

# РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСТРУДЕРОВ

# РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ШНЕКА И ЧАСТОТЫ ЕГО ВРАЩЕНИЯ

В качестве исходного параметра для расчета задается диаметр шнека  $D$ . Если он не задан, то его можно взять из технической характеристики предварительно выбранной технологической линии для производства изделия или ориентировочно рассчитать по соотношению (в мм).

$$Q = 0,68D^{2,5}, \quad (2.1)$$

где  $Q$  – объемная производительность, мм<sup>3</sup>/с.

Полученное значение диаметра шнека округляют до ближайшего большего числа из стандартного ряда диаметров шнеков для конкретного вида полимерного материала. После выбора диаметра и отношения  $L/D$  приступают к определению остальных параметров.

Шаг нарезки  $t$  и глубина витка  $h$  существенным образом влияют на производительность шнековой машины. Шаг витка в зоне загрузки в основном зависит от коэффициента трения материала о шнек и стенки материального цилиндра и от вида загружаемого материала (гранулы, порошок). Для идеального шнека оптимальным углом наклона нарезки был бы угол  $45^\circ$ , соответствующий шагу  $h = \pi D$ .

В действительности значения коэффициента трения материала о шнек находятся в пределах  $0,3...0,6$ . Значение коэффициента трения  $0,5$  соответствует углу наклона нарезки шнека  $19^\circ$ , т. е. шагу  $1,1D$ . В большинстве случаев для зоны загрузки рекомендуется принимать шаг от  $0,7$  до  $1,5D$ .

Для зоны дозирования оптимальным является угол наклона нарезки  $30^\circ$ , что соответствует шагу нарезки  $1,8D$ , однако это значение является слишком высоким, так как шнеки с большим шагом и большой глубиной очень чувствительны к изменению давления, температуры и вязкости материала. На практике шаг винтовой нарезки  $t$  для машин по переработке пластмасс рекомендуется принимать постоянным по длине шнека.

$$t = (0,8...1,2)D \quad (2.2)$$

Обычно шаг принимается равным диаметру шнека, т. е.  $t = D$ , что соответствует углу подъема винтового канала  $17^{\circ}42'$ . В этом случае обеспечивается не только достаточно хорошее питание машины материалом, но и существенно упрощается технология изготовления шнека.

Для обеспечения высоких степеней сжатия материала могут применяться шнеки с переменным по длине шагом нарезки.

Рекомендации по выбору глубины винтового канала, в зависимости от свойств перерабатываемого сырья, сводятся в каждом отдельном случае к чувствительности материала к перегреву.

Глубина винтового канала шнеков  $h$  для переработки пластических масс принимается равной:

1) в зоне питания (загрузки)

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16)D; \quad (2.3)$$

2) в зоне дозирования

где степень сжатия материала  $i$  принимают по табл. 2;

3) в зоне пластикации (сжатия)

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0, \quad (2.5)$$

$$L_0 = L - L_n, \quad (2.6)$$

где  $L$  – длина шнека, см;  $L_0$  – длина шнека до зоны сжатия, см;  $L_n$  – длина напорной части шнека, см,

$$L_n = (0,4 \dots 0,6)L. \quad (2.7)$$

При выборе толщины витка  $e$  (ширины гребня) необходимо учитывать, что увеличение толщины витка приводит к повышению расхода мощности, а уменьшение ее - к образованию значительного потока утечки через зазор между внутренней поверхностью материального цилиндра и наружной поверхностью витка шнека. Ширину гребня витка

а шнека рекомендуется принимать равной

$$e = (0,06 \dots 0,1)D. \quad (2.8)$$

Меньшие значения принимаются для диаметров шнека более 125 мм, большие - менее 125 мм.

Радиальный зазор между внутренней поверхностью материального цилиндра и наружной поверхностью витка шнека рекомендуется принимать

При этом меньшие значения принимаются для больших величин диаметров шнеков.

Частота вращения шнека существенно влияет на производительность шнековых машин. Ее рост происходит до определенного значения частоты вращения шнека (критического), выше которого начинается неустановившееся движение материала (частицы материала прекращают двигаться в осевом направлении, а лишь вращаются вместе со шнеком). Это приводит к уменьшению производительности, увеличению потребляемой мощности и повышенному износу рабочих частей машины.

Критическая частота вращения шнека в зоне загрузки шнековой машины может быть определена по следующему соотношению

где  $D$  - диаметр шнека, м.

В зонах сжатия и дозирования допускаемую частоту вращения шнеков значительно уменьшают для соблюдения допускаемой температуры нагрева материалов, невозникновения их термомеханической деструкции (для термопластов) и преждевременной вулканизации (для резиновых смесей).

Рабочая частота вращения шнека равна

где нижние значеи

малых диаметров шнеков, верхние  $\square$  для больших значений. На практике частота вращения находится в пределах от 0,08 до 4,2

В последнее время начали применять адиабатические (автотермические) шнековые  $\text{с}^{-1}$  ины со скоростями вращения до 8,4

$\text{с}^{-1}$ .

# РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОДНОШНЕКОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ

Определяющее влияние на производительность машины оказывает дозирующая зона шнека. Эффективность дозирующей зоны сильно зависит от геометрических параметров самого шнека. Отдача же шнекового экструдера в целом зависит не только от геометрических размеров шнека и числа оборотов, но и в значительной степени от конструкции формующей головки.

На основе гидродинамического подхода к анализу взаимодействия рабочих органов с перерабатываемым материалом в дозирующей зоне экструдера принято рассматривать три составляющие потока движения расплава: 1) поток расплава, движущийся по межвитковому пространству в направлении от зоны загрузки к зоне дозирования вдоль оси шнека; возникает вследствие вращения шнека относительно цилиндра;

2) поток расплава, движущийся в противоположном направлении, что вызвано перепадом давления  $P$  по длине шнека;

3) поток утечки, движущийся в зазоре между наружной поверхностью витков шнека и внутренней поверхностью материального цилиндра в направлении от зоны дозирования.

