

**А.Д. Козицын, Н.М. Труфанова, О.А. Попов**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЭКСТРУЗИОННОЙ ГОЛОВКЕ С АДАПТЕРОМ**

*Представлена трехмерная математическая модель процессов течения и теплообмена в канале кабельной головки с учетом адаптера. Рассмотрено влияние технологических параметров на процессы теплообмена при течении расплава полимера.*

Формующий инструмент при производстве кабелей с пластмассовой изоляцией представляет собой совокупность двух конструктивных элементов – адаптера и носиковой части кабельной головки. Поскольку существует множество статей по изучению процессов течения в носиковой части [1, 2], данная статья посвящена именно адаптеру экструзионной головки. Для получения качественной полимерной продукции необходимо, чтобы при течении полимера в адаптере не возникало негативных воздействий на него (перегревы, высокий перепад давления). Геометрия канала адаптера представлена на рис. 1.

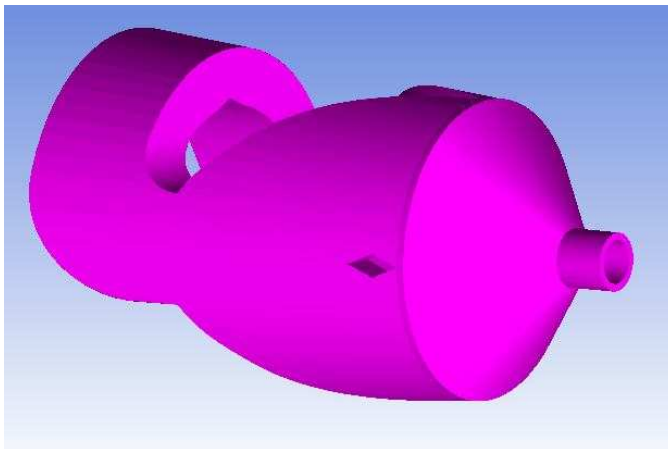


Рис. 1. Объемное изображение канала  
экструзионной головки (вид сбоку)

Математическое моделирование процесса тепломассопереноса расплава полимера в рассматриваемом канале основывается на законах сохранения энергии, количества движения и массы. В ходе моделирования были приняты следующие допущения: среда несжимаемая, расплав полимера без упругих свойств, массовые силы пренебрежимо малы, теплофизические свойства материалов постоянны.

С учетом принятых допущений система уравнений имеет вид [3]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi^2}{r} + v_\zeta \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right) = \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} - \frac{\tau_{\varphi\varphi}}{r} + \frac{\partial \tau_{r\zeta}}{\partial \zeta}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r v_\varphi}{r} + v_\zeta \frac{\partial v_\varphi}{\partial \zeta} \right) = \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\varphi})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{\varphi\zeta}}{\partial \zeta}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( v_r \frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\zeta}{\partial \varphi} + v_\zeta \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} \right) = \\ = -\frac{\partial P}{\partial \zeta} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{r\zeta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\zeta}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{\zeta\zeta}}{\partial \zeta}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho C \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + v_\zeta \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) + \Phi, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $r, \varphi, \zeta$  – радиальная, окружная и продольная цилиндрические координаты;  $v_r, v_\varphi, v_\zeta$  – компоненты вектора скорости;  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора девиатора напряжений;  $\frac{\partial P}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi}, \frac{\partial P}{\partial \zeta}$  – градиенты давления.

Компоненты тензора напряжений для несжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат запишутся как

$$\begin{aligned} \tau_{rr} = 2\mu_{\text{э}} \frac{\partial v_r}{\partial r}; \tau_{\varphi\varphi} = 2\mu_{\text{э}} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} \right); \tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = \mu_{\text{э}} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_{\varphi}}{r} \right) \right]; \\ \tau_{r\zeta} = \tau_{\zeta r} = \mu_{\text{э}} \left( \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} + \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial r} \right); \tau_{\zeta\varphi} = \tau_{\varphi\zeta} = \mu_{\text{э}} \left( \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \zeta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \varphi} \right); \tau_{zz} = 2\mu_{\text{э}} \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \zeta}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mu_{\text{э}}$  – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры [2],

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

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

Функция диссипации

$$\begin{aligned} \Phi = \tau_{rr} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \tau_{\varphi\varphi} \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \varphi} + v_r \right) + \tau_{\zeta\zeta} \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \zeta} + \tau_{r\varphi} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_{\varphi}}{r} \right) \right] + \\ + \tau_{r\zeta} \left( \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \zeta} + \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial r} \right) + \tau_{\varphi\zeta} \left( \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \zeta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \varphi} \right) = \mu_{\text{э}} \frac{I_2}{2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{2} = 2 \left[ \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \zeta} \right)^2 \right] + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_{\varphi}}{r} \right) \right]^2 + \\ + \left( \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \zeta} + \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \zeta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \varphi} \right)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Система уравнений (1–5) замыкается следующими граничными условиями:

– на всех твердых стенках принимаем условия прилипания и непроникновения;

– температура на корпусе матрицы равна температуре на дорне;

– на входе задаются расход материала и соответствующая ему параболическая скорость;

- на выходе канала задаются условия установившегося потока;
- на входе в канал задается температура расплава.

