

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра физической и коллоидной химии

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПРОИЗВОДСТВА ПЛАСТИКОВ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭКСТРУДЕРА
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ**

Выполнение курсового проекта

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
18.03.01 — Химическая технология

Составитель
С. В. Бронников

Санкт-Петербург
2023

Утверждено
на заседании кафедры ФиКХ
16.01.2023 г., протокол №4

Рецензент А. Н. Евдокимов

Методические указания соответствует программе и учебным планам дисциплины «Основы проектирования и оборудование производства пластиков» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология», профиль «Технология и переработка полимеров». Изложены принципы проектирования формующей головки и шнека экструдера; расчёта производительности экструдера и мощности его электропривода, позволяющие обоснованно выбирать оборудование для переработки полимеров в изделия.

Методические указания предназначены для выполнения курсового проекта бакалавров очной и заочной форм обучения. Отдельные разделы указаний могут быть полезны аспирантам и специалистам в области технологии переработки полимеров.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 21.02.2023 г. Рег.№ 5100/22

Высшая школа технологии и энергетики СПб ГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	5
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАЗДЕЛАМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	6
Введение.....	6
1. Устройство и принцип работы одношнекового экструдера	6
2. Исходные данные для расчетов	6
2.1. Индивидуальное задание.....	6
2.2. Параметры изделия	7
2.3. Параметры формующей головки.....	8
2.4. Параметры шнека	8
3. Расчёт формующей головки экструдера.....	9
4. Расчёт производительности экструдера	10
5. Расчёт мощности электропривода экструдера	12
6. Проверочный механический расчет шнека экструдера	14
7. Выбор экструдера	17
Заключение	18
Литература	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	20
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	22

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения студентами курсового проекта «Проектирование и расчет экструдера для переработки полимеров», являющейся компонентом учебно-методического комплекса дисциплины «Основы проектирования и оборудование производства пластиков».

Цели курсового проекта: создание основы для практической деятельности инженера-технолога в области переработки полимерных материалов; понимание сущности и природы химических и физико-химических процессов, происходящих при переработке полимеров и получении полимерных изделий методом экструзии.

Задачи курсового проекта: научить студентов понимать устройство и основные закономерности проектирования экструзионного оборудования для переработки полимеров; производить механические, инженерные и энергетические расчеты экструзионного оборудования; выбирать оборудование для переработки полимеров; использовать полученные знания для решения конкретных задач в технологии получения полимерных изделий; развитие навыков использования литературы и интернет-ресурсов для решения задач проектирования экструзионных линий.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из двух частей: расчетная часть (пояснительная записка) и графическая часть.

Пояснительная записка к курсовом проекте должна содержать следующие разделы:

Титульный лист (пример оформления приведен в Приложении 1);

Оглавление

Введение

1. Устройство и принцип работы одношнекового экструдера

2. Исходные данные для расчетов

2.1. Индивидуальное задание

2.2. Параметры изделия

2.3. Параметры формующей головки

2.4. Параметры шнека

3. Расчёт формующей головки экструдера

4. Проектирование и расчет шнека

5. Расчёт производительности экструдера

6. Расчёт мощности привода экструдера

7. Выбор экструдера

Заключение

Литература

Пояснительная записка оформляется в электронном виде с использованием редактора *Microsoft Word*, шрифт *Times New Roman*, размер шрифта 12, межстрочный интервал 1.5, и распечатывается на листах белой бумаги формата А4.

Формулы для расчетов записываются с использованием редактора формул, например, *Microsoft Equation*, и нумеруются. Кроме записи в виде символов, формулы обязательно должны содержать исходные численные данные и результаты вычислений с указанием размерности. Результаты вычислений записываются с точностью не менее трех значащих цифр. При записи результатов вычислений рекомендуется использовать десятичные множители (например, $2,47 \cdot 10^6$ Па) либо десятичные приставки к единицам измерения (например, 2,47 МПа).

Графическая часть курсового проекта должна содержать сборочный чертеж формующей головки экструдера (на листе формата А3) и спецификацию (на листе формата А4). Чертеж выполняется в системе автоматизированного проектирования и черчения (Компас-3D, AutoCAD или др.) с учетом требований ЕСКД. Пример оформления чертежа приведен в Приложении 3. Размеры формующей головки выбираются в соответствии с индивидуальным заданием. Чертеж должен содержать номера позиций деталей (экструдер, формующая головка, фильтр-решетка, установочное кольцо) и крепежных элементов (болты, гайки, пружинные шайбы Гровера). Также необходимо указать габаритный и установочный размеры (D_ϕ и C ,

соответственно) сборочного чертежа.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАЗДЕЛАМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Введение

Во введении необходимо дать определение процесса экструзии полимеров, указать типы экструдеров, описать виды полимерных изделий, получаемых по экструзионной технологии.

Использованные литературные источники и интернет-сайты включить в список литературы.

Объем раздела – не менее 1 стр.