Подобное разделение на три потока в канале шнека следует считать условным, так как противотока практически не существует, а имеет место некоторое ограничение прямого потока, возникающее в результате сопротивления головки.

Объемная производительность шнековой машины для переработки термопластов, в зависимости от сопротивления головки и конструкции дозирующей зоны, может быть выражена соотношениями:

Значения постоянных прямого потока  $A$ , обратного  $B$  и потока утечек  $C$  определяются следующим образом.



Для шнека с переменной глубиной нарезки:

$$A_1 = \frac{\pi^3(t - \lambda e)\sigma}{a + t^2 b}; \quad (2.18)$$

$$B_1 = \frac{\pi t(t - \lambda e)}{12L_n(a + t^2 b)}; \quad (2.19)$$

$$C_1 = \frac{\pi D \delta^3 t^2}{10eL_n \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}, \quad (2.20)$$

где  $\sigma$ ,  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, характеризующие конструкцию шнека с переменной глубиной нарезки. Они определяются по следующим соотношениям ( $1/\text{см}^2$ ,  $1/\text{см}^4$ ):

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2 h_3}; \quad (2.21)$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2 h_3} \left[ \frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2 h_3} - 1 \right]; \quad (2.22)$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)} + \frac{2h_2 h_3 + (h_2 + h_3)D}{2D^2 h_2^2 h_3^2}, \quad (2.23)$$

где  $d_1$  – диаметр сердечника (вала) шнека под загрузочной воронкой, см:

$$d_1 = D - 2h_1; \quad (2.24)$$

$d_3$  – диаметр сердечника шнека в зоне дозирования, см:

$$d_3 = D - 2h_3. \quad (2.25)$$

Для шнека с переменным шагом нарезки:

$$A_2 = \frac{\pi^3 D (D-h)^2 h J_1}{4\pi^2 (D-h)^2 J_2 - J_3}; \quad (2.26)$$

$$B_2 = \frac{\pi h^3 (D-h) \Delta t}{3[4\pi^2 (D-h)^2 J_2 - J_3]}; \quad (2.27)$$

$$C_2 = \frac{\pi D^2 \delta^3 \Delta t}{5e(D-h)[\pi(D-h)J_4 + \Delta t J_5]}, \quad (2.28)$$

где  $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5$  – коэффициенты, характеризующие конструкцию шнека с переменным шагом нарезки. Они определяются по следующим соотношениям (см, см<sup>2</sup>):

$$J_1 = t_1 - t_3 + 2,3\Delta t \lg \frac{t_1}{t_3}, \quad (2.29)$$

$$J_2 = \frac{2,3}{2e} \left[ (2e + \Delta t) \lg i - \Delta t \lg \frac{t_1}{t_3} \right]; \quad (2.30)$$

$$J_3 = (t_1 - t_3)(t_1 + t_3 + 2\Delta t + 6e) + 4,6e(\Delta t + 2e) \lg i, \quad (2.31)$$

$$J_4 = 2,3 \lg \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\varphi_3}{2}} + 2 \frac{\sin \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2}}{\cos \varphi_1 \cos \varphi_3}; \quad (2.32)$$

$$J_5 = 2 \frac{\cos \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2}}{\sin \varphi_1 \sin \varphi_3} - 2,3 \frac{\operatorname{tg} \frac{90 - \varphi_1}{2}}{\operatorname{tg} \frac{90 - \varphi_3}{2}}, \quad (2.33)$$

где  $\Delta t$  – разность между соседними шагами. Если параметры шнека известны из его чертежа, то  $\Delta t$  рассчитывают по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_3}{m - 1}, \quad (2.34)$$

где  $t_1$  – шаг нарезки шнека у загрузочной воронки, см. Если он неизвестен, можно выбрать из соотношения  $t_1 = (0,75 \dots 1,25)D$ ;

$t_3$  – шаг нарезки в конце шнека, см. Если он неизвестен из чертежа шнека, можно рассчитать по следующей формуле при заданной степени сжатия  $i$ :

$$t_3 = \frac{t_1 + e(i-1)}{i}, \quad (2.35)$$

$$m = \frac{2L_n}{t_1 + t_3}, \quad (2.36)$$

где  $m$  – число шагов в напорной части шнека.

Здесь длина напорной части шнека  $L_n$  (длина зоны, в которой материал находится в расплавленном состоянии) рассчитывается:

$$L_n = (0,65 \dots 0,75)L.$$

$\Delta t$  можно также вычислить по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1^2 - t_3^2}{2L_n - t_1 - t_3}. \quad (2.37)$$

Угол подъема винтовой линии в зоне загрузки  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{t_1}{2\pi R_{cp}}. \quad (2.38)$$

Угол подъема винтовой линии в зоне дозирования  $\varphi_3$ :

$$\varphi_3 = \arctg \frac{t_3}{2\pi R_{\text{cp}}}. \quad (2.39)$$

Средний радиус  $R_{\text{cp}}$  рассчитывается:

$$R_{\text{cp}} = (D - h)/2,$$

Для шнека с переменным шагом угол подъема винтовой линии  $\varphi_i$  является переменной величиной и может быть найден из формулы:

$$\text{tg}\varphi_i = \frac{t_i}{\pi D}. \quad (2.40)$$

Объемную производительность экструдера  $Q$ , см<sup>3</sup>/мин пересчитывают в массовую часовую производительность по формуле (кг/ч):

$$Q_{\text{ч}} = \frac{60Q\rho_{\text{p}}}{10^6}, \quad (2.41)$$

где  $\rho_{\text{p}}$  – плотность расплава полимера при температуре переработки (на выходе из экструдера), кг/м<sup>3</sup>.

Плотность расплава полимеров при различных температурах приведена в прил. 2.

# РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В ФОРМУЮЩЕЙ ГОЛОВКЕ

*Головка экструдера* – это съемный технологический инструмент, предназначенный для оформления экструдированного расплава в погонажное изделие, конфигурация поперечного сечения которого определяется геометрией формующего канала (щели, фильеры).

Конструкции формующих головок характеризуются значительным разнообразием.

*По направлению потока расплава* головки могут быть прямоточными и угловыми. В последних происходит поворот расплава, и изделие выходит из головки под определенным углом к оси входного потока.

*По конфигурации формующей щели* различают головки плоскощелевые, кольцевые (трубные, рукавные), профильные.

*По форме профиля* – головки для изделий открытого типа (листы, плоские пленки, стержни, уголки, швеллера и др.), закрытого типа (рукава, трубы, шланги, трубчатые уплотнители), смешанного типа и специальные головки (сложные профили, армированные, комбинированные, гибридные изделия).



*По величине давления* различают головки низкого (до 4 МПа), среднего (до 10 МПа) и высокого (более 10 МПа) давления.

При всем разнообразии конструкционного оформления в большинстве формующих головок можно выделить наличие общих элементов (рис. 4).

К ним относятся: корпус *1* с элементом присоединения к цилиндру экструдера (это может быть фланцевое, байонетное или резьбовое соединение); адаптер *2*; фильтр-решетка *3*; кольцевые зонные электронагреватели *7*; регулировочное кольцо *5* (губка в плоскощелевых головках). В головках закрытого типа обязательно присутствует дорн *4* с дорнодержателем *6* и нередко система *5* для подачи воздуха внутрь изделия (труба, пленочный рукав, закрытый профиль).

Поверхность рабочих каналов головки, кроме ее формующей зоны, может быть гладкой или с винтовой нарезкой, позволяющей улучшить процесс гомогенизации расплава.

Основной геометрической характеристикой формующей головки является ее общий коэффициент сопротивления  $K_r$ , определяемый как сумма коэффициентов сопротивления отдельных простых по геометрии участков  $k_1, k_2 \dots k_i$  с помощью уравнения:

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}}, \quad (2.42)$$

где  $k_1, k_2 \dots k_i$  – частные коэффициенты сопротивления участков канала с простой геометрической формой, определяемые по формулам, приведенным в табл. 5.

При расчете  $K_r$  головку условно разбивают на участки, отличающиеся конфигурацией, и для каждого участка определяют частный коэффициент сопротивления. Применительно к прямоточной рукавной головке, изображенной на рис. 4, эта операция будет выглядеть следующим образом (рис. 5).



Обычно на пути течения расплава полимера на выходном конце шнека устанавливаются фильтровальные элементы, чаще всего в виде пакета сеток из нержавеющей стали. Фильтрующие элементы устанавливаются непосредственно перед входом в головку и предназначены для очистки расплава от различного рода твердых включений, неизбежно попадающих в материал на различных стадиях его производства и транспортировки, а также от не полностью расплавленных в канале червяка частиц материала, которые иногда появляются на выходе из этого канала при работе экструдера с максимальной производительностью на некоторых типах материалов (например, на высокомолекулярном полиэтилене высокой плотности). Обычно применяется набор сеток с различным числом отверстий на единицу площади (табл. 2), причем сетки с меньшим числом отверстий располагают дальше от конца шнека, чтобы избежать выдавливания их вместе с расплавом.

На современных экструдерах устанавливают сито-сменные фильтровальные устройства с общей площадью фильтрующего комплекта 500...2000 см<sup>2</sup> и числом фильтровальных элементов  $n = 5...20$ .

Весь набор сеток поддерживается решеткой, устанавливаемой между цилиндром и головкой, служащей для спрямления потока расплава, выходящего с последнего витка шнека. Она представляет собой стальной диск толщиной примерно 1/5 диаметра цилиндра. В этом диске просверлены отверстия диаметром по 3...6 мм. На рис. 6 показаны решетки нескольких конструкций.

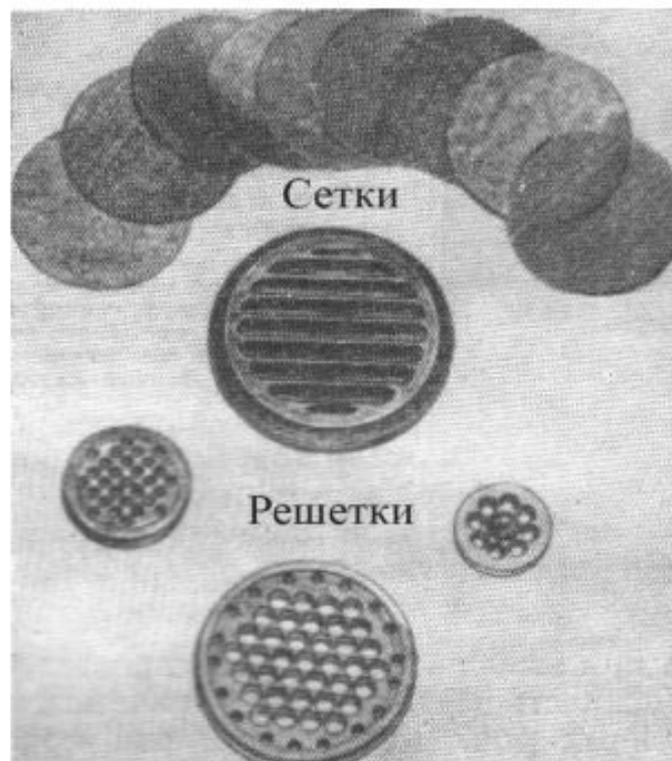


Рис. 2.3. Решетки и сетки различных типов

При производстве листов или пленок через плоскощелевую головку используется решетка с отверстиями в виде узких щелей (в центре рисунка), которые должны быть расположены параллельно плоскости щели головки. При расчете коэффициента сопротивления в головке сопротивления в решетке и фильтре также должны учитываться. Коэффициент сопротивления решетки, см<sup>3</sup>:

$$K_p = \frac{\pi z d_o^4}{128 \delta_p}, \quad (2.43)$$

$$\gamma = \frac{32Q}{\pi z d_p^3}, \quad (2.44)$$

где  $z$  – число отверстий в решетке;

$d_o$  – диаметр отверстий, см;

$\delta_p$  – толщина решетки, см.



