

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ ПОДВУЛКАНИЗАЦИИ И СТЕПЕНИ ПЛАСТИКАЦИИ ПРОФИЛИРОВАННОГО ЭКСТРУДАТА

М. В. Соколов

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; msok68@mail.ru*

Ключевые слова: изменение размеров экструдата; резиновая смесь; степень подвулканизации и пластикации; суммарная величина сдвига; червячная машина.

Аннотация: Рассмотрены теоретические основы определения суммарной величины сдвига при переработке резиновых смесей в червячных машинах и формующих каналах экструзионных головок. Разработана математическая модель для прогнозирования изменения размеров поперечного сечения экструдата с учетом степени подвулканизации и пластикации в каналах шнека и формующей головке.

Обозначения

dF_x, dF_z – компоненты силы сопротивления перемещению;	p – давление перерабатываемого материала;
E – энергия активации перерабатываемого материала;	Q, Q_1, Q_2 – производительности соответственно общая, прямого и обратного потоков;
e, B – ширина витка и канала червяка соответственно;	R – газовая постоянная;
F_α, F_p – коэффициенты формы канала червяка прямого и обратного потоков;	$T_{см. ср}, T_{см. вх}$ – температуры смеси средняя и на входе цилиндра соответственно;
F_z – коэффициент, учитывающий неизотермичность процесса;	$T_{ц}$ – температура цилиндра;
h – высота канала червяка;	γ_i – суммарная величина сдвига в i -м канале;
L, D – длина и диаметр нарезной части червяка;	$\delta_{ц}$ – зазор между гребнем червяка и внутренней стенкой цилиндра;
m_0 – мера консистентности перерабатываемого материала при температуре входа в цилиндр (канал червяка);	λ, ρ, c – соответственно теплопроводность, плотность и теплоемкость материала;
n – индекс течения резиновой смеси;	φ – угол наклона винтовой линии червяка;
	τ_{yz} – напряжение сдвига;
	ω – угловая скорость червяка.

Конструирование современного оборудования требует от специалиста знаний в области оптимального проектирования и разработки методики оценки и прогнозирования качества заготовок и изделий из полимерных материалов при их переработке в червячных машинах, которые позволят проектировать формующие и профилирующие каналы экструзионных головок [1, 2].

При моделировании процесса экструзии резиновых смесей рассматривается плоская модель зоны дозирования одношнекового экструдера, в которой шнек неподвижен, а цилиндр движется относительно шнека со скоростью $V_{ц}$. Ось x направлена поперек винтового канала (червяка), y – по его высоте, z – вдоль винтового канала и перпендикулярна плоскости постоянного давления, то есть плоскости xOz . Предполагается, что $P = P(z)$, $V_y = 0$, $V = V(y)$, жидкость несжимаема и смачивает стенки канала, течение установившееся.

Проекция уравнения равновесия элемента на оси z имеет вид

$$(\tau_{yz} + d\tau_{yz})dzdx - d\tau_{yz}dzdx + pdydz - (p + dp)dydx = 0. \quad (1)$$

Выражение для элементарной мощности dN , расходуемой на перемещение участка стенки витка dN_1 и в зазоре между внутренней стенкой цилиндра и поверхностью витка червяка dN_2 , примет вид

$$\begin{aligned} dN &= dN_1 + dN_2 = (V_x dF_x + V_y dF_y) = \\ &= (V_x \tau_{yx} |_{y=h} Bdz + V_z \tau_{yz} |_{y=h} Bdz) + V \tau_z e \cos \varphi dz. \end{aligned} \quad (2)$$

Баланс тепловых потоков для элементарного участка размерами B , h и dz :

$$q_z Bh + q_d Bhdz = [q_z + (dq_z/dz) dz] Bh + q_{ц} Bdz + q_ч Bdz, \quad (3)$$

где q_z , q_d , $q_{ц}$, $q_ч$ – тепловые потоки, соответственно, вдоль канала червяка, диссипативный, отводимые в тела цилиндра и червяка.

Представим усовершенствованную математическую модель, состоящую из уравнений, описывающих зависимость энергосиловых параметров процесса экструзии от режимных переменных и конструктивных параметров оборудования, полученную с учетом необходимых допущений и упрощений [3] на базе общей математической модели, состоящей из системы дифференциальных уравнений второго порядка: неразрывности, движения (Навье–Стокса), энергии и реологического уравнения.