Для моделирования геометрии канала и разбиения модели на конечные элементы был выбран программный продукт ICEM CFD из пакета ANSYS. Поскольку канал симметричный, то для расчетов можно использовать лишь его половину, таким образом, сетка узловых элементов будет иметь вид, представленный на рис. 2.

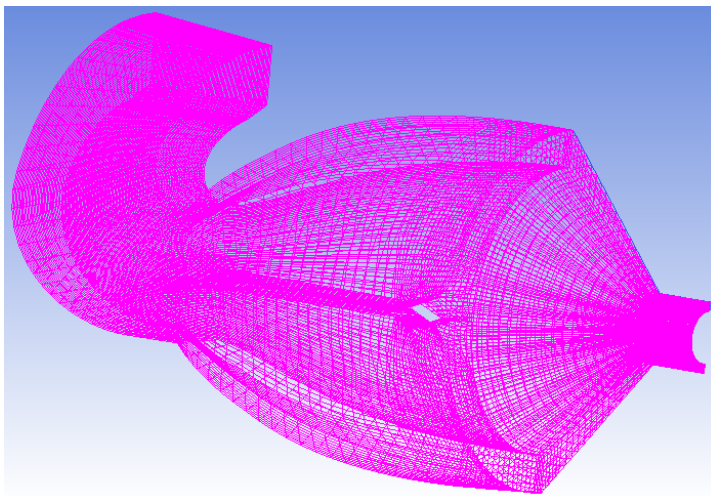


Рис. 2. Сетка узловых элементов канала истечения

Для расчетов был выбран программный модуль Ansys Fluent.

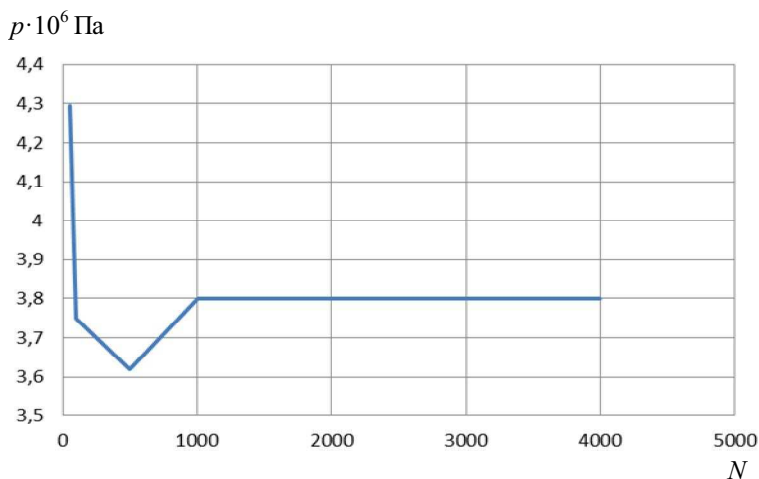


Рис. 3. Зависимость давления вблизи разделителя потоков от количества итераций

Из рис. 3 и 4 видно, что оптимальным режимом счета для данной модели является равномерная сетка с 7 узловыми элементами по минимальной высоте канала; количество итераций – не менее 1000.

Были произведены исследования процессов тепломассопереноса и проанализированы физические параметры модели. Ниже представлены температурные профили, профили давления и скорости движения расплава (рис. 5).

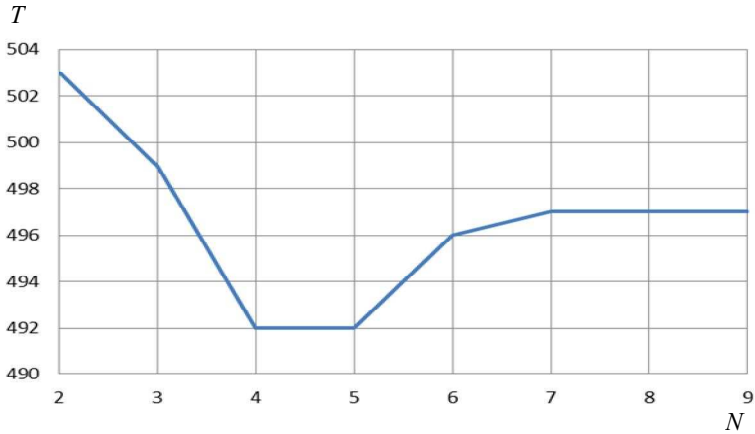


Рис. 4. Зависимость температуры вблизи разделителя потоков от количества узловых элементов в слое, где  $T$  – температура (K), а  $N$  – кол-во узловых элементов

