

С.В. Ершов, Н.М. Труфанова, Е.В. Субботин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ШНЕКА НА ПРОЦЕСС ЭКСТРУЗИИ

Описана математическая модель процессов тепломассопереноса полимера в канале пластицирующего экструдера с учетом охлаждения шнека. Проведено численное исследование процессов тепломассообмена полимера с учетом изменяющейся глубины введения охлаждающего агента в канал винта.

Решение задачи по определению влияния воздействия охлаждения шнека на процесс экструзии может быть осуществлено на основе математической модели, описывающей процессы тепломассопереноса расплавов полимеров и охлаждающего агента с различными реологическими и теплофизическими свойствами в каналах шнека.

Была построена математическая модель вышеуказанных процессов, а также рассмотрены алгоритмы численной реализации задач предложенной математической модели.

Объектом моделирования являлся экструдер с каналом охлаждения (рис. 1), в котором осуществляется течение не соприкасающихся разнородных материалов.

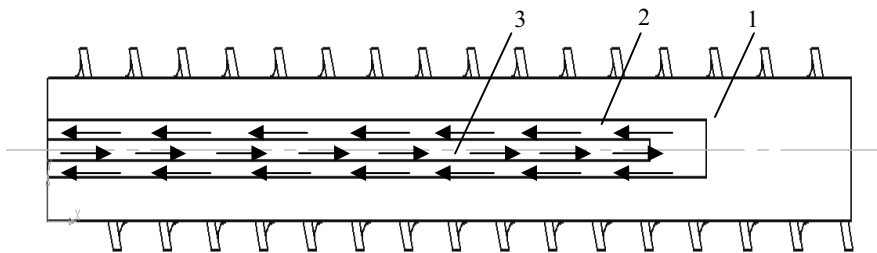


Рис. 1. Модель исследуемого шнека: 1 – шнек; 2 – область охлаждения шнека; 3 – трубка для подачи охлаждающей жидкости

Математическое описание процессов течения и теплообмена расплава полимера и охлаждающей жидкости основано на законах

сохранения. [1] Уравнения энергии, движения, неразрывности были получены с учетом следующих допущений:

- процесс стационарный;
- среда несжимаемая, без упругих свойств;
- полимер поступает в канал с торца шнека в жидком состоянии;
- течение осесимметричное;
- теплофизические характеристики постоянны;
- полимер движется вдоль шнека;
- поверхность шнека без гребня.

В результате сделанных допущений система дифференциальных уравнений для каждого из потоков в скоростях примет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r^i)}{\partial r} + \frac{\partial v_z^i}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\rho^i \left(v_r^i \frac{\partial v_r^i}{\partial r} + v_z^i \frac{\partial v_r^i}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu_3^i \frac{\partial v_r^i}{\partial r} \right) + \frac{2\mu_3^i}{r} \frac{\partial v_r^i}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \mu_3^i v_r^i + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_3^i \left(\frac{\partial v_z^i}{\partial r} + \frac{\partial v_r^i}{\partial z} \right) \right], \quad (2)$$

$$\rho^i \left(v_r^i \frac{\partial v_z^i}{\partial r} + v_z^i \frac{\partial v_z^i}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_3^i \left(\frac{\partial v_z^i}{\partial r} + \frac{\partial v_r^i}{\partial z} \right) \right] + \frac{\mu_3^i}{r} \left(\frac{\partial v_z^i}{\partial r} + \frac{\partial v_r^i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu_3^i \frac{\partial v_z^i}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\rho^i C^i \left(v_r^i \frac{\partial T}{\partial r} + v_z^i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi, \quad (4)$$

$$\rho^i C^i \left(v_r^i \frac{\partial T}{\partial r} + v_z^i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^i \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

где индекс i – определяет материал; r, z – радиальная и продольная цилиндрические координаты; v_r, v_z – компоненты вектора скорости; Φ – диссипативный источник тепла; P – давление; T – температура; ρ – плотность; C – теплоемкость; λ – теплопроводность; μ_3 – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры [2]:

$$\mu_3 = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (6)$$

где μ_0 – начальная вязкость при T_0 , β – температурный коэффициент вязкости, n – коэффициент аномалии вязкости, I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации.

Системы дифференциальных уравнений (1)–(6) замыкаются следующими граничными условиями:

- на неподвижных стенках компоненты скорости равны нулю;
- на входе в каналы задавались эпюры скоростей, соответствующие заданным расходам материала;
- на выходе – граничные условия второго рода по скорости и температуре;
- температура стенки цилиндра градиентно нарастает от 90 °С до 200 °С;
- температура расплавов полимеров на входе в экструдер постоянная и составляет 20 °С;
- на поверхностях контакта задаются граничные условия 4-го рода и равенство температур.

