,
BottomYOffset: word; // от-
ступы
    xn, xk: single; //
начальное и конечное значе-
ния x
    yn, yk: single; //
начальное и конечное значе-
ния 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,d
c,W:single;
al-
fa,betta,gamma,Fa,Fb,Kg,SC,N
ch,Nv,Nkp,Np1,Np2,Ro,nn,eta:
single;
Qv,Dv,HL,B:single;
Pi,esp,Ke:single;
del-
ta,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
: single;
SGi,SGj,r:word;
//n:word;
begin
    LeftXOffset:=20;
RightXOffset:=10; TopYOff-
set:=10; BottomYOffset:=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, Цель-
сий
Ts:=StrToFloat(edtTs.text);//
/температура стеклования,
Цельсий
ER:=StrToFloat(edtER.text);//
/ E/R
K:=StrToFloat(edtK.text);//м
ера 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
V:=StrToFloat(edtV.text);//
ширина срезаемой ленты, мм

D:=StrToFloat(edtD.text);//д
иаметр шнека, мм
l0:=StrToFloat(edtl0.text)*p
ower(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
Kdel-
ta:=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-
(LeftXOff-
set+RightXOffset))/maxXX;
    ky:=(img.height-
(TopYOff-
set+BottomYOffset))/maxYY;
Qv:=60*Pi*Dv*power(10,-
3)*Nv*HL*power(10,-
3)*B*power(10,-
3)*Ro*eta;//производительность
вальцев по непрерывной схе-
ме, 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-
ARC-
TAN(Xn)*180/Pi)+(Xn+Xn*Xk*Xk
+Xk+Xn*Xn*Xk)/(1+Xn*Xn);
//edtf3.text:=FloatToStr(f3);
//edtARCTANXk.text:=FloatToS
tr(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;
edtM.text:=FloatToStrf(M,ffg
eneral,3,7);
Wv:=M*2*Pi*Nv/(KPD*60);
edtWv.text:=FloatToStrf(Wv,f
fgeneral,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);
    edtKdel-
ta.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);
    del-
ta:=Kdelta*D*power(10,-3);
    // 10:=4*D*power(10,-
3);

fi:=ArcTan(t/(Pi*D*power(10,
-3)))*180/Pi;
    edt-
fi.text:=FloatToStrf(fi,ffge
neral,3,7);
    // end;

Mm.Lines.Add('Диаметр шне-
ка, D='+FloatToStr(D));
Mm.Lines.Add('Шаг шнека,
t='+FloatToStr(t));
Mm.Lines.Add('Глубина шне-
ка, h='+FloatToStr(h));
Mm.Lines.Add('Ширина греб-
ня, e='+FloatToStr(e));
Mm.Lines.Add('Радиальный
зазор, del-
ta='+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='+FloatTo
Str(Nch));
Mm2.Lines.Add('Np1='+FloatTo
Str(Np1));
Mm2.Lines.Add('Np2='+FloatTo
Str(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 постоянными геомет-
рическими размерами, м^3

beta:=(power(h,3)*(t-
i*e)*sin(2*fi*Pi/180))/(24*1
0);//постоянная обратного
потока шнека с постоянными
геометрическими размерами,
м^3

gam-
ma:=(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)='+Float
ToStr(alfa));

Mm.Lines.Add('(D)='+FloatToS
tr(D));
Mm.Lines.Add('(Nch)='+FloatT
oStr(Nch));
Mm.Lines.Add('(h)='+FloatToS
tr(h));
Mm.Lines.Add('(t)='+FloatToS
tr(t));
Mm.Lines.Add('(e)='+FloatToS
tr(e));
Mm.Lines.Add('(l0)='+FloatTo
Str(l0));

```

```

Mm.Lines.Add(' (kx)=' +FloatTo
Str(kx));
Mm.Lines.Add(' (ky)=' +FloatTo
Str(ky));
Fa:=0.19191+0.81888*exp
(-(h/W)); //коэффициент пря-
мотока
Fb:=0.0614+0.9504*exp
(-(h/W)); //коэффициент про-
тивотока

//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 геометри-
ческой формы, м^3
//edtKg.text:=FloatToStrF
(Kg,ffGeneral,6,7);
//Q:=((alfa*Fa*Kg)/(Kg+betta
*Fb))*2/60*Pi*Nch; //произво-
дительность шнековой уста-
новки, м^3/с
Q:=((alfa*Kg)/(Kg+betta+gamm
a))*Nch/60; //производитель-
ность 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);
edtQ-
cho.text:=FloatToStrf(Q,ffge
neral,3,7);