1. Полезная мощность

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \quad (4)$$

где

$$N_1 = (B/h) (4V_x^2 + V_z^2) m_0 (V/h)^{n-1} z_d F_z; \quad N_2 = (V_z/2) Bh \Delta P;$$

$$F_z = \frac{1}{z_d} \int_0^{z_d} \exp \frac{E}{RT(z)} dz; \quad N_3 = V(V/\delta_{ц})^n m_0 \exp [E/(RT_{ц})] e \cos(\varphi) z_d;$$

$$V_z = V \cos \varphi; \quad z_d = L/\sin \varphi; \quad V_z = V \sin \varphi; \quad V = \omega D/2.$$

2. Напорно-расходоная характеристика

$$Q = Q_1 - Q_2, \quad (5)$$

где

$$Q_1 = (V_z/2) (B/h) F_{\alpha} g; \quad Q_2 = Bh^3 F_p \Delta P / [12(V/h)^{n-1} m_0 F_z z_d].$$

3. Температурное поле по длине шнека:

а) политропный режим

$$\begin{aligned} T_{см}(z) &= T_{ц} + G \exp[E/(RT_{см.ср})] - (G \exp[E/(RT_{см.ср})] - \\ &- T_{см.вх} + T_{ц}) \exp(-Az), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$G = m_0 h^2 / (2K\lambda) (V/h)^{n+1}; \quad A = 2KaB/(Qh); \quad a = \lambda/(\rho c);$$

$$K = \alpha h/\lambda; \quad V_M = Q/Bh.$$

Трансцендентное уравнение для определения средней по длине червяка температуры перерабатываемого материала (резиновой смеси) $T_{ср}$:

$$\begin{aligned} T_{см.ср} &= T_{ц} + G \exp(E/RT_{см.ср}) (1 + (\exp(-Az_d) - 1)/(Az_d)) + \\ &+ (T_{ц} - T_{см.вх}) (\exp(-Az_d) - 1)/(Az_d); \end{aligned} \quad (7)$$

б) адиабатический режим

$$T_{\text{см}}(z) = T_{\text{см. вх}} + GBh/(\rho c Q) \exp(E/RT_{\text{см. ср}})z. \quad (8)$$

Трансцендентное уравнение для определения средней по длине червяка температуры $T_{\text{ср}}$:

$$T_{\text{см. ср}} = T_{\text{см. вх}} + GBh/(\rho c Q) \exp(E/RT_{\text{см. ср}})z_{\text{д}}/2; \quad (9)$$

в) изотермический режим

$$T_{\text{см. вх}} = T_{\text{см. вых}}. \quad (10)$$

4. Реологическое уравнение

$$\eta = m_0 \dot{\gamma}^{n-1} \exp \frac{E}{RT}. \quad (11)$$

5. В качестве параметра состояния, описывающего подвулканизацию резиновых смесей, принимали критерий Бейли JB [4, 5]:

$$JB(t) = \int_0^{t^*} \frac{dt}{\tau[T(t)]} = \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{dt}{\tau[T(t)]} = 1, \quad (12)$$

где $\int_0^{t^*} \frac{dt}{\tau[T(t)]}$ – оценка подвулканизации резиновых смесей; $\tau[T(t)]$ – кривая,

характеризующая подвулканизацию (время достижения «скорчинга» в условиях постоянства температуры); t^* – время достижения «скорчинга» при заданном процессе подвулканизации $T(t)$.

Интеграл Бейли неявно (через численное решение математической модели процесса экструзии резиновых смесей) зависит от переменных управления, которые входят в выражение, описывающее распределение температуры по длине червяка. Другим фактором, влияющим на качество изделий, является изменение размеров поперечного сечения экструдата на выходе из формирующего инструмента – «разбухание», называемого эффектом Вайсенберга.

При входе перерабатываемого материала в формирующий канал (рис. 1) возникают нормальные напряжения и напряжения сдвига, которые изменяются в зави-

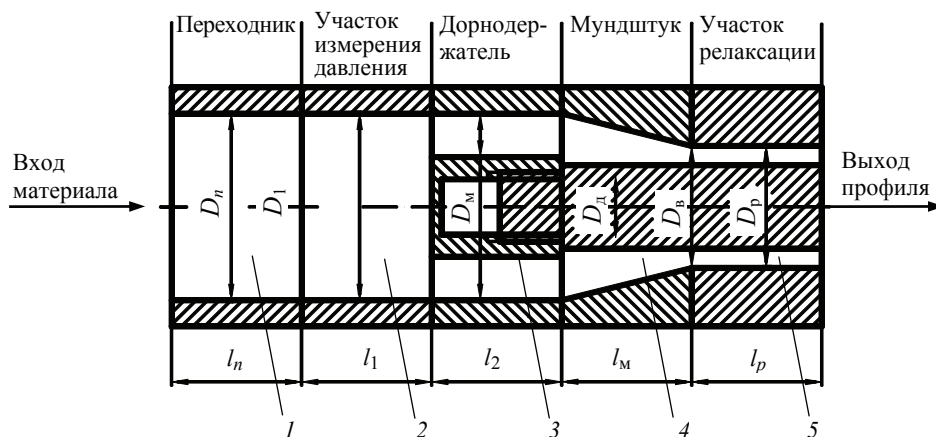


Рис. 1. Компоновка формирующих и профилирующих каналов экструзионной головки:

1, 2 – цилиндрический; 3 – три канала произвольной формы;
4 – конический кольцевой; 5 – цилиндрический кольцевой (профилирующий)

симости от геометрических размеров профилирующих элементов и релаксируют на выходе из них с изменением размеров экструдата. Остаточные напряжения в момент выхода пластика из формирующих каналов и вызываемое ими поперечное расширение потока будут связаны со скоростью потока экспоненциальной зависимостью.