1. Устройство и принцип работы одношнекового экструдера

Привести схему устройства одношнекового экструдера (рис. 1) и описать принцип его работы.

Объем раздела – не менее 1 стр.

2. Исходные данные для расчетов

2.1. Индивидуальное задание

Индивидуальное задание выбирается по согласованию с руководителем из таблицы в Приложении 2 и представляется в виде:

Вариант №...

Параметры изделия		Параметры формующей головки						Параметры шнека		
A , мм	B , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм	L_4 , мм	D , мм	n , 1/с	t , мм
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

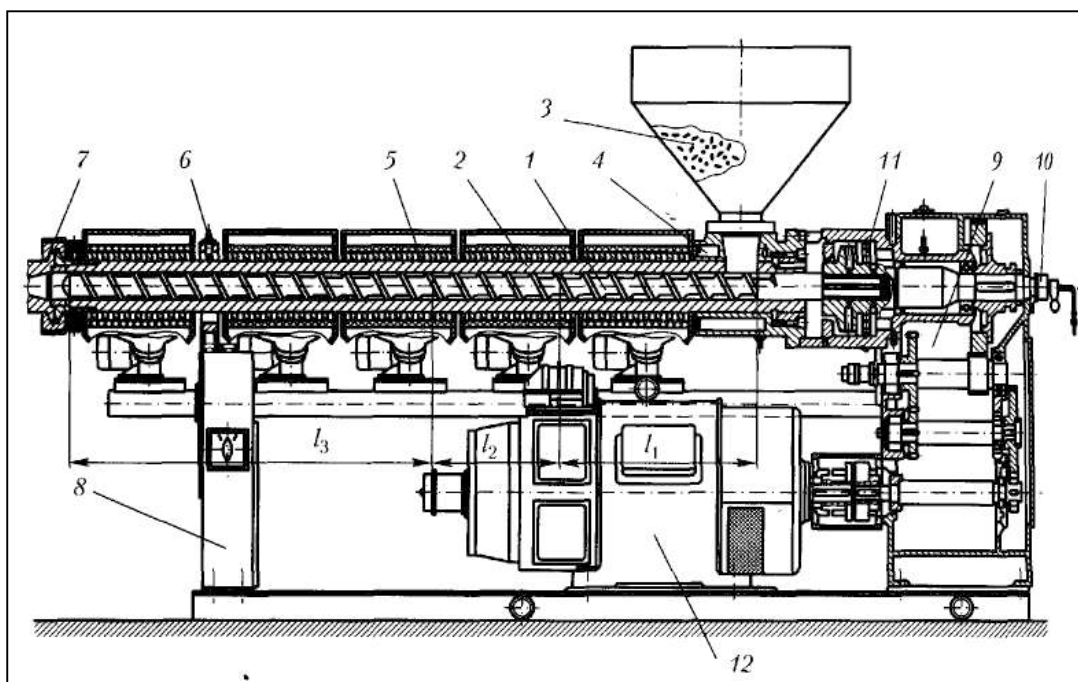


Рис. 1. Принципиальное устройство одношнекового экструдера:

1 – шнек, 2 – материальный цилиндр, 3 – бункер, 4 – каналы, 5 – зонные кольцевые нагреватели, 6 – термопары, 7 – формующая головка, 8 – массивный корпус, 9 – механическая передача, 10 – патрубок для отвода охлаждающей воды, 11 – подшипниковый узел, 12 – электродвигатель

2.2. Параметры изделия

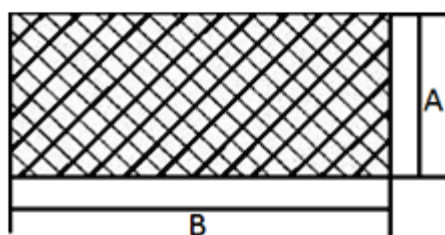


Рис. 2. Экструдированное изделие:
пруток из полипропилена прямоугольного сечения:

$A = \dots \text{мм}$ – высота профиля изделия;
 $B = \dots \text{мм}$ – ширина профиля изделия;
 $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ – плотность полипропилена.

2.3. Параметры формующей головки

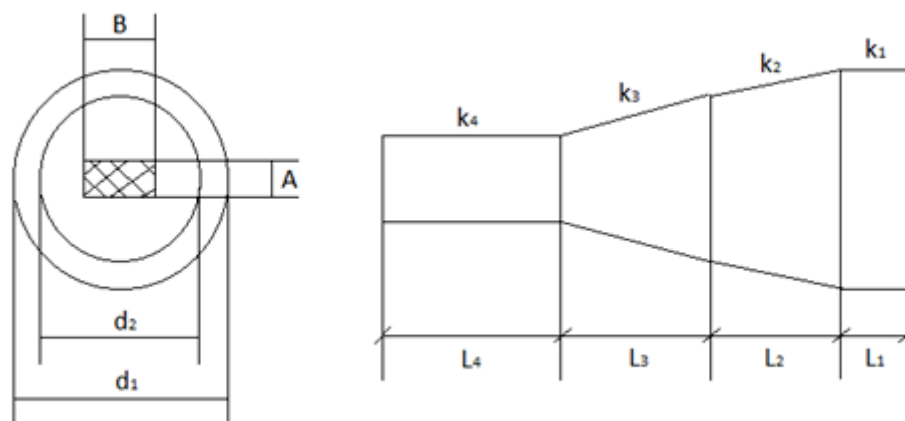


Рис. 3. Расчетная схема канала формующей головки:

