

**М.В. Бачурина, А.Г. Щербинин**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА**

*Предлагается трехмерная математическая модель процессов течения и теплообмена расплава полиэтилена в зоне дозирования одношнекового экструдера, учитывающая нелинейность свойств материала, вынужденную конвекцию расплава и диссипацию тепла.*

Переработка полимерных материалов и создание необходимого для этого оборудования представляют собой одно из важнейших направлений современной промышленности. На сегодняшний день около 60 % мирового производства пластических масс перерабатываются методом экструзии, основным преимуществом которого являются непрерывность и возможность его совмещения с другими технологическими процессами. Наиболее широкое применение среди экструзионных машин при переработке полимеров нашли одночервячные пластифицирующие экструдеры.

В зоне дозирования пластицирующего экструдера существует только жидкая фаза. При построении математической модели процессов течения и теплообмена расплава полимера в зоне дозирования винтового канала экструдера (рис. 1) вводятся следующие упрощающие предположения: процесс стационарный при постоянном массовом расходе; винтовой канал разворачивается на плоскость и используется принцип обращенного движения (рис. 2); массовыми силами по сравнению с силами вязкого трения пренебрегаем. Пренебрегаем утечками жидкости через зазор.

Таким образом, процесс движения и теплообмена полимера в винтовом канале экструдера моделируется тепломассопереносом

материала в длинном прямоугольном канале, верхняя стенка которого движется с постоянной скоростью  $V_0$ , равной окружной скорости червяка, под углом нарезки винтовой линии к оси канала.

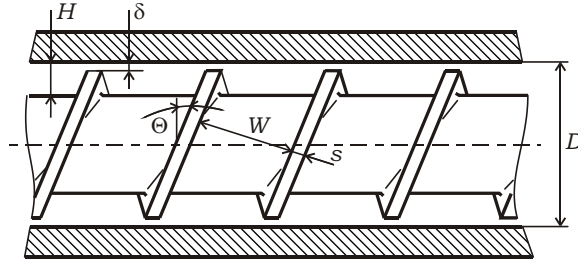


Рис. 1. Схема винтового канала экструдера

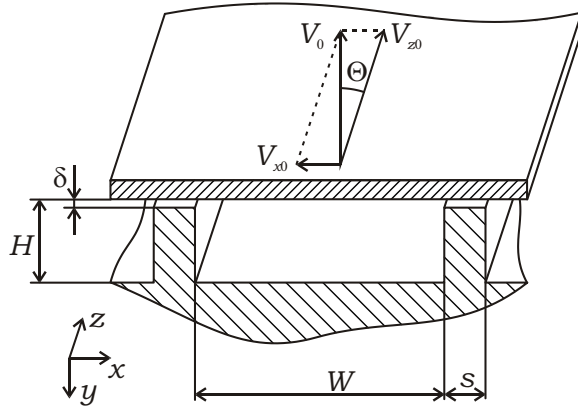


Рис. 2. Схема развернутого винтового канала

С учетом указанных допущений система дифференциальных уравнений в декартовой системе координат, описывающая движение и теплообмен полимера в канале червяка и полученная на основании законов сохранения массы, количества движения и энергии, будет иметь вид [1–3]:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}; \quad (2)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}; \quad (4)$$

$$\rho C \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi; \quad (5)$$

где  $x, y, z$  – прямоугольные координаты;  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты вектора скорости;  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора девиатора напряжений;  $\Phi$  – диссипативный источник тепла;  $\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z}$  – градиенты давления.

Связь тензора напряжений и тензора скоростей деформаций определяется реологическим уравнением состояния. Компоненты тензора напряжений для несжимаемой жидкости в декартовой системе координат имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu_{\ominus} \frac{\partial v_x}{\partial x}; \tau_{yy} = 2\mu_{\ominus} \frac{\partial v_y}{\partial y}; \tau_{zz} = 2\mu_{\ominus} \frac{\partial v_z}{\partial z}; \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu_{\ominus} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right); \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu_{\ominus} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right); \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu_{\ominus} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mu_{\ominus}$  – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры,

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

$\beta$  – температурный коэффициент вязкости;  $n$  – показатель аномалии вязкости;  $\mu_0$  – коэффициент консистенции расплава полимера при  $T = T_0$ ;  $I_2$  – квадратичный инвариант тензора скоростей деформаций,

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{2} &= 2 \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \\ &+ \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Функция диссипации вычисляется по формуле

$$\Phi = \tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \tau_{zx} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \mu_{\text{э}} \frac{I_2}{2}. \quad (9)$$

Искомое решение системы (1)–(9) в виде полей скорости и температуры определяется при заданной геометрии исследуемой области и совокупности краевых условий.

На входе в канал задается известное распределение температуры. На внутренней поверхности корпуса и на шнеке задается распределение температуры, определяемое технологическими условиями переработки полимерного материала.

Граничные условия для составляющих скоростей определяются из условия прилипания жидкости к твердым непроницаемым поверхностям (стенкам канала и поверхности раздела фаз) (см. рис. 2).

Расчеты проводятся в режиме заданного расхода.