Существует несколько способов *снижения эффекта разбухания* экструдата. *Первый* – подвергнуть профильную резинотехническую заготовку на выходе из формирующего канала дополнительной деформации, то есть последующей вытяжке, каландрованию и т.п. *Второй* – заключается в экспериментальном определении режимов переработки и геометрии формирующих каналов для резинотехнической заготовки заданного профиля при переработке конкретного полимерного материала. Известно, что для всех исследованных полимерных материалов, скоростей экструзии и температур переработки характерно снижение «разбухания» с повышением длины канала формирующего инструмента. При конструировании формирующих каналов необходимо знать величину относительной длины формирующего инструмента (отношение длины к зазору), выше которого «разбухание», достигнув минимума, остается практически постоянным. С уменьшением отношения внутреннего размера заготовки к наружному ее размеру (или отношения наружного диаметра дорна к внутреннему диаметру мундштука) наблюдается увеличение «разбухания», которое достигает максимума при заготовке в виде сплошного прутка [4].

Предложен *третий* способ, заключающийся в определении степени пластфикации материала. Степень пластфикации, в свою очередь, можно учитывать с помощью суммарной величины сдвига $\gamma_{ш,ф}$, которая представляет собой функцию различных конструктивных параметров шнека, формирующих каналов экструзионной головки и технологических параметров процесса, содержащихся в математической модели экструзии резиновых смесей.

б. Степень пластфикации экструдата (величина суммарного сдвига):

$$\gamma_{ш,ф} = \gamma_{ш} + \gamma_{ф} = \dot{\gamma}_p \tau_{ш} + \sum_{i=1}^n \dot{\gamma}_i \tau_{\phi i}. \quad (13)$$

Суммарная величина сдвига в каналах шнека определяется следующим образом [5]:

$$\gamma_{ш} = \dot{\gamma}_p \tau_{ш},$$

где $\dot{\gamma}_p$ – расчетная скорость сдвига в каналах шнека, c^{-1} [6],

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

$\tau_{ш}$ – время пребывания перерабатываемого материала на шнеке, с,

$$\tau_{ш} = \frac{WhL}{Q \sin \varphi},$$

где $W = (t - e) \cos \varphi$ – ширина винтового канала шнека, м.

Суммарная величина сдвига в формирующих каналах экструзионной головки определяется следующим образом:

$$\gamma_{ф} = \sum_{i=1}^n \gamma_{\phi i},$$

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

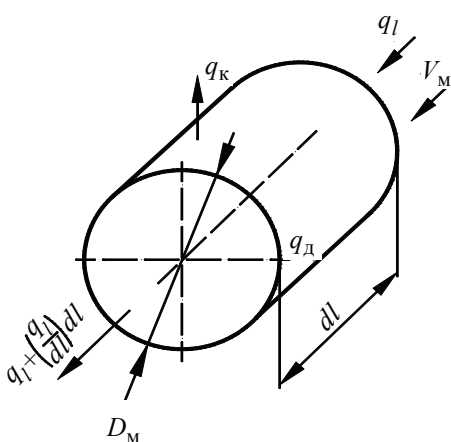


Рис. 2. Элементарный объем канала

Схема тепловых потоков, входящих в элементарный объем канала с размерами D и dl и выходящих из него, показана на рис. 2. Тепло переносится вместе с перерабатываемым материалом в направлении продольной оси l , средняя скорость которого [3]

$$V_M = Q / (\pi D_n^2 / 4), \quad (14)$$

при этом тепловой поток

$$q_l = \rho c V_M T. \quad (15)$$

После дифференцирования по l получим

$$dq_l / dl = \rho c V_M (dT / dl). \quad (16)$$

За счет диссипации резиновой смеси генерируется тепловой поток

$$q_d = \tau \dot{\gamma} = \eta \dot{\gamma}^2. \quad (17)$$

Далее условно принимается, что $\dot{\gamma} = 8V / D_n$. Температура равна среднеинтегральному ее значению по длине канала

$$\tilde{T} = \frac{1}{l} \int_0^l T(l) dl. \quad (18)$$

Тепловой поток, отводимый в каналы корпуса, пропорционален коэффициенту теплоотдачи α и разности температур перерабатываемого материала и стенок корпуса:

$$q_k = \alpha (T - T_K). \quad (19)$$

Коэффициент теплоотдачи определяется соотношением

$$\alpha = 2k\lambda / D.$$

Тепловой баланс рассмотренных потоков описывается уравнением

$$q_l \pi D_M^2 / 4 + q_d \pi D_M^2 / 4 dl = [q_l + (dq_l / dl) dl] \pi D_M^2 / 4 + q_k \pi D_M dl. \quad (20)$$

