

В.В. Черняев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПРОЦЕСС ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ

Представлена математическая модель и проведено численное исследование зависимости процесса экструзии полимеров от реологических параметров перерабатываемого материала.

При выборе и совершенствовании технологических режимов переработки полимеров важно знать и учитывать влияние реологических характеристик перерабатываемого материала на процесс экструзии. Большинство расплавов полимеров, являясь сложными реологическими системами, способно к развитию одновременно трех видов деформации: мгновенной упругой, высокоэластической и пластической. Однако в червячных экструдерах течение полимеров как правило происходит при стационарных режимах и в каналах с плавно изменяющейся геометрией, поэтому эффект упругости не будет оказывать сколько-нибудь заметного влияния на характер течения, и при рассмотрении процессов тепломассопереноса можно ограничиться рассмотрением только вязких свойств полимеров [1, 2].

При этом следует учитывать, что в ходе экструзии происходит плавление гранул полимера с образованием бассейна расплава. Поэтому анализ процессов, протекающих в канале, требует рассмотрения наряду с уравнением энергии и уравнений гидродинамики.

С учетом вышеизложенного система уравнений, описывающих движение и фазовые превращения в канале экструдера, примет вид:

в твердой фазе

$$C_s \rho_s V_p \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где ρ_s , C_s , λ_s – соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности твердого полимера; V_p – скорость пробки гранул;

в расплаве полимера:

уравнение сплошности:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

уравнения движения:

$$\rho_m \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{э}} \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{э}} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right), \quad (3)$$

$$\rho_m \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{э}} \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{э}} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right), \quad (4)$$

$$\rho_m \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{э}} \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{э}} \frac{\partial V_z}{\partial y} \right), \quad (5)$$

уравнение энергии:

$$\rho_m C_m \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu_{\text{э}} F, \quad (6)$$

где ρ_m , C_m , λ_m – соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава полимера; V_x , V_y , V_z – компоненты скорости движения расплава полимера; T – температура; P – давление; F – функция диссипации; $\mu_{\text{э}}$ – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры и определяющаяся степенным законом [1]:

$$\mu_{\text{э}} = \mu_0 \exp(-\beta(T - T_0)) \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{(n-1)}{2}}. \quad (7)$$

В формуле (7) I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации; μ_0 – вязкость при $I_2 / 2 = 1$ и $T = T_0$ (начальная вязкость); β – температурный коэффициент вязкости; n – степень отклонения свойств данной жидкости от свойств ньютоновской жидкости (показатель аномалии вязкости).

Для исследования были выбраны шнеки как с классической, так и с барьерной геометрией (МЕ-90, Бар) [3]. Реализация математической модели и подтверждение адекватности описаны в [4].

Полученные результаты представлены на рисунке и в таблице, где $l_{з.п}$ – длина зоны плавления, $P_{вых}$ – давление и $T_{вых}$ – средняя температура материала на выходе, $V_{п}$ – скорость пробки в конце зоны плавления.