- $d_1 = \dots \text{мм}$ – диаметр первого (цилиндрического) участка;
 $d_2 = \dots \text{мм}$ – диаметр второго (конического) участка;
 $L_1 = \dots \text{мм}$ – длина первого (цилиндрического) участка;
 $L_2 = \dots \text{мм}$ – длина второго (конического) участка;
 $L_3 = \dots \text{мм}$ – длина третьего (сужающегося) участка;
 $L_4 = \dots \text{мм}$ – длина четвертого (прямоугольного) участка.

2.4. Параметры шнека

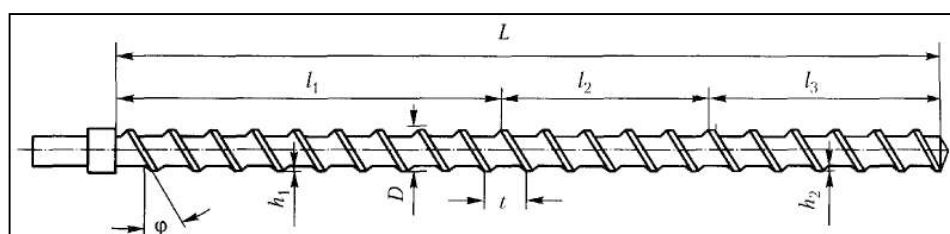


Рис. 4. Схема шнека:

- $D = \dots \text{мм}$ – диаметр шнека с гребнем;
 $z = 1 \text{ мм}$ – радиальный зазор между гребнями шнека и рабочим цилиндром;
 $h = h_1 = h_2 = 7 \text{ мм}$ – глубина винтового канала шнека (постоянная);
 $\delta = 7 \text{ мм}$ – толщина гребня шнека;
 $t = \dots \text{мм}$ – шаг винтовой нарезки шнека;
 $\varphi = \dots$ – угол винтовой нарезки, °;
 $i = 1$ – число заходов винтовой нарезки;
 $n = \dots 1/\text{с}$ – частота вращения шнека;
 $L/D = 20, 25 \text{ или } 30$ (по заданию преподавателя) – отношение длины шнека к его диаметру;

l_1 – питающая зона шнека, м;

l_2 – зона сжатия шнека, м;

l_3 – зона нагнетания (дозирования) шнека, м.

Примечание. Значения, отмеченные знаком ..., вставить из варианта индивидуального задания.

3. Расчёт формующей головки экструдера

Экструзионная головка экструдера состоит из четырёх участков по ходу движения расплава полимера (рис. 3):

– цилиндрический участок L_1 ,

– конический участок L_2 ,

– сужающийся участок L_3 , на котором сечение плавно меняется от круглого до сечения, соответствующего профильного изделия, и

– прямоугольный участок L_4 .

Соппротивление канала формующей головки течению расплава определим как:

$$W = \frac{1}{k} [см^3], \quad (3.1)$$

где k – коэффициент геометрической формы канала, который рассчитывается для каждого участка канала, а затем вычисляется суммарный коэффициент:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4}} [см^3]. \quad (3.2)$$

Коэффициент геометрической формы первого (цилиндрического) участка канала вычислим по формуле:

$$k_1 = \frac{\pi d_1^4}{128 L_1} [см^3], \quad (3.3)$$

где d_1 – диаметр первого (цилиндрического) участка канала, см;

L_1 – длина первого (цилиндрического) участка канала, см.

Коэффициент геометрической формы второго (конического) участка определим по формуле:

$$k_2 = \frac{3\pi d_1^2 d_2^2}{128 L_2 (d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2)} [см^3], \quad (3.4)$$

где d_1 – наибольший диаметр второго участка канала, см;

d_2 – наименьший диаметр второго участка канала, см;

L_2 – длина второго участка канала, см.

Коэффициент геометрической формы третьего (сужающегося) участка канала вычислим по формуле:

$$k_3 = \frac{BA^2 h_3^2}{6(A + h_3) L_3} [см^3], \quad (3.5)$$

где A – наименьшая ширина канала или высота профиля изделия, см;

B – наибольшая ширина канала или ширина профиля изделия, см;

$h_3 = d_2$ – наибольшая высота третьего канала или наименьший диаметр второго участка, см;

L_3 – длина третьего участка канала, см.