$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D n}{h_{\text{ср}}},$$

где  $h_{\text{ср}} = (h_2 + h_3)/2$ ; (2.48)  
 для шнека с переменным шагом

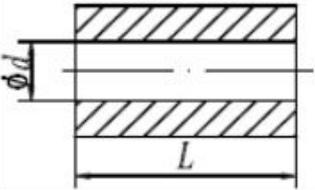
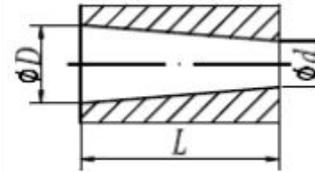
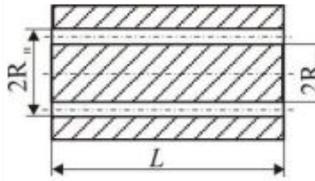
$$\dot{\gamma} = \frac{\pi^2 (D - h) dn}{30h \sqrt{4\pi^2 d^2 + (t_2 + t_3)^2}},$$

где  $d = D - 2h$ . (2.49)

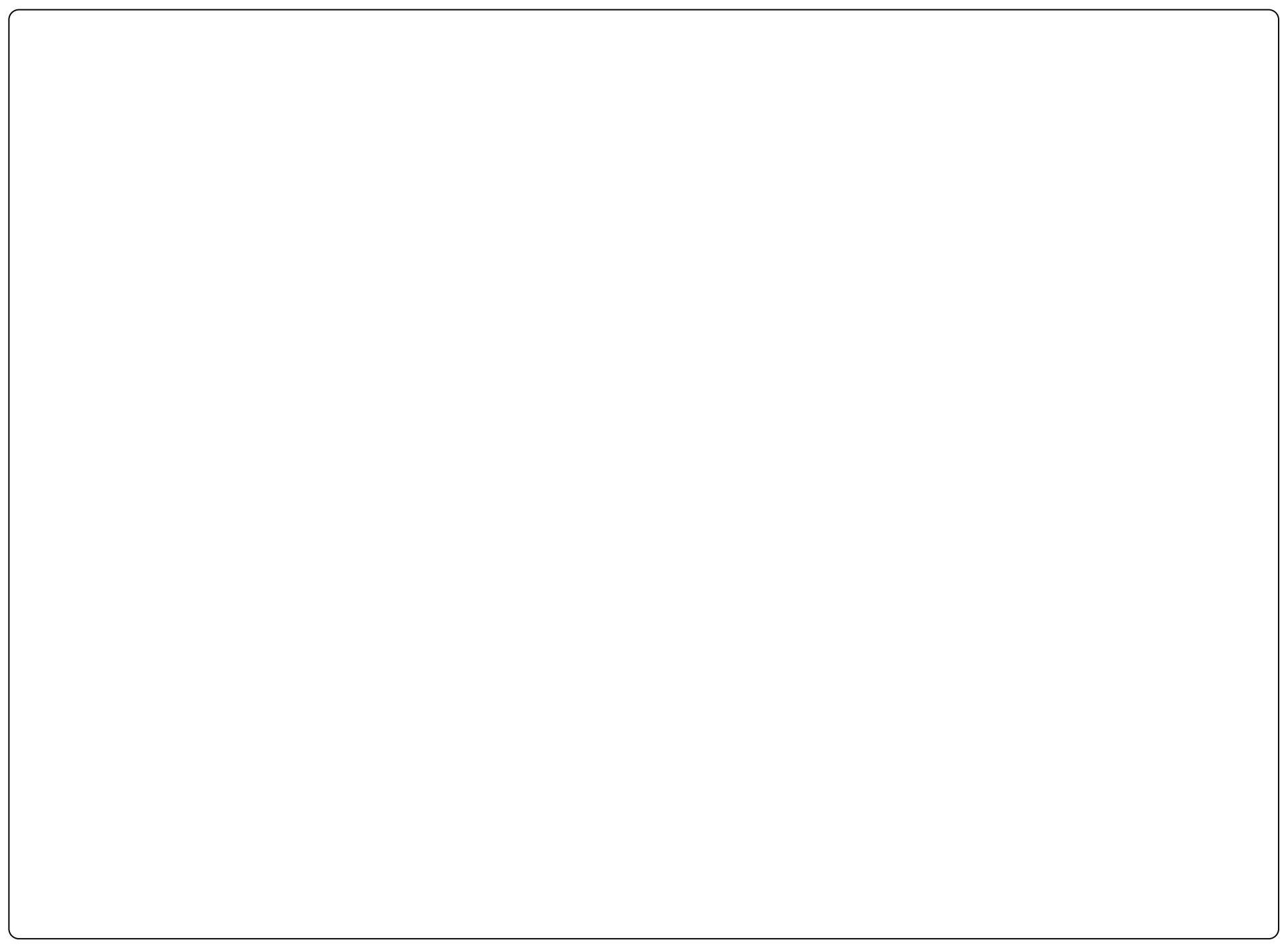
Зная скорость сдвига расплава и температуру переработки, эффективную вязкость можно определить по логарифмической зависимости эффективной вязкости от градиента скорости сдвига:  $\lg \eta = f(\lg \dot{\gamma})$ .