Зависимость параметров экструзии от реологических характеристик

№	Параметр	Величина	Шнек		
			Бар	МЕ-90	Классический
1	$\mu_0 = 25\,000, \text{ Па}\cdot\text{с}$ $n = 0,5$ $\beta = 0,007, 1/^\circ\text{C}$	$l_{з.п}$, ВИТ.	20,50	21,90	21,90
		$P_{вых}$, Па.	$4,81 \cdot 10^8$	$4,66 \cdot 10^8$	$5,18 \cdot 10^8$
		$T_{вых}$, $^\circ\text{C}$	282,14	279,75	272,00
		$V_{п}$, м/с	0,305	0,249	0,249
2	$\mu_0 = 12\,500, \text{ Па}\cdot\text{с}$ $n = 0,5$ $\beta = 0,007, 1/^\circ\text{C}$	$l_{з.п}$, ВИТ.	20,80	22,80	23,10
		$P_{вых}$, Па.	$2,76 \cdot 10^8$	$2,74 \cdot 10^8$	$2,92 \cdot 10^8$
		$T_{вых}$, $^\circ\text{C}$	265,93	260,74	254,75
		$V_{п}$, м/с	0,324	0,249	0,249
3	$\mu_0 = 25\,000, \text{ Па}\cdot\text{с}$ $n = 0,5$ $\beta = 0,014, 1/^\circ\text{C}$	$l_{з.п}$, ВИТ.	20,60	22,30	22,49
		$P_{вых}$, Па.	$4,28 \cdot 10^8$	$4,40 \cdot 10^8$	$4,79 \cdot 10^8$
		$T_{вых}$, $^\circ\text{C}$	270,53	258,71	264,96
		$V_{п}$, м/с	0,312	0,249	0,249
4	$\mu_0 = 25\,000, \text{ Па}\cdot\text{с}$ $n = 0,75$ $\beta = 0,007, 1/^\circ\text{C}$	$l_{з.п}$, ВИТ.	17,90	19,60	16,90
		$P_{вых}$, Па.	$1,09 \cdot 10^9$	$9,82 \cdot 10^8$	$1,11 \cdot 10^9$
		$T_{вых}$, $^\circ\text{C}$	327,95	327,40	312,62
		$V_{п}$, м/с	0,249	0,249	0,249

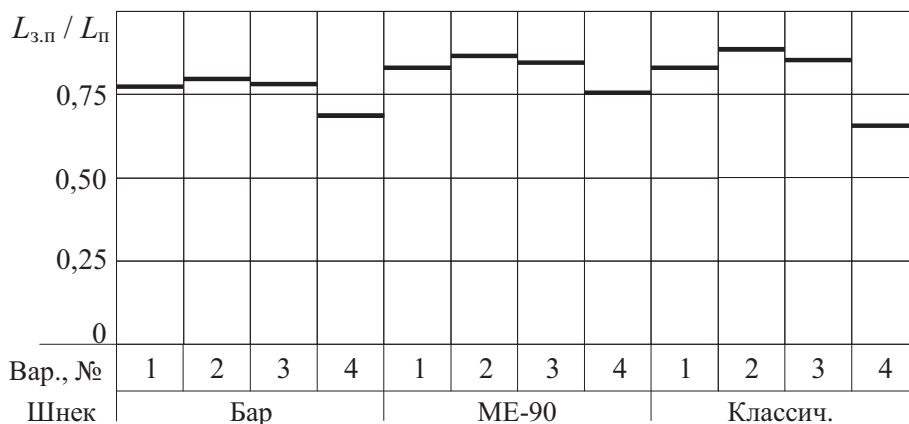


Рис. Диаграмма изменения относительной длины зоны плавления

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что реологические свойства расплава полимера оказывают существенное влияние на длину зоны плавления, а также на температуру получаемого экструдата. Так, например, изменение показателя аномалии вязкости n с 0,5 до 0,75 привело к изменению длин зон плавления на 11–23 %. При этом отличие в средней температуре составило 40–50°C. Такое расхождение результатов можно объяснить различным вкладом диссипативной составляющей тепла в процесс тепло-массопереноса в канале экструдера. При этом увеличение показателя аномалии вязкости n , начальной вязкости μ_0 , а также снижение температурного коэффициента β приводят к увеличению вклада диссипативной составляющей вследствие роста эффективной вязкости.

Библиографический список

1. Янков В.И., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Неизотермическое течение полимерных жидкостей в винтовых уплотнениях с продольной циркуляцией // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2006. – № 3. – С. 3–7.
2. Янков В.И., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Изотермическое течение аномально-вязких жидкостей в винтовых уплотнениях с продольной циркуляцией // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 1–5.
3. Субботин Е.В., Черняев В.В. Исследование влияния геометрии шнека на процесс плавления // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – № 3. – С. 25–32.
4. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщение 3. Проверка адекватности модели // Пластические массы. – 2005. – № 5, – С. 43–45.

Получено 09.09.2011