Коэффициент геометрической формы четвертого (прямоугольного) участка канала определим по формуле:

$$k_4 = \frac{F^2}{L_4} f \text{ [см}^3\text{]}, \quad (3.6)$$

где $f = 1,7$ – коэффициент формы канала;

$F = A \cdot B$ – площадь поперечного сечения канала, см^2 ;

L_4 – длина четвертого участка канала, см .

Рассчитав значения коэффициентов геометрической формы для всех четырёх участков по формулам (3.3)-(3.6), определим общий коэффициент геометрической формы канала по формуле (3.2), а затем вычислим сопротивление канала течению расплава по формуле (3.1).

4. Расчёт производительности экструдера

На производительность экструдера оказывают влияние следующие факторы:

- длина дозирующей зоны шнека;
- геометрические параметры шнека;
- число оборотов шнека;
- конструкция (сопротивление) формующей головки.

На основе гидродинамического подхода к анализу взаимодействия элементов экструдера с перерабатываемым материалом в дозирующей зоне экструдера различают три компонента потока движения расплава:

- прямой (вынужденный) поток, движущийся по межвитковому пространству в направлении от зоны загрузки к зоне дозирования вдоль оси шнека и возникающий вследствие вращения шнека относительно цилиндра;
- обратный поток расплава, движущийся в противоположном направлении и вызванный перепадом давления по длине шнека;
- поток утечек расплава, движущийся в зазоре между наружной поверхностью витков шнека и внутренней поверхностью материального цилиндра в направлении от зоны дозирования.

С учетом вышесказанного, объёмную производительность экструдера определим как:

$$Q = \frac{\alpha k n}{k + \beta + \gamma} [\text{м}^3/\text{с}], \quad (4.1)$$

где k – коэффициент геометрической формы канала формующей головки, рассчитанный по формуле (3.2), м^3 ;

n – частота вращения шнека, с^{-1} ;

α – константа прямого потока, м^3 ;

β – константа обратного потока, м^3 ;

γ – константа потока утечек, м^3 .

Константы прямого и обратного потоков расплавов, а также константу потока утечек определим, соответственно, по формулам:

$$\alpha = \frac{\pi D h (t - i \delta) \cos \varphi}{2} [\text{м}^3]; \quad (4.2)$$

$$\beta = \frac{h^2(t - i\delta) \cos 2\varphi}{24l_3} [\text{м}^3]; \quad (4.3)$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D^2 z^2 \tan \varphi \sin \varphi}{10l_3 \delta} [\text{м}^3], \quad (4.4)$$

где t – шаг винтовой нарезки шнека, м;

h – глубина винтового канала, м;

i – число заходов винтовой нарезки;

δ – толщина гребня шнека, м;

$z = 0,001 \text{ м}$ – радиальный зазор между гребнем шнека и рабочим цилиндром;

D – диаметр шнека, м;

$l_3 = L/2$ – длина зоны нагнетания (дозирования), м;

L – длина шнека, определяемая из отношения L/D , м;

φ – угол винтовой нарезки шнека, °, который определим по формуле:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{t}{\pi D}\right) [^\circ], \quad (4.5)$$

где t – шаг винтовой нарезки шнека, мм.

Завершив расчеты констант α , β и γ , определим объёмную производительность экструдера с размерностью $\text{м}^3/\text{с}$ по формуле (4.1), а затем ту же характеристику с размерностью $\text{кг}/\text{ч}$ по формуле:

$$Q' = 3600 \cdot Q\rho [\text{кг}/\text{ч}], \quad (4.6)$$

где $\rho = 780 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность расплава полипропилена при температуре 200°C .

Наконец, определим объёмную производительность экструдера, имеющую размерностью $\text{нм}/\text{ч}$, по формуле:

$$Q'' = \frac{Q'}{m} [\text{нм}/\text{ч}], \quad (4.7)$$

где m – масса погонного метра экструдированного изделия, $\text{кг}/\text{нм}$, определяемая как

$$m = \rho V_{1\text{ м}} = \rho F l_{1\text{ м}} [\text{кг}], \quad (4.8)$$

где ρ – плотность полимерного изделия, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$V_{1\text{ м}}$ – объём экструдированного изделия длиной 1 м, м^3 ;

$F = A \cdot B$ – площадь поперечного сечения профиля изделия, м^2 ;

$l_{1\text{ м}} = 1 \text{ м}$ – длина погонного метра экструдированного изделия.

Выполнив расчет объёмной производительности экструдера Q , можно определить скорость сдвига расплава полимера при его движении по участкам канала формирующей головки экструдера.

Определим скорость сдвига при движении расплава материала через первый (цилиндрический) участок канала формирующей головки:

$$S_1 = \frac{32Q}{\pi d_1^3} [\text{с}^{-1}], \quad (4.9)$$

где Q – объёмная производительность экструдера, $\text{м}^3/\text{с}$;

d_1 – диаметр первого (цилиндрического) участка канала, м.