Таблица 3

Расчетные формулы и схемы для расчета коэффициента сопротивления  
и скорости сдвига простейших каналов\*

Тип канала	Расчетная схема	Коэффициент сопротивления $K$ , см <sup>3</sup>	Скорость сдвига расплава, $\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>	Номер формулы
Цилиндрический круглый		$\frac{\pi d^4}{128L}$ где $d$ – диаметр канала	$\frac{32Q}{\pi d^3}$	(2.50)
Конический круглый		$\frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)}$ где $D, d$ – диаметры конуса на входе и выходе расплава	$\frac{256Q}{\pi(D + d)^3}$	(2.51)
Кольцевой цилиндрический		$\frac{\pi}{8L} \left[ R_H^4 - R_B^4 - \frac{(R_H^2 - R_B^2)^2}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \right]$ где $R_H, R_B$ – наружный и внутренний радиусы	$\frac{6Q}{\pi(R_H + R_B)(R_H - R_B)^2}$	(2.52)

\*  $L$  – длина канала;  $Q$  – производительность, см<sup>3</sup>/с; все размеры в см.



На рис. 7 приведена в графическом виде зависимость  $\lg \eta = f(\lg \dot{\gamma})$  для ПЭНП, а также ее математическое выражение.

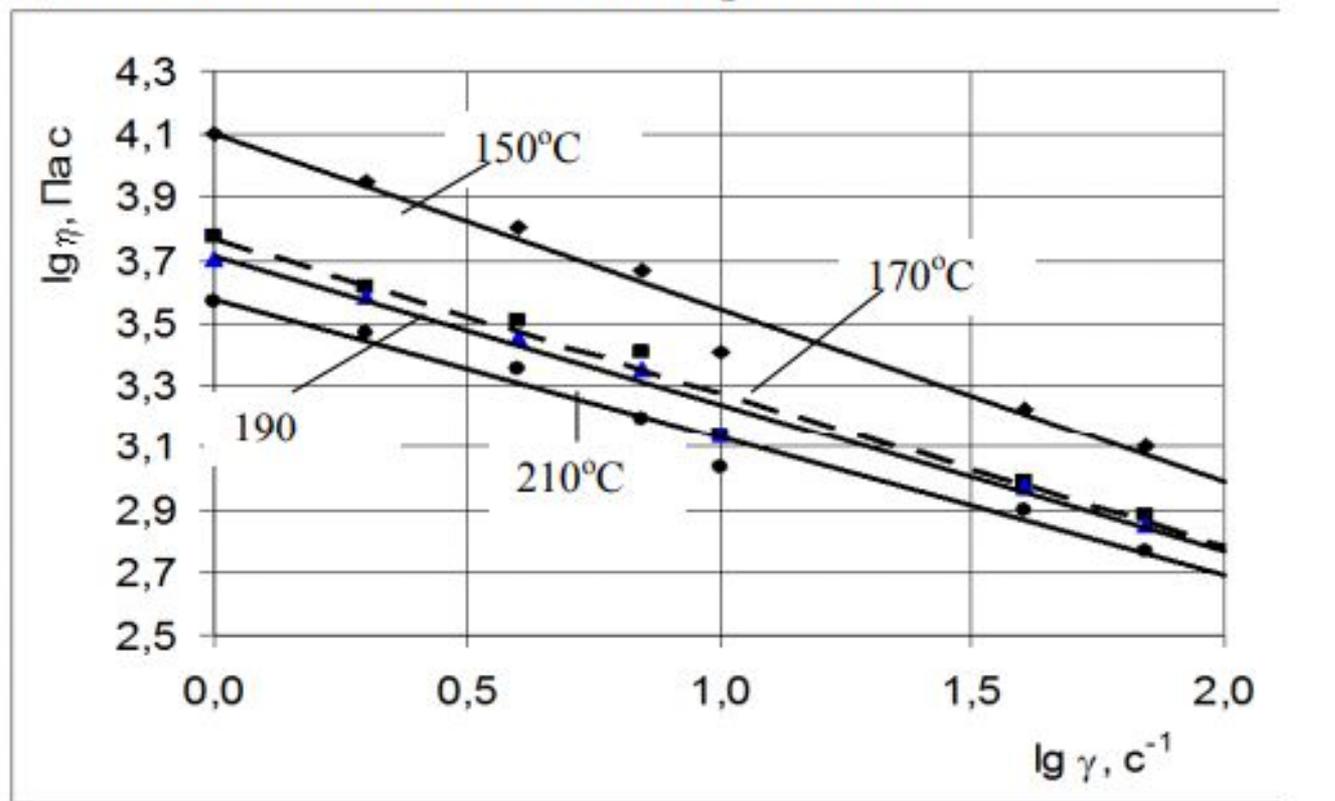


Рис. 7. Зависимость вязкости ПЭНП от градиента скорости сдвига при различных температурах

$$150^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,558 \lg \dot{\gamma} + 4,102; \quad 170^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,495 \lg \dot{\gamma} + 3,769;$$

$$190^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,475 \lg \dot{\gamma} + 3,713; \quad 210^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,444 \lg \dot{\gamma} + 3,577.$$

Для других полимеров соответствующие уравнения приведены в табл. 4.

Значения коэффициентов  
 в уравнении зависимости эффективной вязкости расплава  
 от скорости сдвига для различных полимеров  $\lg \eta = -A \lg \dot{\gamma} + B$

Полимер	Температура, °С	<i>A</i>	<i>B</i>
ПЭВП	150	0,556	4,028
	170	0,520	3,848
	190	0,503	3,732
	210	0,489	3,638
Полипропилен	190	0,751	4,591
	210	0,742	4,483
	230	0,736	4,415
	250	0,711	4,284
Полиамид	160	0,301	3,619
	180	0,007	3,375
Полистирол	180	0,774	4,697
	200	0,709	4,455
	220	0,684	4,270
	240	0,672	4,167

Температуру расплава полимеров в различных участках экструдера можно найти по табл. 5.