Уравнение (13) не учитывает влияния подвулканизации в резиновой смеси, возникающего при изменении (увеличении) температуры и времени пребывания перерабатываемого материала в формирующих каналах экструзионной головки. Для того чтобы учесть данное влияние, необходимо рассчитать значение критерия подвулканизации посредством расчета температурного поля по длине формирующих каналов экструзионной головки по уравнениям, которые аналогичны уравнениям температурного поля по длине шнека.

В экструзионной головке при переработке резиновых смесей в основном можно выделить пять последовательных участков (см. рис. 1).

Решение теплового баланса путем интегрирования по l дает уравнения для температурного поля по длине канала.

Температурное поле перерабатываемого материала по длине канала l (рис. 3)

$$T(l) = T_1 + G_1 \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{cp1}}\right) - \left(G_1 \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{cp1}}\right) - T_{nb} + T\right) \exp(-A_1 l). \quad (21)$$

Средняя температура перерабатываемого материала по длине цилиндрического канала

$$\tilde{T}_{cp1} = T_1 + G_1 \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{cp1}}\right) \left(1 + \frac{\exp(-A_1 l_1) - 1}{A_1 l_1}\right) + (-T_{nb} + T_1) \frac{\exp(-A_1 l_1) - 1}{A_1 l_1}, \quad (22)$$

где $G_1 = \frac{m_1 D_1^2}{4k\lambda_1} \dot{\gamma}_1^{n+1}$; $A_1 = 4k_1 \frac{a_1}{V_1 D_1^2}$; $a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1}$.

Скорость сдвига в цилиндрическом канале [7]

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{8V_1}{D_1}.$$

Температурное поле перерабатываемого материала по длине участка 2 (см. рис. 3), где измеряется давление, аналогично температурному полю по длине участка переходника. Температурное поле перерабатываемого материала по длине дорнодержателя аналогично температурному полю по длине переходника при условии, что средняя скорость материала, поступающего в один канал, равна

$$V_2 = \frac{4Q}{n_k \pi D_2^2},$$

где n_k – число каналов по длине дорнодержателя ($n_k = 3$);

$$T(l) = T_2 + G_2 \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{cp2}}\right) - \left(G_2 \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{cp2}}\right) - T_{вх1} + T_2\right) \exp(-A_2 l). \quad (23)$$

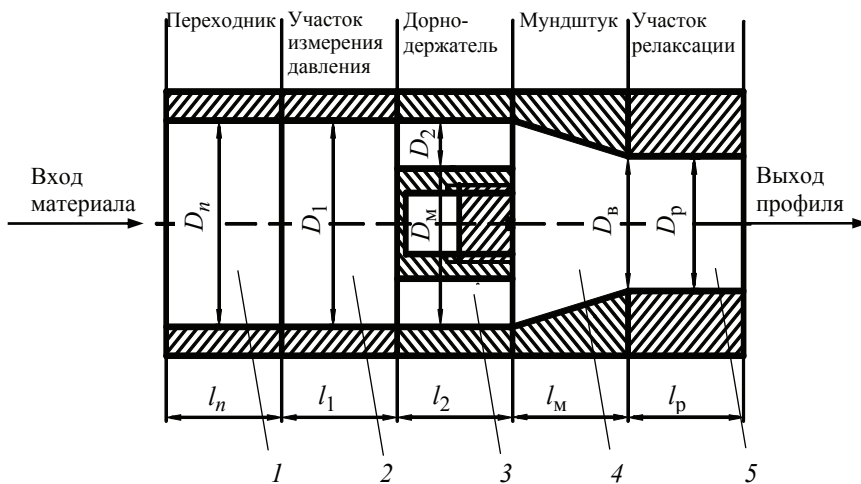


Рис. 3. Геометрия формующих каналов экструзионной головки (без дорна)

Средняя температура перерабатываемого материала по длине канала дорнодержателя

$$\tilde{T}_{\text{cp}2} = T_2 + G_2 \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp}2}}\right) \left(1 + \frac{\exp(-A_2 l_2) - 1}{A_2 l_2}\right) + (-T_{\text{вх}1} + T_2) \frac{\exp(-A_2 l_2) - 1}{A_2 l_2}, \quad (24)$$

где $G_2 = \frac{m_2 D_2^2}{4k\lambda_2} \left(\frac{8V_2}{D_2}\right)^{n+1}$; $A_2 = 4k_2 \frac{a_2}{V_2 D_2^2}$; $a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}$.