Определим скорость сдвига при движении расплава через второй (конический) участок канала:

$$S_2 = \frac{256Q}{\pi(d_1 + d_2)^3} [c^{-1}], \quad (4.10)$$

где Q – объёмная производительность экструдера, $м^3/с$;

d_1 – наибольший диаметр второго канала, $м$;

d_2 – наименьший диаметр второго канала, $м$.

Скорость сдвига при движении расплава через третий (сужающийся) участок канала определим по формуле:

$$S_3 = \frac{11,61Q}{B(h_3 + A)^2} [c^{-1}], \quad (4.11)$$

где Q – объёмная производительность экструдера, $м^3/с$;

A – наименьшая ширина третьего канала (высота профиля изделия), $м$;

B – наибольшая ширина канала (ширина профиля изделия), $м$;

$h_3 = d_2$ – глубина винтового канала нарезки, $м$.

Скорость сдвига при движении расплава полимера через четвертый (призматический) участок канала определим по формуле:

$$S_4 = \frac{Q}{AB(A + B)f} [c^{-1}], \quad (4.12)$$

где Q – объёмная производительность экструдера, $м^3/с$;

$f = 0,1$ – коэффициент формы канала;

A – высота профиля изделия, $м$;

B – ширина профиля изделия, $м$.

5. Расчёт мощности электропривода экструдера

Мощность электропривода, потребляемая в зоне загрузки шнека l_1 , расходуется на преодоление сил трения при движении уплотненных гранул материала; ее значение составляет приблизительно 10 % от общей потребляемой мощности.

В зоне сжатия шнека l_2 мощность электропривода затрачивается на преодоление сил сопротивления движению уплотненного материала вблизи стенки цилиндра и на преодоление сил трения материала о сердечник шнека и витки нарезки. На это затрачивается около 7 % от общей потребляемой мощности.

Мощность, затрачиваемая в зоне дозирования шнека l_3 , определяется суммой мощностей, расходуемых на принудительное проталкивание уплотненного материала по винтовому каналу шнека N_1 , на срез материала в зазоре между вершиной витка нарезки и стенкой цилиндра N_2 и на создание циркулярного потока в витках нарезки шнека, которой можно пренебречь.

Таким образом, общую мощность, затрачиваемую на перемещение материала по цилиндру экструдера, определим как суммарную величину

$$N = 1,17(N_1 + N_2) [Вт], \quad (5.1)$$

компоненты которой, N_1 и N_2 , определяются по формулам:

$$N_1 = \frac{\pi^3 D^3 l_3}{h} \mu_A + \frac{\pi^2 D n h \tan \varphi \Delta p}{2} [Bm]; \quad (5.2)$$

$$N_2 = \frac{\pi^3 D^3 l_3 n^2}{z t} \mu_B [Bm], \quad (5.3)$$

где D – диаметр шнека, м;

h – глубина винтового канала, м;

t – шаг винтовой нарезки шнека, м;

φ – угол винтовой нарезки шнека, °;

n – частота вращения шнека, 1/с;

l_3 – длина зоны нагнетания (дозирования), м;

$\mu_A = 1050 \text{ Па}\cdot\text{с}$ – эффективная вязкость полипропилена в винтовом канале шнека;

$\mu_B = 300 \text{ Па}\cdot\text{с}$ – эффективная вязкость полипропилена между гребнем шнека и рабочим цилиндром;

z – радиальный зазор между гребнем шнека и рабочим цилиндром, м;

Δp – перепад давления в формующей головке, Па, который определим как:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_i [\text{Па}], \quad (5.4)$$

где Δp_i – перепад давления на i -ом участке канала формующей головки, вычисляемый по формуле:

$$\Delta p_i = \frac{Q \mu_i}{k_i} [\text{Па}], \quad (5.5)$$

где μ_i – эффективная вязкость материала в винтовом канале i -ого участка, (кг/м·с);

Q – объёмная производительность экструдера, м³/с;

k_i – коэффициент геометрической формы i -ого участка канала, м³.

Эффективные вязкости для четырёх участков канала формующей головки определим по реологическим кривым (Приложение 4), используя значения скоростей сдвига S_i , вычисленные по формулам (4.9)-(4.12), температура 190 °С. Запишем найденные значения.

$$\mu_1 = \dots \text{Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_2 = \dots \text{Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_3 = \dots \text{Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_4 = \dots \text{Па}\cdot\text{с}.$$

С учётом найденных значений μ_i , определим значения Δp_1 , Δp_2 , Δp_3 и Δp_4 , по формулам:

$$\Delta p_1 = \frac{Q \mu_1}{k_1} [\text{Па}]; \quad (5.6)$$

$$\Delta p_2 = \frac{Q \mu_2}{k_2} [\text{Па}]; \quad (5.7)$$

$$\Delta p_3 = \frac{Q \mu_3}{k_3} [\text{Па}]; \quad (5.8)$$

$$\Delta p_4 = \frac{Q \mu_4}{k_4} [\text{Па}]. \quad (5.9)$$

Общее значение Δp определим по формуле (5.4).