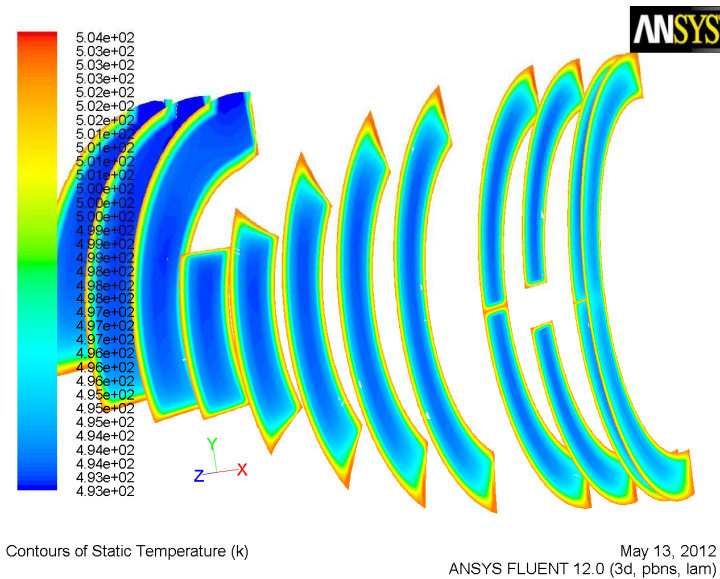


Рис. 5. Температурный профиль канала истечения

Из рис. 5 видно, что значительных перегревов, связанных с циркуляцией расплава, нет, а максимальное значение температуры расплава, ниже температуры корпуса экструзионной головки, это связано с тем, что температура поступающего в канал полимера на 10 градусов ниже, чем температура стенок канала. Таким образом, в процессе течения полимера температура материала успевает лишь приблизиться к заданной температуре стенки.

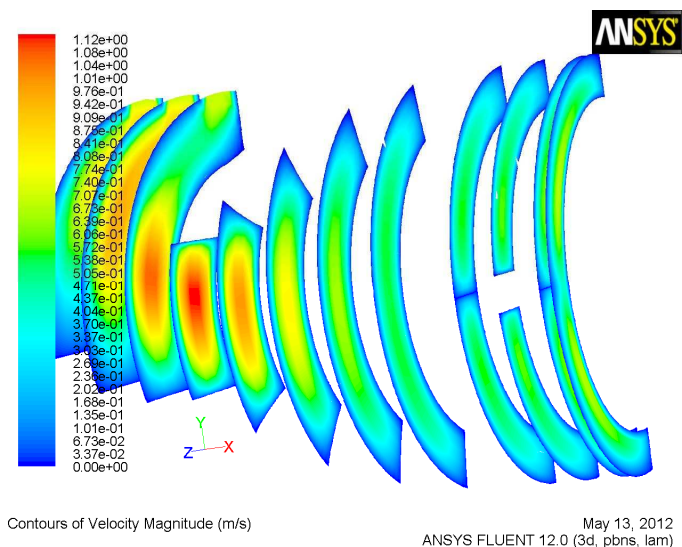


Рис. 6. Профиль скоростей канала истечения

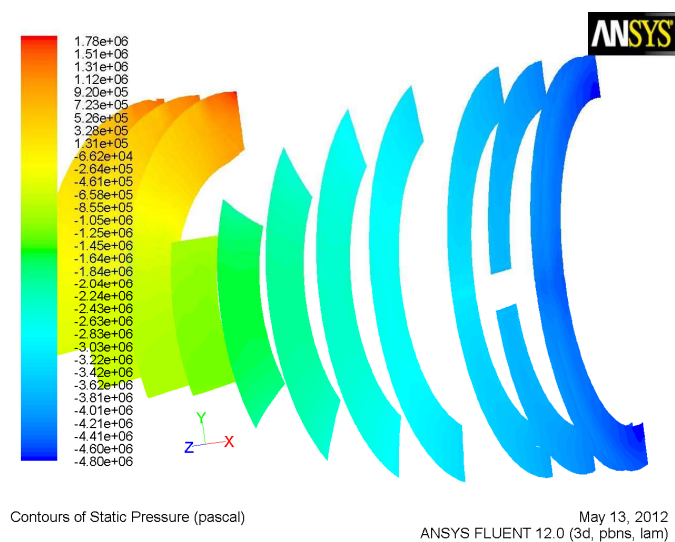


Рис. 7. Профиль давления канала истечения

На рис. 6 представлено распределение вектора скорости в разных течениях канала. Можно заметить, что максимальная скорость наблюдается в центральной части канала, где площадь поперечного сечения канала минимальная.

Поскольку при производстве полимерной продукции технологическим параметром является давление, создаваемое в экструдере, то расчет давления, реализуемого в адаптере экструзионной головки, представляется важным.

Из рис. 7 видно, что максимальное давление создается на входе в экструзионную головку, тогда как на выходе из нее давление падает. Это связано с тем, что в экструзионной головке канал истечения увеличивается, что приводит к падению давления более чем в 3 раза.

Таким образом, представленная трехмерная математическая модель может быть использована для исследования процессов тепло- и массопереноса в экструзионных головках с адаптером.

### **Библиографический список**

1. 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.
2. Савченко В.Г., Казаков А.В., Труфанова Н.М. Расчет влияния геометрии каналов технологического инструмента кабельной головки на возникновение вихревых потоков при наложении изоляции // Кабели и провода. – 2010. – № 2. – С. 11–13.
3. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

Получено 05.09.2012