Полимер:

$$v_z \Big|_{z=0} = f_1(r), \quad (7)$$

$$v_r \Big|_{z=0} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_{\text{шнека}}} = 0, \quad (9)$$

$$v_z \Big|_{r=R_{\text{шн}}} = v_r \Big|_{r=R_{\text{шн}}} = 0, \quad (10)$$

$$v_r \Big|_{r=R_{\text{ц}}} = 0, \quad (11)$$

$$v_z \Big|_{r=R_{\text{ц}}} = 0, \quad (12)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{шн}}} = \lambda_{\text{мет}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{шн}}}, \quad (13)$$

$$T^+ \Big|_{r=R_{\text{шн}}} = T^- \Big|_{r=R_{\text{шн}}}, \quad (14)$$

$$T \Big|_{z=0} = T_{\text{вх}}, \quad (15)$$

$$T|_{r=R_u} = f(z), \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_{\text{шнека}}} = 0. \quad (17)$$

Шнек (металл):

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_{\text{шнека}}} = 0. \quad (19)$$

Канал охлаждения:

$$v_z|_{z=0} = f_2(r), \quad (20)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{r=0} = 0. \quad (22)$$

Граничные условия на твердых поверхностях для компонент скоростей охлаждающего агента соответствуют условиям прилипания и непроникновения.

В центре канала охлаждения выполняется условие (21 и 22):

$$\lambda_{\text{охл}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_k} = \lambda_{\text{мет}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_k}, \quad (23)$$

$$T^+ \Big|_{r=R_k} = T^- \Big|_{r=R_k}, \quad (24)$$

$$T|_{z=0} = T_{\text{вх2}}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=L_{\text{шнека}}} = 0. \quad (26)$$

Система дифференциальных уравнений (1–26) решается методом конечных элементов в пакете *Ansys*.

Компоненты скорости и температура аппроксимируются квадратичными, а давление – линейными полиномами на прямоугольном элементе. В результате получены системы нелинейных алгебраических уравнений относительно узловых неизвестных компонент скорости, давления, температуры. В качестве объекта исследования выбран экструдер ME-160 [3, 4].

Оценка сходимости численного решения приведена в табл. 1 и табл. 2.

В зависимости от числа итераций и количества узловых элементов сетки оценивалось значение температуры в выбранных узлах сетки и максимальной температуры на выходе из канала.

Таблица 1

Значения температур в зависимости от количества итераций

Кол-во итераций	T_n	$T(4000; 42)$
50	214	67
100	198	104
500	200	127
1000	200	132
2000	200	133
3000	200	133
4000	200	133

Таблица 2

Значения температур от количества узловых элементов

Кол-во узловых элементов	T_n	$T(4000; 42)$
1734	–	–
3466	197	103
6935	199	147
13870	200	137
27740	200	133
41610	200	133

В результате исследования сходимости решения поставленной задачи были приняты следующие значения по числу итераций и количеству узловых элементов: число итераций составило 3000, количество элементов – 27 740.

В работе проведено исследование влияния глубины подачи охлаждающей жидкости в канале охлаждения на распределение температуры в расплаве полимера.

В качестве агента охлаждения использовалась вода с температурой $T = 10^{\circ}\text{C}$. Давление подачи агента $P = 1000\text{ Па}$. Вода подается по центру.

На рис. 2, 3, 4 показана зависимость температур в полимере при различной глубине введения охлаждающего агента.

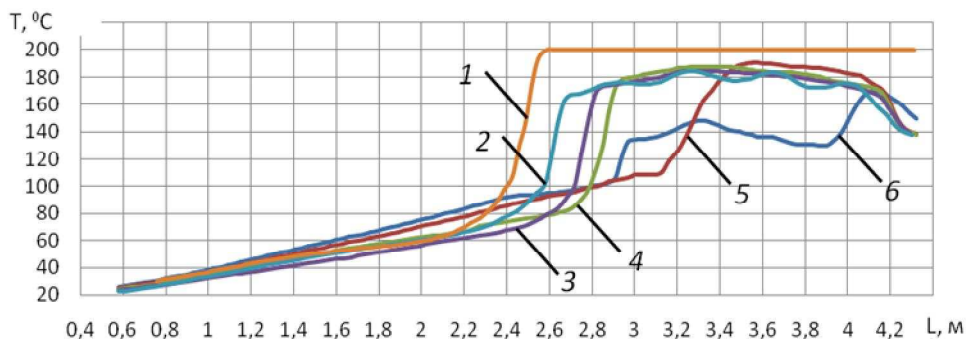


Рис. 2. Распределение минимальной температуры в полимере при различной глубине введения охлаждающего агента:
1 – без охлаждения, 2 – глубина введения 10 %, 3 – глубина введения 30 %, 4 – глубина введения 50 %, 5 – глубина введения 70 %, 6 – глубина введения 90 %