Используя полученное значение Δp , определим мощность, затрачиваемую на принудительное проталкивание уплотненного материала по винтовому каналу N_1 , по формуле (5.2), мощность, затрачиваемую на срез материала в зазоре между вершиной витка нарезки шнека и стенкой цилиндра N_2 , по формуле (5.3), а затем общую мощность, затрачиваемую на движение материала в цилиндре экструдера N , по формуле (5.1).

Принимая КПД передаточного механизма $\eta = 0,8$, общая потребляемая мощность электродвигателя составит:

$$N_{\text{эд}} = \frac{N}{\eta} [\text{Вт}]. \quad (5.10)$$

6. Проверочный механический расчет шнека экструдера

Процессы переработки пластических масс в шнековых машинах ведутся при значительных давлениях, достигающих 50 МПа, что определяет повышенные требования к прочностным характеристикам их деталей и узлов.

Расчетная схема нагружения шнека приведена на рисунке 5.

На шнек действует аксиальная сила P , крутящий момент $M_{кр}$ и равномерно распределённая нагрузка q от собственной массы червяка. Силы P и q вызывают прогиб шнека. Задачей прочностного расчёта является проверка предварительно определённых размеров шнека и определение допустимого прогиба.

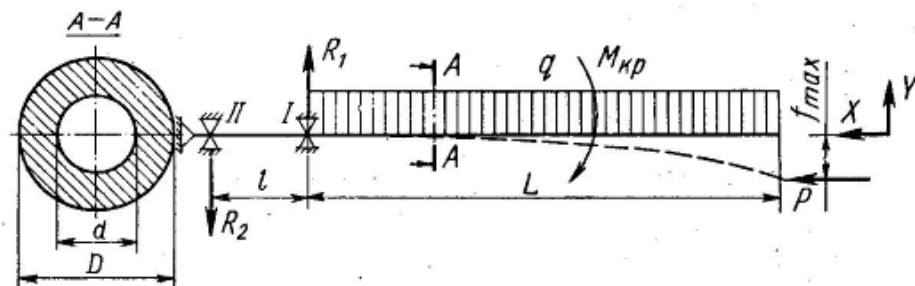


Рис. 5. Расчетная схема нагружения шнека

Шнек предварительно проверяется на гибкость по формуле:

$$\lambda = \frac{kL}{R_i} \leq 50, \quad (6.1)$$

где $k = 0,5$ – коэффициент, зависящий от метода крепления конечной части вала шнека;

L – длина шнека, м, определяемая из отношения L/D (см. раздел 2.4);

R_i – радиус инерции сечения шнека, м, который определяется по формуле:

$$R_i = \sqrt{\frac{J}{F_{A-A}}} [\text{м}], \quad (6.2)$$

где J – момент инерции поперечного сечения вала шнека, м^4 ;

F_{A-A} – площадь поперечного сечения шнека в сечении A-A (см. рис. 5), м^2 , определяемая как

$$F_{A-A} = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \psi^2) [M^2], \quad (6.3)$$

где D – диаметр шнека, m ;

ψ – отношение диаметров шнека без гребня и с гребнем, d_0 и D , m , определяемое по формуле:

$$\psi = \frac{d_0}{D} = \frac{D-h}{D} = 1 - \frac{h}{D}, \quad (6.4)$$

где h – высота гребня шнека (глубина винтового канала шнека), m .

Момент инерции поперечного сечения вала шнека J , M^4 , вычисляется по формуле:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} (1 - \psi^4) [M^4]. \quad (6.5)$$

По формулам (6.4), (6.5), (6.3) и (6.2) последовательно определим значения ψ , J , F_{A-A} и R_i , после чего по формуле (6.1) рассчитаем значение гибкости.

Если условие $\lambda < 50$ выполняется, переходим к прочностному расчету шнека на максимально возможные усилия, возникающие в экструзионных линиях при переработке полимера.

Максимальное давление $p_{\max}$, $Па$, производимое шнеком, достигается, когда отверстие в формующей головке закрыто и отсутствует выход материала из экструдера, т.е. когда производительность экструзионной линии Q , m^3/c , равна нулю:

$$Q = \alpha n - \beta \frac{p_{\max}}{\mu_{cp}} = 0, \quad (6.6)$$

где α – константа прямого потока расплава полимера, m^3 , вычисленная по формуле (4.2);

β – константа обратного потока расплава полимера, m^3 , вычисленная по формуле (4.3);

n – частота вращения шнека, c^{-1} ;

μ_{cp} – средняя по длине шнека вязкость расплава полимера, $Па \cdot c$, которую определяют из соотношения:

$$Q = \alpha n - \beta \frac{\Delta p}{\mu_{cp}} [m^3/c]. \quad (6.7)$$

Таким образом, вначале определяем μ_{cp} как

$$\mu_{cp} = \frac{\beta \Delta p}{\alpha n - Q} [Па \cdot c], \quad (6.8)$$

а затем $p_{\max}$ как

$$p_{\max} = \frac{\alpha n \mu_{cp}}{\beta} [Па], \quad (6.9)$$

При расчетах по формулам (6.8) и (6.9) следует использовать значения Q и Δp , определенные ранее по формулам (4.1) и (5.5), соответственно.