Скорость сдвига в цилиндрическом канале [7]

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{8V_2}{D_2}.$$

Температурное поле перерабатываемого материала по длине мундштука (см. рис. 3) аналогично температурному полю по длине участка переходника при условии, что

$$D_M = \frac{D_{\text{м.вх}} + D_{\text{м.вых}}}{2}$$

или

$$D_M = f(l_M), \quad D_M(l) = D_{\text{м.вх}} - \frac{l}{l_M} (D_{\text{м.вх}} - D_{\text{м.вых}}); \quad (25)$$

$$T_M(l) = T_M + G_M \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp.м}}}\right) - \left(G_M \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp.м}}}\right) - T_{2\text{вх}} + T_M\right) \exp(-A_M l). \quad (26)$$

Средняя температура перерабатываемого материала по длине конического канала

$$\tilde{T}_{\text{cp.м}} = T_M + G_M \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp.м}}}\right) \left(1 + \frac{\exp(-A_M l_M) - 1}{A_M l_M}\right) + (-T_{2b} + T_M) \frac{\exp(-A_M l_M) - 1}{A_M l_M}, \quad (27)$$

где $G_M = \frac{m_M D_M^2}{4k\lambda_M} \dot{\gamma}^{n+1}$; $A_M = 4k_M \frac{a_M}{V_M D_M^2(l)}$; $a_M = \frac{\lambda_M}{\rho_M c_M}$; $V_M = \frac{4Q}{\pi D_M^2(l)}$.

Скорость сдвига в коническом канале [5]

$$\dot{\gamma} = \frac{256Q}{\pi(D+d)^3}.$$

Температурное поле по длине канала участка релаксации (см. рис. 3) аналогично температурному полю по длине переходника:

$$T(l) = T_p + G_p \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp.п}}}\right) - \left(G_p \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp.п}}}\right) - T_{\text{мб}} + T_p\right) \exp(-A_p l). \quad (28)$$

Средняя температура перерабатываемого материала по длине цилиндрического канала

$$\tilde{T}_{\text{cp.п}} = T_p + G_p \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{cp.п}}}\right) \left(1 + \frac{\exp(-A_p l_p) - 1}{A_p l_p}\right) + (-T_{\text{мб}} + T_p) \frac{\exp(-A_p l_p) - 1}{A_p l_p}, \quad (29)$$

где $G_p = \frac{m_p D_p^2}{4k\lambda_p} \dot{\gamma}^{n+1}$; $A_p = 4k_p \frac{a_p}{V_p D_p^2}$; $a_p = \frac{\lambda_p}{\rho_p c_p}$; $V_p = \frac{4Q}{\pi D_p^2}$.

Скорость сдвига в цилиндрическом канале [7]

$$\dot{\gamma} = \frac{8V_p}{D_p}$$

Температурное поле по длине канала мундштука с учетом дорна (рис. 4) рассчитывается следующим образом.

Скорость перерабатываемого материала, поступающего в конический кольцевой канал

$$V_{м.д} = \frac{4Q}{\pi[D_d^2 - D_m^2(l)]} \quad (30)$$

Тепловой поток

$$q_l = \rho_{м.д} c_{м.д} V_{м.д} T \quad (31)$$

Тепловой поток, отводимый в каналы корпуса (мундштука), пропорционален коэффициенту теплоотдачи α и разности температур перерабатываемого материала и стенок корпуса

$$q_{м.д} = \alpha(T - T_{м.д}), \quad (32)$$

где $\alpha = k\lambda_{м.д} \frac{D_m(l) - D_d}{2}$; $H = \frac{D_m(l) - D_d}{2}$.

Тепловой баланс рассмотренных потоков (см. рис. 4) описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{q_l \pi (D_m^2(l) - D_d^2)}{4} + q_d \frac{\pi (D_m^2(l) - D_d^2)}{4} dl = \\ = \left[q_l + \left(\frac{dq_l}{dz} \right) dz \right] \frac{\pi (D_m^2(l) - D_d^2)}{4} + q_{м.д} \pi D_m dl \end{aligned} \quad (33)$$

Решение теплового баланса путем интегрирования по l дает уравнение для температурного поля по длине канала

$$\rho c V_{м.д} \frac{dT}{dl} = m_{м.д} \dot{\gamma}^{n+1} \exp \frac{E}{RT} - \frac{2D_m(l) k \lambda_{м.д}}{(D_m(l) + D_d)} (T - T_{м.д}).$$

Температурное поле по длине конического кольцевого канала (см. рис. 4) рассчитывается следующим образом.

$$T(l) = T_{м.д} + G_{м.д} \exp \left(\frac{E}{RT_{ср.м.д}} \right) - \left(G_{м.д} \exp \left(\frac{E}{RT_{ср.м.д}} \right) - T_{2b} + T_{м.д} \right) \exp(-A_{м.д} l). \quad (34)$$