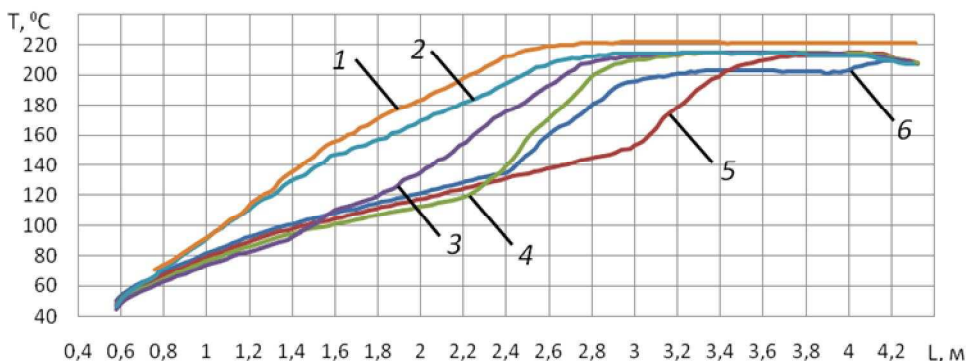


Рис. 3. Распределение средней температуры в полимере при различной глубине введения охлаждающего агента:
1 – без охлаждения, 2 – глубина введения 10 %, 3 – глубина введения 30 %, 4 – глубина введения 50 %, 5 – глубина введения 70 %, 6 – глубина введения 90 %

Таким образом, из рисунков видно, что интенсивному охлаждению подвергаются участок в месте введения охлаждающего агента и небольшая часть шнека в зоне окончания канала охлаждения, при этом образуется зона застоя.

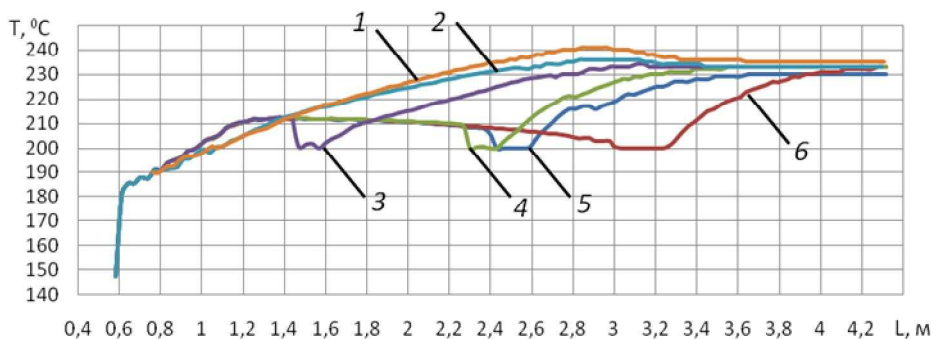


Рис. 4. Распределение максимальной температуры в полимере при различной глубине введения охлаждающего агента:
 1 – без охлаждения, 2 – глубина введения 10 %,
 3 – глубина введения 30 %, 4 – глубина введения 50 %, 5 – глубина введения 70 %, 6 – глубина введения 90 %

На рис. 2 видно, что в начале шнека минимальная температура одинакова, независимо от глубины введения охлаждающего агента, однако чем глубже он вводится, тем дальше наблюдается резкий подъем минимальной температуры. В конце зоны дозирования температура падает, это связано с особенностями циркуляции воды в канале охлаждения шнека.

Из рис. 3 и 4 можно сделать вывод: чем глубже вводится охлаждающий агент, тем ниже температура в полимере. На рис. 4 небольшой провал максимальной температуры наблюдается в месте введения охлаждающего агента.

В результате введения охлаждающего агента на глубину от 50 до 90 % удастся снизить перегревы полимера (температура полимера снижается на 20 °C) и выровнять температуру в канале при сохранении заданных технологических параметров.

Библиографический список

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

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. 3–5.

3. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщение 1: Математическая модель процесса тепло-массопереноса полимера в канале экструдера // Пластические массы. – 2004. – № 6. – С. 38–41.

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 05.09.2012