Согласно формуле (6.7), для расчета $p_{\max}$ следует использовать соотношение:

$$p_{\max} = \frac{\alpha F_{\alpha} n \mu_{cp}}{\beta F_{\beta}} [Па]. \quad (6.10)$$

Рассчитав $p_{\max}$, далее определим максимальное осевое усилие S_{oc} , действующее на шнек:

$$S_{oc} = P_{\max} F_{A-A} [H], \quad (6.11)$$

где F_{A-A} – площадь поперечного сечения шнека в сечении $A-A$, $м^2$, рассчитанная по формуле (6.3).

Затем определим крутящий момент $M_{кр}$, действующий на шнек:

$$M_{кр} = \frac{N_{эд}}{n} [H \cdot м], \quad (6.12)$$

где $N_{эд}$ – мощность электродвигателя экструдера, $Вт$, определенная по формуле (5.10);

n – частота вращения шнека, $с^{-1}$.

Знание крутящего момента дает возможность вычислить максимальные касательные напряжения $\tau_{\max}$ на поверхности шнека:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{кр}}{W_p} [Па], \quad (6.13)$$

где W_p – полярный момент сопротивления, $м^3$, определяемый как

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} (1 - \psi^4) [м^3]. \quad (6.14)$$

Определим нормальные напряжения $\sigma_{\max}$, $Па$, вызываемые осевой силой S_{oc} , H , и возникающие в месте закрепления шнека (у первого подшипника)

$$\sigma_{\max} = \frac{S_{oc}}{F} + \frac{M_{и\max}}{W_{но}} [Па], \quad (6.15)$$

где $M_{и\max}$ – максимальный изгибающий момент от распределенной нагрузки шнека, $Н \cdot м$;

$W_{но}$ – осевой момент сопротивления шнека относительно нейтральной оси, $м^3$;

S_{oc} – значение осевой силы, $[H]$, рассчитанное по формуле (6.11).

Значения $M_{и\max}$ и $W_{но}$ определим по формулам:

$$M_{и\max} = \frac{\rho_c g F_{A-A} L^2}{2} [H \cdot м], \quad (6.16)$$

$$W_{но} = \frac{\pi D^3}{32} (1 - i^4) = \frac{W_p}{2} [м^3], \quad (6.17)$$

где $\rho_c = \dots кг/м^3$ – плотность материала шнека (сталь 40ХН2МА);

$g = 9,81 м/с^2$ – ускорение свободного падения;

F_{A-A} – площадь поперечного сечения шнека, $м^2$;

W_p – полярный момент сопротивления, $м^3$;

L – длина шнека, $м$, определяемая из отношения L/D .

Рассчитаем последовательно по формулам (6.16), (6.17) и (6.15) значения $M_{и\max}$, $W_{но}$ и $\sigma_{\max}$, принимая во внимание, что шнек изготавливается из конструкционной легированной стали 40ХН2МА, закаленной после нагрева до 850 °С в масло, температура отпуска 200 °С (*характеристики*

данной марки стали приведены на интернет-портале https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk).

Поскольку шнек находится в сложнапряженном состоянии, его прочность σ_p , Па, рассчитывается по третьей теории прочности¹

$$\sigma_p = (\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2)^{1/2} \leq [\sigma], \quad (6.18)$$

где $[\sigma] = \dots$ Па – предел прочности материала шнека (сталь 40ХН2МА) на растяжение.

Используя формулу (6.18), рассчитаем значение σ_p и сравним его со значением предела прочности $[\sigma]$. Убедимся, что $\sigma_p < [\sigma]$.

Определим максимальный прогиб шнека $f_{\max}$, м, от распределенной собственной массы q , Н/м:

$$f_{\max} = \frac{qL}{8EJ} [м], \quad (6.19)$$

где $E = \dots$ Па – модуль упругости материала шнека (сталь 40ХН2МА);

J – момент инерции сечения, м⁴, определенный по формуле (6.5);

L – длина шнека, м, определяемая из отношения L/D .

Для этого предварительно определим значение распределенной собственной массы шнека q :

$$q = \frac{\rho_c \pi D^2}{4} [Н/м], \quad (6.20)$$

где $\rho_c = \dots$ кг/м³ – плотность материала шнека (сталь 40ХН2МА);

D – диаметр шнека, м.

Рассчитанное по формуле (6.19) значение $f_{\max}$ не должно превышать зазор между гребнем шнека и материальным цилиндром экструдера.