Qo:=Qv/(Ro*3600);
edt-
Qo.text:=FloatToStrf(Qo,ffge
neral,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(LeftXOffs
et+round(2.5*kx*Nch-
r),img.height-
(BottomYOff-
set+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx
*Nch+r),img.height-
(BottomYOff-
set+round(ky*Q*915*3600+r)));
end;
}
if D=12 then
begin
img.Canvas.Brush.Color
:=clGreen;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffs
et+round(2.5*kx*Nch-
r),img.height-
(BottomYOff-
set+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx
*Nch+r),img.height-
(BottomYOff-
set+round(ky*Q*915*3600+r)))
; end;

```

```

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

```

```

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

```

```

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

```

```

if D=20 then
begin
img.Canvas.Brush.Color
:=clGreen;

```

```

img.canvas.Ellipse(LeftXOffs
et+round(2.5*kx*Nch-
r),img.height-
(BottomYOff-
set+round(ky*Q*915*3600-
r)),LeftXOffset+round(2.5*kx
*Nch+r),img.height-
(BottomYOff-
set+round(ky*Q*915*3600+r)));
end;

```

```

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

```

```

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

```

```

if D=26 then
begin
img.Canvas.Brush.Color
:=clRed;
img.canvas.Ellipse(LeftXOffs
et+round(2.5*kx*Nch-

```



```

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

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

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

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

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

SG.Cells[SGi,SGj]:=FloatToSt
r(Q*3600*915);
//Mm.Lines.Add('D='+EdtD.Tex
t);
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*sqr(sqr(PI)*
sqr(D*power(10,-3)-
2*h)+sqr(t)));//скорость
сдвига в винтовом канале
щека
S2:=(sqr(PI)*sqr(D*power(10,-
3))*nn)/(60*delta*sqr(sqr
(PI)*sqr(D*power(10,-
3))+sqr(t)));//скорость
сдвига в зазоре между греб-
нем нарезки и цилиндром
Muc:=K*power(Sc,(It-
1));//*exp(ER/deltaT);//
эффективная вязкость мате-
риала в формующей полости

```

```
Mu1:=K*power(S1,(It-1));//*exp(ER/deltaT);//
эффективная вязкость в вин-
товом канале шнека
Mu2:=K*power(S2,(It-1));//*exp(ER/deltaT);//
эффективная вязкость в зазо-
ре 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*10)/(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*10*e)/(del-
ta*t*sqr(60));//мощность на
срез материала в зазоре меж-
ду вершиной витка нарезки и
стенкой цилиндра
N:=N1+N2;//мощность в зоне
дозирования
```

```
Mm4.Lines.Add('S1='+FloatToS-
tr(S1));
Mm4.Lines.Add('S2='+FloatToS-
tr(S2));
Mm4.Lines.Add('D='+FloatToSt-
r(D));
Mm4.Lines.Add('nn='+FloatToS-
tr(nn));
Mm4.Lines.Add('t='+FloatToSt-
r(t));
Mm4.Lines.Add('h='+FloatToSt-
r(h));
Mm4.Lines.Add('e='+FloatToSt-
r(e));
```

```
edtnn.text:=FloatToStr(nn);
edtS1.text:=FloatToStr(s1);
edtS2.text:=FloatToStr(s2);
edt-
Mul.text:=FloatToStr(Mul);
edt-
Mu2.text:=FloatToStr(Mu2);
edtK.text:=FloatToStr(K);
edtN1.text:=FloatToStr(N1);
edtSc.text:=FloatToStr(Sc);
edtQ.text:=FloatToStr(Q);
edt-
Muc.text:=FloatToStr(Muc);
edtdel-
taP.text:=FloatToStr(deltaP);
edtn2.text:=FloatToStr(N2);
edtn.text:=FloatToStr(N);
end;
```

```
{Mm.Lines.Add('alfa='+FloatT-
oStr(alfa));
Mm.Lines.Add('D='+FloatToStr-
(D));
Mm.Lines.Add('esp='+FloatToS-
tr(esp));
Mm.Lines.Add('Nch='+FloatToS-
tr(Nch));
Mm.Lines.Add('Q='+FloatToStr-
(Q));}
```

```
fi:=ArcTan(t/(Pi*D*power(10,
-3)))*180/Pi;
Mm.Lines.Add('fi='+FloatToSt-
r(fi));
```

