

**А.Г. Щербинин, Е.В. Субботин, А.Е. Терлыч**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ШНЕКА НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЭКСТРУДЕРА**

*Предлагается математическая модель по определению температуры шнека. Проведено исследование влияния процессов теплопроводности в шнеке на перераспределение энергетических и температурных характеристик одночервячного пластицирующего экструдера.*

В современном кабельном производстве при изготовлении пластмассовой изоляции широкое применение находят одночервячные пластицирующие экструдеры. Качество изделий, получаемых на экструзионном оборудовании, во многом зависит от температурного режима переработки. Одним из регулируемых технологических параметров является температура корпуса. Температура шнека устанавливается естественным образом в процессе теплообмена и зависит от заданной температуры корпуса, числа оборотов шнека, расхода материала и его теплофизических и реологических свойств. При этом в процессе работы экструдера о распределении температуры в шнеке ничего неизвестно. Некоторые шнеки имеют продольное отверстие, которое предназначено для его охлаждения.

О распределении температуры в шнеке можно судить по экспериментальным данным или на основе соответствующих математических моделей. Поскольку шнек вращается, а длина отверстия в шнеке, предназначенного для его охлаждения, много больше диаметра (примерно 100:1), то использование промышленных устройств, контролирующих температуру, затруднительно. Поэтому наиболее перспективным способом определения температуры шнека и возможным способом ее регулирования является использование математического моделирования.

При построении модели для определения температуры шнека вводятся следующие допущения. Процесс считается стационарным. Винтовой канал (рис. 1) заменяется кольцевым зазором (рис. 2) с учетом соотношения объемов винтовой нарезки и винтового канала. Сложное движение полимера в винтовом канале червяка заменяется стержневым в коаксиальном зазоре. Величина скорости определяется из массового расхода. Теплофизические свойства стали и полимера являются величинами постоянными, не зависящими от температуры.

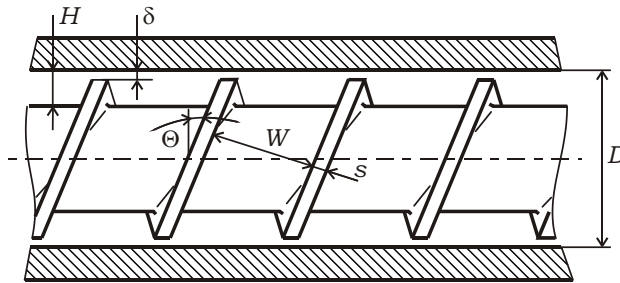


Рис. 1. Схема винтового канала экструдера

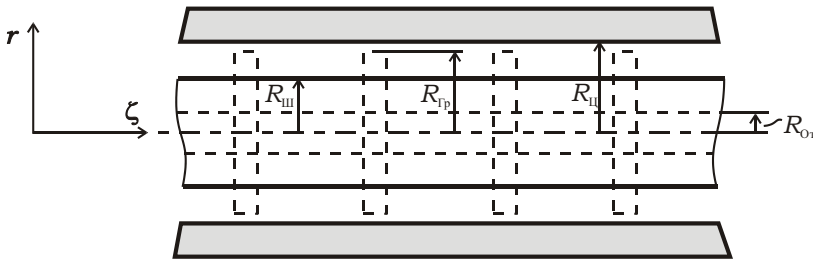


Рис. 2. Схема модели для расчета температуры в шнеке

На основании сделанных упрощающих предположений задача по определению температуры в шнеке в осесимметричной постановке сводится к решению уравнения энергии для полимера [1]

$$\rho_{\text{п}} C_{\text{п}} \bar{v}_{\zeta} \frac{\partial T}{\partial \zeta} = \lambda_{\text{п}} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial \zeta^2} \right) + q_{\text{в}} \quad (1)$$

и уравнения теплопроводности для шнека

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial \zeta^2} = 0, \quad (2)$$

где  $T$  — температура;  $\bar{v}_{\zeta}$  — средняя скорость движения полимера в кольцевом зазоре модели;  $\rho_{\text{п}}$  — плотность полимера;  $C_{\text{п}}$  — коэффициент

теплоемкости полимера;  $\lambda_{\Pi}$  – коэффициент теплопроводности;  $q_v$  – удельная мощность диссипативного источника тепла в результате действия сил вязкого трения, распределение которой по длине определяется по вышеприведенной математической модели процессов движения и теплообмена пластицирующего экструдера.

Для получения полной математической формулировки задачи уравнения (1), (2) дополняются граничными условиями по температуре. Температура корпуса определяется технологическими режимами переработки:

$$T|_{r=R_{\Pi}} = 0, \quad (3)$$

Если шнек не имеет отверстия, то в силу осесимметричности задачи на оси граничное условие имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} = 0. \quad (4)$$

Если рассматривается шнек с осевым продольным отверстием, которое может быть использовано для охлаждения водой, то применяется граничное условие третьего рода:

$$\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_{Or}} = -\frac{\alpha}{\lambda_M}(T|_{r=R_{Or}} - T_0), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $T_0$  – температура подвижной среды в отверстии,  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности стального шнека.

Граничное условие на входе ( $\zeta = 0$ ) задается следующим образом:

$$\begin{aligned} T|_{r=R_{Or} \div R_{Ш}} &= T_{Ш0}, \\ T|_{r=R_{Ш} \div R_{\Pi}} &= T_{\Pi}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T_{Ш0}$  – температура шнека при  $\zeta = 0$ ,  $T_{\Pi}$  – температура полимера на входе.