7. Выбор экструдера

Используя основные параметры

- диаметр шнека,
- отношение L/D ,
- производительность экструдера,
- мощность электропривода экструдера,

подобрать экструдеры различных производителей, используя рекомендованные сайты;

<https://www.polimer-servis.ru/nasha-produktsiya/ekstrudery-plastmass.html>

https://sntf.ru/catalog/pererabotka_polimerov/odnoshnekovie_ekstruderi/

<https://stankopet.ru/equipments/ekstrudery-osnovnye>

<https://polimech.ru/oborudovanie-dlya-pererabotki-plastika/ekstruderi/ekstruderyi-dlya-polipropilena/>

¹ Другие названия – гипотеза наибольших касательных напряжений или теория прочности Треска - Сен-Венана. Согласно этой теории, причиной разрушения материала считается сдвиг, вызываемый касательными напряжениями, т.е. материал разрушается, когда наибольшее касательное напряжение достигает значения, предельного для данного материала.

Привести фотографии и технические характеристики выбранных экструдеров, указать наименование компании-производителя.

Заключение

В Заключении привести основные этапы расчетов и выполнения графической части, подвести итог выполненной работы.

Литература

1. Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов [Текст] : учебное пособие / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.
2. Шварц, О. Переработка пластмасс [Текст] / О. Шварц, Ф.-В. Эбелинг, Б. Фурт; под общ. ред. А. Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 с.
3. Раувендаль, К. Экструзия полимеров [Текст] / К. Раувендаль; под ред. А. Я. Малкина. Пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
4. Микаэли, В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкция и технические расчеты [Текст] / В. Микаэли; под ред. В. П. Володина. Пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.

Кроме обязательного списка литературы, привести литературные источники и ссылки на интернет-сайты, использованные при работе над курсовым проектом.

Пример оформления титульного листа

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Институт технологии
Кафедра физической и коллоидной химии

Курсовой проект

Дисциплина: Основы проектирования и оборудования производства
пластиков

Тема: Проектирование и расчет экструдера

Вариант № ...

Выполнил: студент группы 146

.....

Руководитель:

.....

Санкт-Петербург

20...

Варианты заданий к курсовому проекту

№ вари- анта	Параметры изделия		Параметры формующей головки						Параметры шнека		
	<i>A</i> , <i>мм</i>	<i>B</i> , <i>мм</i>	<i>d</i> ₁ , <i>мм</i>	<i>d</i> ₂ , <i>мм</i>	<i>L</i> ₁ , <i>мм</i>	<i>L</i> ₂ , <i>мм</i>	<i>L</i> ₃ , <i>мм</i>	<i>L</i> ₄ , <i>мм</i>	<i>D</i> , <i>мм</i>	<i>n</i> , 1/ <i>c</i>	<i>t</i> , <i>мм</i>
1	5	10	45	24	16	82	51	31	45	2.50	50
2	6	12	45	22	16	84	52	32	45	2.40	52
3	7	13	63	33	17	86	53	33	63	2.25	70
4	7	14	63	34	17	88	54	34	63	2.20	75
5	8	15	63	35	18	90	55	35	63	2.15	80
6	8	16	63	36	18	92	56	36	63	2.10	85
7	9	17	63	37	19	94	57	37	63	2.00	90
8	9	18	90	43	19	96	58	38	90	2.00	95
9	10	19	90	44	20	98	59	39	90	1.95	100
10	10	20	90	45	20	100	60	40	90	1.90	105
11	11	21	90	46	21	102	61	41	90	1.85	110
12	12	22	125	60	22	104	62	42	125	1.80	120
13	13	23	125	62	23	106	63	43	125	1.75	130
14	14	24	125	64	24	108	64	44	125	1.70	140
15	15	25	125	66	25	110	65	45	125	1.65	150
16	16	26	160	72	26	112	66	46	160	1.60	160
17	17	27	160	74	27	114	67	47	160	1.55	165
18	18	28	160	76	28	116	68	48	160	1.50	170
19	19	29	160	78	29	118	69	49	160	1.45	175
20	20	30	160	80	30	120	70	50	160	1.40	180
21	21	31	160	82	31	122	71	51	160	1.35	185
22	22	32	160	84	32	124	72	52	160	1.30	190
23	23	33	200	90	33	126	73	53	200	1.45	195
24	24	34	200	92	34	128	74	54	200	1.40	200
25	25	35	200	94	35	130	75	55	200	1.35	210
26	26	36	200	96	36	132	76	56	200	1.30	215
27	27	37	200	98	37	134	77	57	200	1.25	220
28	28	38	200	100	38	136	78	58	200	1.20	225
29	29	39	200	102	39	138	79	59	200	1.15	230
30	30	40	200	104	40	140	80	60	200	1.10	235

Сборочный чертеж

[illegible]

**Реологические кривые расплава полипропилена при температурах
190, 210, 230 и 250 °С.**