Таблица 5

Режимы переработки полимеров экструзией

Материал	Изделие	Температура, °С						Давление (бар)
		Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Головка	Фильера	
АБС	Трубы, листы, профили	175	195	205	205	200	210	150...200
		170	175	180	180	180	190	200...250
ПЭНП (ПЭВД)	Трубы, пустотелые корпуса	125	125	130	130	130	135	100...150
	Пленка, получаемая	125	135	135	145	145	145	100...170
	Плоская пленка	155	165	180	195	195	200	150...250
	Изоляция проводов	160	210	230	240	230	235	250...350
	Мононити	160	200	220	240	230	240	250...350
ПЭВП (ПЭНД)	Трубы, пустотелые корпуса	140	160	165	165	165	170	100...170
	Листы	220	190	170	165	165	170	100...170
	Пленка, получаемая экструзией с раздувом	140	160	170	180	180	185	150...200
	Изоляция проводов	200	210	240	250	240	245	250...400
	Мононити	200	210	240	250	240	250	250...400
Полипропилен	Трубы	180	200	215	225	225	235	150...200
	Плоские пленки	190	220	245	265	265	265	200...300
	Мононити	200	230	250	270	270	270	300...400



ПВХ вини- пласт (грану- лят)	Трубы, профили, плиты	155	165	175	190	180	185	100...200
Поли- амид	Шланги	275	245	235	225	225	225	150...250
	Оплетенная прово- лока	260	270	280	290	290	300	250...300
	Нити, монопнити	265	275	290	300	300	300	250...350
ПММА	Плиты	160	165	170	170	170	180	50...100
ПФ	Трубы, профили	170	190	205	200	200	200	50...100

Важной технологической характеристикой является максимальное давление расплава ( $P_m$ , Па), от которого зависит качество экструдата и производительность машины.

Величину  $P_m$  можно подсчитать по формуле (2.56):

$$P_m = \frac{\pi D L_d \eta n}{h_{cp}^2 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (2.56)$$

где  $L_d$  – длина зоны дозирования, см (см. табл. 1). Остальные обозначения в формуле даны выше.

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

*Пример 1. Рассчитать коэффициент сопротивления формующей головки, представленной на рис. 8. Диаметр шнека – 90 мм.*

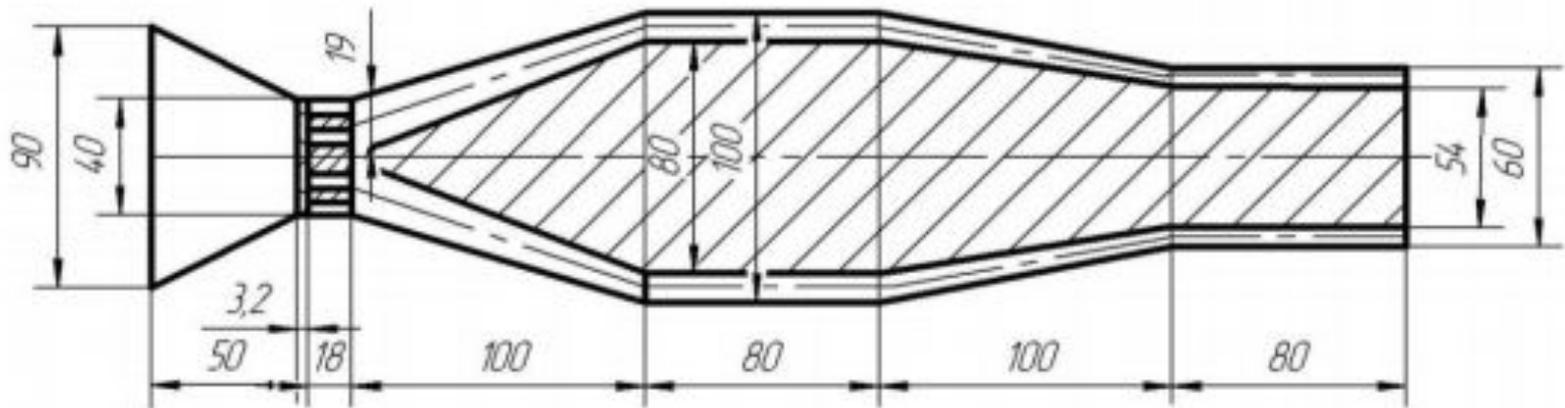


Рис. 8. Компоновка каналов экструзионной трубной головки

В схеме головки на рис. 8 можно выделить следующие элементы:

1) участок адаптера: конический круглый канал с большим диаметром на входе;  $D = 9$  см;  $d = 4$  см;  $L = 5$  см; коэффициент сопротивления адаптера находим по формуле (2.51) ( $\text{см}^3$ ):

$$K_1 = \frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)} = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 9^3 \cdot 4^3}{128 \cdot 5(9^2 + 9 \cdot 4 + 4^2)} = 5,16;$$

2) участок фильтра: по табл. 2 выбираем среднюю сетку с диаметром проволоки  $d = 0,16$  мм и размером ячеек  $d_o = 0,25$  мм =  $0,025$  см; число сеток принимаем  $n = 10$ ; площадь фильтровального элемента  $F = \pi r^2 = 3,14 \cdot 2^2 = 12,56$   $\text{см}^2$ ; толщина фильтрующих элементов  $\delta_\phi = 2dn = 2 \cdot 0,16 \cdot 10 = 3,2$  мм =  $0,32$  см; коэффициент сопротивления сетчатого фильтра рассчитывается по формуле (2.45) ( $\text{см}^3$ ):

$$K_2 = \frac{nFd_o^2}{32\delta_\phi} = \frac{10 \cdot 12,56 \cdot 0,025^2}{32 \cdot 0,32} = 0,0077;$$

3) участок решетки: толщину решетки принимаем равной  $\delta_p = 1,8$  см ( $1/5$  диаметра шнека); число отверстий в решетке принимаем  $z = 30$ , диаметр отверстий  $d_o = 0,3$  см; коэффициент сопротивления решетки рассчитывается по формуле (2.43) ( $\text{см}^3$ ):

$$K_3 = \frac{\pi z d_o^4}{128\delta_p} = \frac{3,14 \cdot 30 \cdot 0,3^4}{128 \cdot 1,8} = 0,0033;$$