Средняя температура перерабатываемого материала по длине конического кольцевого канала

$$\tilde{T}_{ср.м.д} = T_{м.д} + G_{м.д} \exp \left(\frac{E}{RT_{ср.м.д}} \right) \left(1 + \frac{\exp(-A_{м.д} l_{м.д}) - 1}{A_{м.д} l_{м.д}} \right) + (-T_{2b} + T_{м.д}) \frac{\exp(-A_{м.д} l_{м.д}) - 1}{A_{м.д} l_{м.д}}, \quad (35)$$

где $G_{м.д} = \frac{m_{м.д} (D_m(l) + D_d)}{4k\lambda_{м.д} D_m(l)} \dot{\gamma}^{n+1}$; $A_{м.д} = 4k_{м.д} \frac{a_{м.д} D_m(l)}{V_{м.д} (D_m(l) + D_d)}$; $a_{м.д} = \frac{\lambda_{м.д}}{\rho_{м.д} l_{м.д}}$.

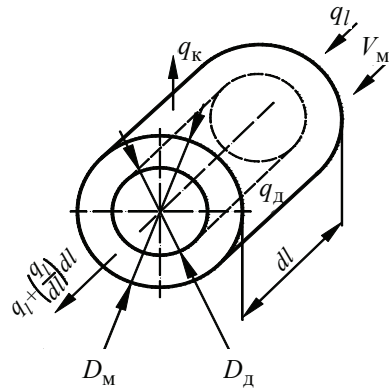


Рис. 4. Элементарный объем канала с учетом дорна

Скорость сдвига в коническом кольцевом канале [7]

$$\dot{\gamma} = \frac{22,32Q}{\pi(R_0 + R_b)} \frac{1}{(\delta_1 + \delta_2)^2},$$

где $R_0 = \frac{D_M + D_D}{4}$; $R_b = \frac{D_B + D_D}{4}$; $\delta_1 = \frac{D_M - D_D}{2}$; $\delta_2 = \frac{D_B - D_D}{2}$.

Температурное поле по длине круглого кольцевого канала (см. рис. 4) рассчитывается по формуле

$$T(l) = T_{p,d} + G_{p,d} \exp\left(\frac{E}{RT_{cp,d}}\right) - \left(G_{p,d} \exp\left(\frac{E}{RT_{cp,d}}\right) - T_{m,d} + T_{p,d}\right) \exp(-A_{p,d}l). \quad (36)$$