```
img.Canvas.Brush.Color :=
clRed;
img.Canvas.Ellipse(LeftXOffs-
et+round(kx*2.5*Nch-
r),img.height-
(BottomYOffset+round(ky*Qv-
r)),LeftXOffset+round(kx*2.5
*Nch+r),img.height-
(BottomYOff-
set+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 подъёма винтовой ли-
нии
    edti.text:=FloatToStr(1);//
заходность шнека
edtI0.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);
    edtKdel-
ta.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);
    ed-
tIt.text:=FloatToStr(0.3);
end;

procedure
TForm1.FormCreate(Sender:
TObject);
    var

    LeftXOff-
set,RightXOffset,TopYOffset,
BottomYOffset: word; // от-
ступы

        kx, ky,Nch,D: single;
// коэффициенты масштабиро-
вания по осям

    QQ,N,Nv,Qv,maxX,maxY,minX,mi-
nY,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:=clBl-
ack;
img.Canvas.pen.color:=clBlac-
k;

img.Canvas.rectangle(0,0,img
.width,img.height);

```

```

LeftXOffset:=20; RightXOff-
set:=10; TopYOffset:=10;
BottomYOffset:=15;
// координатные оси
with img.canvas do
begin
pen.color:=clGray;
font.color:=clWhite;

img.Canvas.rectangle(LeftXOf-
fset,TopYOffset,img.width-
RightXOffset,img.height-
BottomYOffset); //задание
графической области//
dxs:=round((img.width-
(LeftXOff-
set+RightXOffset))/5);
dys:=round((img.height-
(TopYOff-
set+BottomYOffset))/6);
// горизонтальные линии
for j:=1 to 5 do begin move-
to(LeftXOffset,TopYOffset+dy
s*j); lineto(img.width-
RightXOff-
set,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-
BottomYOff-
set+3,IntToStr(j*20)); end;
// вертикальные линии
for j:= 1 to 4 do begin
move-
to(LeftXOffset+dxs*j,TopYOff-
set); line-
to(LeftXOffset+dxs*j,img.hei-
ght-BottomYOffset); end;

QQ:=8;
N:=10;
minX:=0;
minY:=0;
maxX:=100;
maxY:=15;
maxXX:=maxX-minX;
maxYY:=maxY-minY;
kx:=(img.width-
(LeftXOff-
set+RightXOffset))/maxXX;
ky:=(img.height-
(TopYOff-
set+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;
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.CBK10Change(Sender :
TObject);
var
  K10,l0,D:single;
begin
D:=StrToFloat(edtD.text);
//edtd.text:=FloatToStr(d);
//K10:=StrToFloat(cbK10.text
);
//l0:=K10*D;
//edtt.text:=FloatToStr(Kt*D
*power(10,-3));
edt10.text:=FloatToStr(l0);
end;

```

```

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

end

```

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ И СМЕСИТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ТИПА БРАБЕНДЕР .....	5
1.1. Процесс модификации отходов полиэтилена высокого давления техническим углеродом .....	5
1.2. Описание смесителя типа Брабендер .....	5
1.2.1. Описание и характеристики смесителя .....	5
1.2.2. Принцип работы смесителя .....	8
1.2.3. Разработанные рабочие органы различной конфигурации .....	8
1.3. Объект исследования .....	10
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЯ ТИПА БРАБЕНДЕР .....	13
2.1. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств с овальными рабочими органами .....	13
2.1.1. Первый метод .....	13
2.1.2. Второй метод .....	26
2.1.3. Сравнительный анализ двух методов определения суммарной величины сдвига в рабочих пространствах двухроторных смесителей с овальными рабочими органами .....	27
2.2. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств с гладкими рабочими органами .....	28
2.2.1. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{в}}$ при периодическом режиме процесса вальцевания термопластов .....	30
2.2.2. Определение суммарной величины сдвига в зазорах между стенкой смесительной камеры и цилиндрическими рабочими органами $\gamma_{\text{лц}}$ и $\gamma_{\text{щ}}$ .....	32
2.3. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств с рифлёными рабочими органами .....	33
2.4. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств с винтовыми многозаходными рабочими органами .....	34

3. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА СМЕСИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ .....	36
3.1. Расчёт основных параметров процесса и оборудования при его модернизации .....	36
3.2. Расчёт основных параметров процесса и оборудования при его проектировании .....	40
4. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ УСТАНОВКИ .....	41
4.1. Технологический процесс утилизации отходов термопластов на валково-шнековом агрегате .....	41
4.2. Описание экспериментальной установки .....	42
4.3. Расчёт геометрических размеров шнекового устройства .....	43
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ДЛЯ ПРОЦЕССА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ .....	47
5.1. Определение суммарной величины сдвига при вальцевании термопластов .....	47
5.2. Определение величины сдвига в загрузочном отверстии .....	49
5.3. Определение суммарной величины сдвига в каналах шнекового устройства и формирующей головке .....	51
6. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЁТА ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛКОВО-ШНЕКОВОМ АГРЕГАТЕ ...	53
6.1. Расчёт параметров процесса и оборудования при проектировании валково-шнекового агрегата .....	53
6.2. Расчёт параметров процесса и оборудования при оснащении вальцов шнековым устройством .....	56
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	59
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	60
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	65
П1. Алгоритм расчёта геометрических размеров шнекового устройства .....	65
П2. Текст программы «Расчёт геометрических размеров шнекового устройства» .....	66