4) кольцевой конический канал с большим диаметром на выходе: толщина щели на входе  $\delta_1 = 1,9$  см, на выходе  $\delta_2 = (10 - 8)/2 = 1$  см; средний радиус конуса: на входе  $R_1 = 20 - 19/2 = 10,5$  мм = 1,05 см, на выходе  $R_2 = 40 + 10/2 = 45$  мм = 4,5 см;  $L = 10$  см; коэффициент сопротивления канала рассчитывается по формуле (2.53) ( $\text{см}^3$ ):

$$K_4 = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6Lm} = \frac{3,14(1,05 \cdot 1 - 4,5 \cdot 1,9)}{6 \cdot 10 \cdot (-1,02)} = 0,384;$$

$$m = \frac{2,3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2} =$$

$$= \frac{2,3(1,05 - 4,5)^2}{(1,05 \cdot 1 - 4,5 \cdot 1,9)^2} \lg \frac{1,05 \cdot 1}{4,5 \cdot 1,9} - \frac{(1,05 - 4,5)(1,9 - 1)}{(1,05 \cdot 1 - 4,5 \cdot 1,9)1,9 \cdot 1} - \frac{1,9^2 - 1^2}{2 \cdot 1,9^2 \cdot 1^2} = -1,02;$$

5) кольцевой цилиндрический канал:  $R_n = 5$  см,  $R_b = 4$  см,  $L = 8$  см; коэффициент сопротивления канала рассчитывается по формуле (2.52) ( $\text{см}^3$ ):

б) кольцевой конический канал с большим диаметром на входе: толщина щели на входе  $\delta_1 = 1$  см, на выходе  $\delta_2 = (60 - 54)/2 = 3$  мм = 0,3 см; средний радиус конуса: на входе  $R_1 = 4,5$  см, на выходе  $R_2 = 2,85$  см;  $L = 10$  см; коэффициент сопротивления канала находим по формуле (2.53) ( $\text{см}^3$ ):

$$K_6 = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6Lm} = \frac{3,14(4,5 \cdot 0,3 - 2,85 \cdot 1)}{6 \cdot 10 \cdot (-3,39)} = 0,0231;$$

$$m = \frac{2,3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2} =$$

$$= \frac{2,3(4,5 - 2,85)^2}{(4,5 \cdot 0,3 - 2,85 \cdot 1)^2} \lg \frac{4,5 \cdot 0,3}{2,85 \cdot 1} - \frac{(4,5 - 2,85)(1 - 0,3)}{(4,5 \cdot 0,3 - 2,85 \cdot 1)1 \cdot 0,3} - \frac{1^2 - 0,3^2}{2 \cdot 1^2 \cdot 0,3^2} = -3,39;$$

7) формирующий кольцевой цилиндрический канал:  $R_H = 3$  см,  $R_B = 2,7$  см,  $L = 8$  см; коэффициент сопротивления канала рассчитывается по формуле (2.52) ( $\text{см}^3$ ):

$$K_7 = \frac{\pi}{8L} \left[ R_H^4 - R_B^4 - \frac{(R_H^2 - R_B^2)^2}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \right] = \frac{3,14}{8 \cdot 8} \left[ 3^4 - 2,7^4 - \frac{(3^2 - 2,7^2)^2}{\ln \frac{3}{2,7}} \right] = 0,005;$$

8) общий коэффициент сопротивления головки ( $\text{см}^3$ ):

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5} + \frac{1}{K_6} + \frac{1}{K_7}} = \frac{1}{\frac{1}{5,16} + \frac{1}{0,0077} + \frac{1}{0,0033} + \frac{1}{0,384} + \frac{1}{0,295} + \frac{1}{0,0231} + \frac{1}{0,005}} = 1,47 \cdot 10^{-3};$$

**Пример 2.** Рассчитать производительность экструдера, перерабатывающего ПЭНП (труба). Шнек экструдера имеет постоянный шаг и переменную глубину нарезки. Формующая головка – по примеру 1.

Исходные данные:  $D = 90$  мм;  $\lambda = 1$ ;  $K = 1,47 \cdot 10^{-3}$  см<sup>3</sup>.

Решение:

1. По формулам (2.2), (2.3), (2.8), (2.9) принимаем:

1) шаг нарезки

$$t = D = 9 \text{ см};$$

2) глубину винтового канала шнека в зоне питания

$$h_1 = 0,13D = 0,13 \cdot 9 = 1,17 \text{ см};$$

3) ширину гребня витка шнека

$$e = 0,09D = 0,9 \cdot 9 = 0,81 \text{ (см)};$$

4) радиальный зазор между внутренней поверхностью материального цилиндра и наружной поверхностью витка шнека:

$$\delta = 0,003D = 0,003 \cdot 9 = 0,027 \text{ (см)}.$$

2. Отношение  $L/D$  принимаем стандартным:

$$L/D = 25.$$

Длина шнека

$$L = 25D = 25 \cdot 9 = 225 \text{ см.}$$

3. Степень сжатия по табл. 2 принимаем  $i = 3,7$ .