Задача решалась численным методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS FLUENT. Разбивка на конечные элементы была произведена в программе ICEM CFD.

Геометрические размеры канала приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Геометрия шнека

№ п/п	Геометрические размеры	Значение
1	Диаметр шнека, мм	160,0
2	Шаг винтовой нарезки, мм	160,0
3	Ширина канала $W$ , мм	137,3
4	Ширина гребня винтовой нарезки $S$ , мм	15,3
5	Суммарная длина шнека, витки	4,7
6	Глубина канала, $H$ , мм	15,25
7	Угол подъема винтовой линии $\Theta$	17°39'

Реологические и теплофизические свойства исследуемого расплава полиэтилена приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Реологические и теплофизические свойства

$n$	$\mu_0$	$T_0$	$\beta$	$\rho$	$\lambda$	$C$
–	Па·с <sup><math>n</math></sup>	°С	1/°С	кг/м <sup>3</sup>	Вт/(м·°С)	Дж/(кг·°С)
0,44	10825	160	0,018	779,0	0,182	2400

Температура расплава полиэтилена на входе в канал равна 180 °С, на границах канала – 200 °С. Скорость вращения шнека равна 60 об/мин. Исследования проведены для переменной производительности экструдера  $G_0$ , которая изменялась в диапазоне от 0,05 до 0,2 кг/с.

На рис. 3 приведена напорно-расходная характеристика экструдера. Поле компоненты скорости  $v_z$  складывается из напорной и вынужденной составляющих расходов. Увеличение производительности экструдера при неизменной вынужденной составляющей расхода приводит к росту напорной составляющей расхода и к падению градиента давления, в связи с чем давление на выходе снижается.

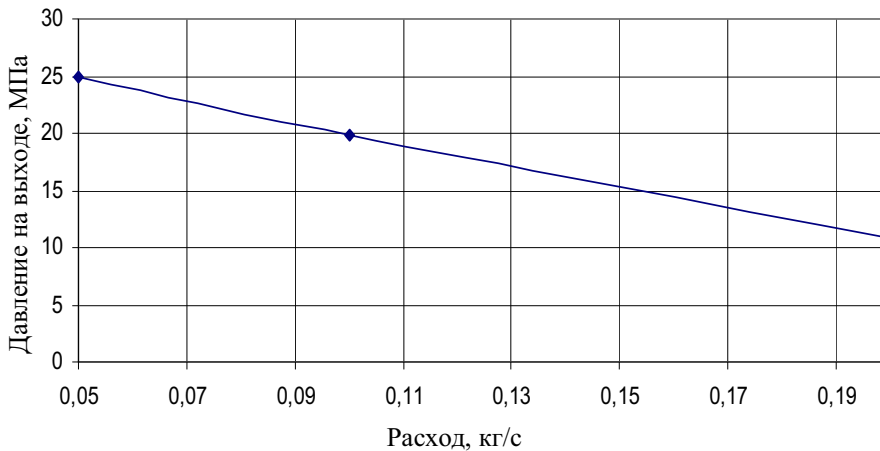


Рис. 3. Зависимость изменения давления на выходе из канала при изменении расхода

Изменение температуры расплава полиэтилена на выходе показано на рис. 4. Из рисунка видно, что температура материала на выходе превышает температуру, заданную на границе канала. Это связано с тем, что большая роль в разогреве материала связана с диссипацией

тепла в результате работы сил вязкого трения. При увеличении производительности снижается среднее время пребывания материала в канале, в результате чего температура на выходе падает.

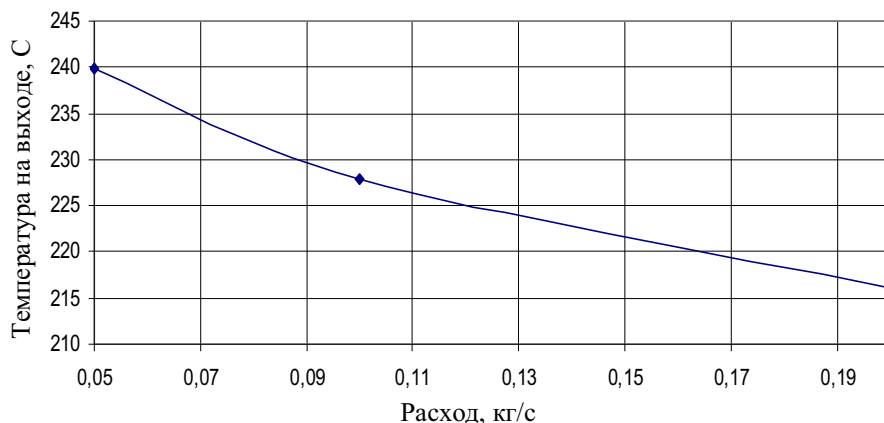


Рис. 4. Зависимость изменения температуры на выходе при изменении расхода

Таким образом, представленная трехмерная математическая модель может быть использована для исследования процессов тепло- и массопереноса в винтовых каналах зоны дозирования пластицирующих экструдеров, шнековых насосов.

### Библиографический список

1. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
2. 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. 12–15.
3. 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. 3–5.

Получено 05.09.2012