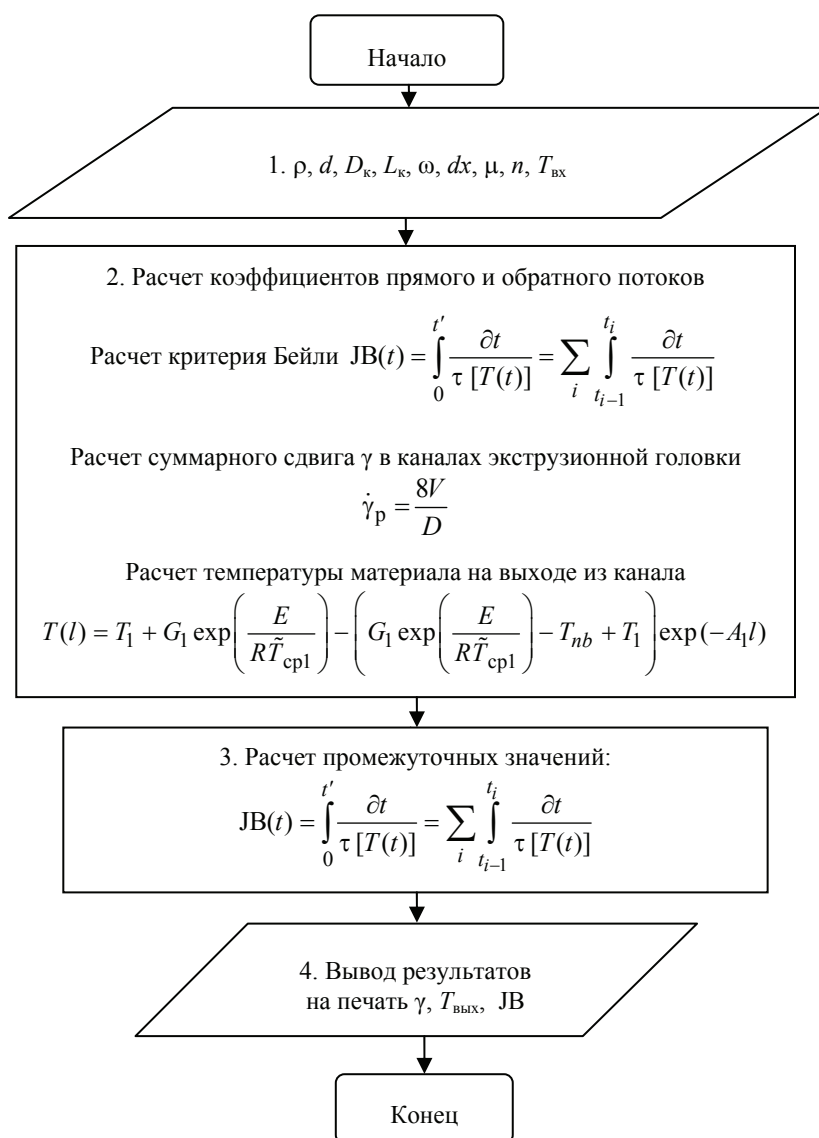


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета степени подвулканизации, суммарного сдвига и температурного поля в каналах экструзионной головки

Средняя температура перерабатываемого материала по длине круглого кольцевого канала

$$\tilde{T}_{\text{ср.р.д}} = T_{\text{р.д}} + G_{\text{р.д}} \exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}_{\text{ср.р.д}}}\right) \left(1 + \frac{\exp(-A_{\text{р.д}} l_{\text{р.д}}) - 1}{A_{\text{р.д}} l_{\text{р.д}}}\right) + (-T_{\text{р.д}} + T_{\text{р.д}}) \frac{\exp(-A_{\text{р.д}} l_{\text{р.д}}) - 1}{A_{\text{р.д}} l_{\text{р.д}}}, \quad (37)$$

где $G_{\text{м.д}} = \frac{m_{\text{р.д}}(D_{\text{п}} + D_{\text{р.д}})}{4k\lambda_{\text{р.д}}D_{\text{п}}} \dot{\gamma}^{n+1}$; $A_{\text{р.д}} = 4k_{\text{р.д}} \frac{a_{\text{р.д}}D_{\text{п}}}{V_{\text{р.д}}(D_{\text{п}} + D_{\text{р.д}})}$; $a_{\text{м.д}} = \frac{\lambda_{\text{р.д}}}{\rho_{\text{р.д}} l_{\text{р.д}}}$.

Скорость сдвига в круглом кольцевом канале [3]

$$\dot{\gamma} = \frac{5,58Q}{\pi(R_{\text{н}} + R_{\text{в}})} \frac{1}{(R_{\text{н}} - R_{\text{в}})^2},$$

где $R_{\text{н}} = \frac{D_{\text{п}}}{2}$; $R_{\text{в}} = \frac{D_{\text{р.д}}}{2}$.

Для расчета степени подвулканизации, величины сдвига и температуры резиновых смесей в формирующих каналах экструзионной головки по уравнениям (4) – (37) приведен алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 5 [9].

Таким образом, усовершенствованная математическая модель заключается в дополнительно выведенных уравнениях для определения степени подвулканизации [9] и пластикации (суммарной величины сдвига), которые связывают режимные переменные и конструктивные параметры с показателями качества профилированного экструдата, то есть длинномерных резинотехнических заготовок.

Список литературы

1. Соколов, М. В. Расчет шнековых машин для резиновых смесей при заданном качестве экструдата / М. В. Соколов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 4А. – С. 979 – 986.
2. Соколов, М. В. Прогнозирование качества экструдата при переработке резиновых смесей / М. В. Соколов, А. А. Букин // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2006. – № 3(5). – С. 86 – 92.
3. Басов, Н. И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. – М. : Химия, 1986. – 488 с.
4. Разработка критериального метода прогнозирования технологического поведения каучуков и резиновых смесей : отчет предприятия п/я В-8749 № 14-4-74 по теме 70-73 за 1972–73 гг. / Е. Г. Вострокнутов [и др.] – Тамбов, 1973. – 183 с.
5. Вострокнутов, Е.Г. Разработка комплекса методик определения показателей упруго-вязких, адгезионно-фрикционных и прочностных свойств каучуков и резиновых смесей : отчет предприятия п/я В-8749 № 14-93-74 по теме 82-73 / Е. Г. Вострокнутов, Н. В. Прозоровская. – М., 1975. – 104 с.
6. Буртелов, Л. В. Математическое моделирование процесса экструзии псевдопластичных сред на одночервячных машинах на примере резиновой смеси : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Л. В. Буртелов. – Томск, 2005. – 16 с.
7. Рябинин, Д. Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. – М. : Машиностроение, 1965. – 363 с.

8. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий : монография / М. В. Соколов [и др.] – М. : Машиностроение-1, 2007. – 292 с.