4. Определяем остальные геометрические параметры шнека:

1) глубину спирального канала в зоне дозирования находим по формуле (2.4) (см):

$$h_3 = 0,5 \left[ D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right] = 0,5 \left[ 9 - \sqrt{9^2 - \frac{4 \cdot 1,17}{3,7}(9 - 1,17)} \right] = 0,284;$$

2) глубину спирального канала в зоне пластикации (сжатия) рассчитывается по формуле (2.5) (см):

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0 = 1,17 - \frac{1,17 - 0,284}{225} 112,5 = 0,727,$$

$$\text{е } L_0 = L - L_{\text{н}} = 225 - 112,5 = 112,5 \text{ см (см. (2.6));}$$

$$L_{\text{н}} = (0,4 \dots 0,6)L = 0,5 \cdot 225 = 112,5 \text{ см (см. (2.7));}$$

3) среднюю глубину нарезки в напорной зоне шнека рассчитывается по формуле (2.48) (см):

$$h_{\text{ср}} = (h_2 + h_3)/2 = (0,727 + 0,284)/2 = 0,506;$$

4) угол подъема винтовой линии нарезки определяется по формуле (град):

$$\varphi = \arctg(t/\pi D) = \arctg(9/3,14 \cdot 9) = 17,6;$$

4) угол подъема винтовой линии нарезки определяется по формуле (град):

$$\varphi = \operatorname{arctg}(t/\pi D) = \operatorname{arctg}(9/3,14 \cdot 9) = 17,6;$$

5) диаметр сердечника (вала) шнека у загрузочной воронки по формуле (2.24) (см):

$$d_1 = D - 2h_1 = 9 - 2 \cdot 1,17 = 6,66;$$

6) диаметр сердечника (вала) шнека в зоне дозирования рассчитывается по формуле (2.25) (см):

$$d_3 = D - 2h_3 = 9 - 2 \cdot 0,284 = 8,432.$$

5. Вычисляем коэффициенты геометрических параметров шнека по формулам с (2.21) по (2.23) ( $1/\text{см}^2$ ,  $1/\text{см}^4$ ):

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2h_3} = 1 - \frac{6,9 \cdot 9}{2(0,727 - 0,284)} \lg \frac{0,727}{0,284} + \frac{9^2}{2 \cdot 0,727 \cdot 0,284} = 168,54;$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left[ \frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right] = \frac{3,14}{0,727 \cdot 0,284} \left[ \frac{9(0,727 + 0,284)}{2 \cdot 0,727 \cdot 0,284} - 1 \right] = 1004,49;$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)} + \frac{2h_2h_3 + (h_2 + h_3)D}{2D^2h_2^2h_3^2} =$$

$$= \frac{2,3}{(0,727 - 0,284)} \lg \frac{0,727(9 + 8,432)}{0,284(9 + 6,66)} + \frac{2 \cdot 0,727 \cdot 0,284 + (0,727 + 0,284)9}{2 \cdot 9^2 \cdot 0,727^2 \cdot 0,284^2} = 3,74.$$



7. Вычисляем производительность экструдера:

1) объемную (2.13) ( $\text{см}^3/\text{мин}$ ):

$$Q = \frac{A_1 K}{K + B_1 + C_1} n = \frac{32,68 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3}}{1,47 \cdot 10^{-3} + 1,31 \cdot 10^{-4} + 4,79 \cdot 10^{-5}} 56 = 1633;$$

Рабочую частоту вращения шнека находим по формулам (2.10), (2.11) ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$n_{\text{ш}} = \frac{42,4}{60\sqrt{D}} = \frac{42,4}{60\sqrt{0,9}} = 2,35,$$

$$n = 0,7n_{\text{кр}} = 0,4 \cdot 2,35 = 0,94 \text{ с}^{-1} = 56 \text{ мин}^{-1};$$

2) массовую (2.41) ( $\text{кг/ч}$ ):

$$Q_{\text{ч}} = \frac{60Q\rho_{\text{р}}}{10^6} = \frac{60 \cdot 1633 \cdot 823}{10^6} = 81,$$

где  $\rho_{\text{р}} = 823 \text{ кг/м}^3$  – плотность расплава ПЭНП на выходе из экструдера при температуре расплава  $150^\circ\text{C}$  (берем из прил. 2).

**Пример 3.** Рассчитать максимальное давление расплава в конце шнека для условий задачи примера 2:

1) длина зоны дозирования – по табл. 1 (см):

$$L_d = 0,4L = 0,4 \cdot 225 = 90;$$
$$\operatorname{tg}\varphi = t/\pi D = 9/3,14 \cdot 9 = 0,318;$$

2) градиент скорости сдвига рассчитывается по формуле (2.47) ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D n}{h_{\text{cp}}} = \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 56}{60 \cdot 0,506} = 52,1,$$

где  $h_{\text{cp}} = 0,506$  см (см. выше);

3) эффективная вязкость расплава ПЭНП по логарифмической зависимости  $\lg \eta$  от  $\lg \dot{\gamma}$  (рис. 7) при температуре расплава в зоне дозирования  $150^\circ\text{C}$ :

$$\lg \eta = -0,558 \lg \dot{\gamma} + 4,102,$$

отсюда  $\eta = 1380,4$  Па·с;

4) максимальное давление расплава в конце шнека определяем по формуле (2.56) (Па):

$$P_m = \frac{\pi D L_d \eta n}{h_{\text{cp}}^2 \operatorname{tg}\varphi} = \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 90 \cdot 1380,4 \cdot 0,94}{0,506^2 \cdot 0,318} = 40,5 \cdot 10^6,$$

$$40,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 40,5 \text{ МПа}.$$

**Пример 4.** Рассчитать потери давления в формующей головке по примеру 1. Экструдер – по примеру 2.

Температура расплава в головке –  $150^{\circ}\text{C}$ . Объемная производительность равна  $1633 \text{ см}^3/\text{мин}$  ( $27,2 \text{ см}^3/\text{с}$ ).

Расчет потерь давления в головке проводится по следующему алгоритму:

1) рассчитывают скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ ,  $\text{с}^{-1}$ , на простых участках  $l_1 - l_7$  головки по формулам табл. 3;

2) по логарифмической зависимости  $\lg \eta = -A \lg \dot{\gamma} + B$  (табл. 3) при выбранной температуре расплава в головке находят эффективную вязкость  $\eta$ ;

3) по формуле  $\Delta P_i = \frac{Q\eta_i}{K_i}$  рассчитывают потери давления на элементарных участках головки;

4) суммируют  $\Delta P$ .

Результаты расчета примера приведены в табл. 6.