9. Sokolov, M. V. Determination of Total Shear During Processing of Rubber Stock / M. V. Sokolov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2006. – Vol. 42, No. 7–8. – P. 413 – 416. doi: 10.1007/s10556-006-0117-y

Mathematical Modeling of the Rubber Mixtures Extrusion Process with Reference to the Degree of Pre-Curing and Plasticization of Corrugated Extrudate

M. V. Sokolov

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, TSTU; Tambov, Russia; msok68@mail.ru

Keywords: change in extrudate dimensions; rubber compound; degree of pre-curing and plasticization; Total amount of shear; Black car.

Abstract: Theoretical bases of determination of total shear value during processing of rubber compounds in extruding presses and molding channels of extrusion heads are considered. A mathematical model to predict the change in cross-sectional dimensions of an extrudate, given the degree of pre-curing and plasticization in the screw channels and the molding head has been developed.

References

1. Sokolov M.V. [Calculation of Worm-Type Leveling Device for Rubber Mixtures Processing under the Given Quality of Extrudate], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 4A, pp. 979-986. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Sokolov M.V., Bukin A.A. [Forecasting Extrudate Quality when Processing Rubber Mixtures], *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2006, no. 3(5), pp. 86-92. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Basov N.I. Kazankov Yu.V., Lyubartovich V.A. *Raschet i konstruirovaniye oborudovaniya dlya proizvodstva i pererabotki polimernykh materialov* [Calculation and design of equipment for the production and processing of polymer materials], Moscow: Khimiya, 1986, 488 p. (In Russ.)

4. Vostroknutov E.G., Prozorovskaya N.V., Kirilyuk L.V., Smirnova N.M. i dr. *Razrabotka kriterial'nogo metoda prognozirovaniya tekhnologicheskogo povedeniya kauchukov i rezinovykh smesei: otchet predpriyatiya p/ya V-8749 № 14-4-74 po teme 70-73 za 1972–73 gg.* [Development of a criterial method for predicting the technological behavior of rubbers and rubber compounds: the report of the enterprise p / y V-8749 No. 14-4-74 on topic 70-73 for 1972-73], Tambov, 1973, 183 p. (In Russ.)

5. Vostroknutov E.G., Prozorovskaya N.V. *Razrabotka kompleksa metodik opredeleniya pokazatelei uprugovykh, adgezionno-friktsionnykh i prochnostnykh svoystv kauchukov i rezinovykh smesei: otchet predpriyatiya p/ya V-8749 № 14-93-74 po teme 82-73* [Development of a set of methods for determining the indices of elastic-viscous, adhesion-friction and strength properties of rubbers and rubber compounds: the report of the enterprise p / y V-8749 No. 14-93-74 on the topic 82-73], Moscow, 1975, 104 p. (In Russ.)

6. Burtelov L.V. *PhD Dissertation (Technical Sciences)*, Tomsk, 2005, 16 p. (In Russ.)

7. Ryabinin D.D., Lukach Yu.E. *Chervyachnye mashiny dlya pererabotki plasticheskikh mass i rezinovykh smesei* [Worm machines for processing plastics and rubber compounds], Moscow: Mashinostroenie, 1965, 363 p. (In Russ.)

8. Sokolov M.V. Klinkov A.S., Belyaev P.S., Odnol'ko V.G. *Proektirovanie ekstruzionnykh mashin s uchetom kachestva rezinotekhnicheskikh izdelii*, Moscow: Mashinostroenie-1, 2007, 292 c. (In Russ.)

9. Sokolov M.V. Determination of total shear during processing of rubber stock, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2006, vol. 42, Issue 7-8, pp. 413-416, doi: 10.1007/s10556-006-0117-y

Mathematische Modellierung des Prozesses der Extrusion von Gummimischungen unter Berücksichtigung der Vorvulkanisation und Plastizitätsmessung des profilierten Extruders

Zusammenfassung: Es sind die theoretischen Grundlagen für die Bestimmung der Gesamtmenge an Scherung bei der Verarbeitung von Kautschukmischungen in Schneckenmaschinen und den Formkanälen der extrudierten Köpfe untersucht. Es wurde ein mathematisches Modell entwickelt, um die Änderung der Querschnittsabmessungen des Extruders unter Berücksichtigung des Grades der Vorvulkanisierung und der Plastifizierung in den Schneckenkanälen und dem formierenden Köpfchen vorhersagen zu können.

Modélisation mathématique du processus de l'extrusion du caoutchouc compte tenu de la prévulcanisation et du degré de la plastification de l'extrudate profilé

Résumé: Sont examinés les fondements théoriques de la définition totale de la valeur du décalage lors du traitement des mélanges de caoutchouc dans les machines vis sans fin et des canaux de formage des têtes d'extrusion. Est élaboré un modèle mathématique pour prédire les changements des tailles de la section transversale de l'extrudate compte tenu du degré de la prévulcanisation et de la plastification dans les canaux de la vis et la tête de formage.

Автор: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.