В силу того, что длина шнека много больше диаметра, граничное условие на выходе экструдера определяется из условия установления теплового потока:

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{\zeta=L} = 0, \quad (7)$$

где  $L$  – осевая длина шнека.

На границе раздела металл–полимер должно выполняться граничное условие четвертого рода:

$$\lambda_{\text{м}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} = \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} . \quad (8)$$

Задача решается методом конечных элементов. Предлагается следующая методика расчета температуры шнека: полимер совершает стержневое движение в кольцевом зазоре между шнеком и внутренней поверхностью цилиндра при условии, что гребни отсутствуют, при этом тепловой поток от корпуса к шнеку через зазор между гребнями учитывается итерационно. На каждом шаге итерации по разности температур между корпусом и шнеком определяется плотность теплового потока от корпуса к гребню нарезки червяка через радиальный зазор. Вычисленный таким образом тепловой поток прикладывается к шнеку. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока максимальная разность по температуре шнека между текущей и предыдущей итерацией в узлах расчетной области по абсолютному значению не будет меньше некоторой наперед заданной малой величины.

Численные исследования проведены для экструдера с классической геометрией шнека, геометрические размеры которого представлены в табл. 1. В качестве полимера выбран полиэтилен (ПЭ), теплофизические и реологические свойства которого приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 1

Базовая геометрия шнека

№ п/п	Геометрические размеры	Значение
1	Внутренний диаметр цилиндра (корпуса), мм	160,0
2	Наружный диаметр шнека, мм	159,4
3	Шаг винтовой нарезки, мм	160,0
4	Ширина канала $W$ , мм	137,3
5	Ширина гребня винтовой нарезки $S$ , мм	15,3
6	Длины геометрических зон загрузки, сжатия и дозирования $\Delta Z_1 / \Delta Z_2 / \Delta Z_3$ , витки	10/10/7
7	Суммарная длина шнека $Z_{\text{с}}$ , витки	27
8	Глубина канала в зоне загрузки $H_1$ , мм	16
9	Глубина канала в зоне дозирования $H_2$ , мм	4
10	Угол подъема винтовой линии $\Theta$	17°39'
11	Радиальный зазор между гребнем шнека и корпусом $\delta$ , мм	0,3
12	Диаметр отверстия в шнеке, мм	48

Зависимость вязкости от скорости сдвига определяется степенным законом [2]. Индекс  $s$  в табл. 2 соответствует твердому состоянию полимера, а  $m$  – расплавленному.

Таблица 2

Реологические и теплофизические свойства полимеров

Полимер	$n$	$\mu_0$	$T_0$	$\beta$	$T_{\Pi}$	$\rho_s$	$\rho_m$	$\lambda_s$	$\lambda_m$
	–	Па·с <sup><math>n</math></sup>	°C	1/°C	°C	кг/м <sup>3</sup>		Вт/(м·°C)	
ПЭ	0,44	10825	160	0,018	110	919,0	779,0	0,335	0,182

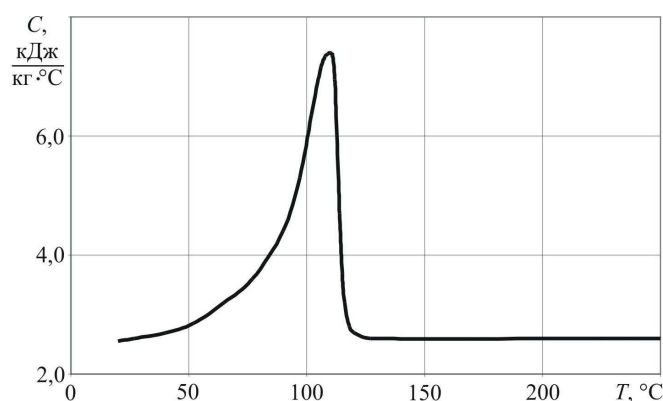


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от температуры

Начальная температура гранулята  $T_{z0}$  равна 20 °C. Число оборотов шнека  $N_{ш} = 60$  об/мин. Температура цилиндра экструдера  $T_{\Pi}$  на первых семи витках линейно растет с 92 до 200 °C, далее до конца не изменяется. Массовая производительность экструдера  $G_0 = 0,06$  кг/с.

Рабочие характеристики экструдера с учетом определяемой температуры шнека находятся путем совместной итерационной процедуры решения задачи тепломассопереноса полимера в канале экструдера [3, 4] и представленной здесь задачи по определению температуры шнека.

Энергетический баланс экструдера определяется соотношением

$$Q_i = Q_{\lambda} + Q_{\phi}, \quad (9)$$

где  $Q_i$  – изменение внутренней энергии полимера в единицу времени;  $Q_{\phi}$  – мощность диссипативного источника тепла;  $Q_{\lambda}$  – мощность теплового потока подводимого (отводимого) через стенки канала.

На рис. 4 приведено изменение  $Q_i$ ,  $Q_\Phi$  и  $Q_\lambda$  по длине канала. Из рисунка видно, что сразу после окончания зоны загрузки разогрев материала в канале происходит только за счет диссипативной энергии, а корпус работает в режиме отвода тепла.

Величина  $Q_\lambda$  определяется суммой двух составляющих:

$$Q_\lambda = Q_{\lambda\text{Ц}} + Q_{\lambda\text{Ш}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\lambda\text{Ц}}$  – тепло, подводимое (отводимое) через стенки цилиндра, а  $Q_{\lambda\text{Ш}}$  – через стенки шнека.

На рис. 5 показано изменение подводимого (отводимого) тепла от цилиндра  $Q_{\lambda\text{Ц}}$  и шнека  $Q_{\lambda\text{Ш}}$  к полимеру в единицу времени по длине канала.

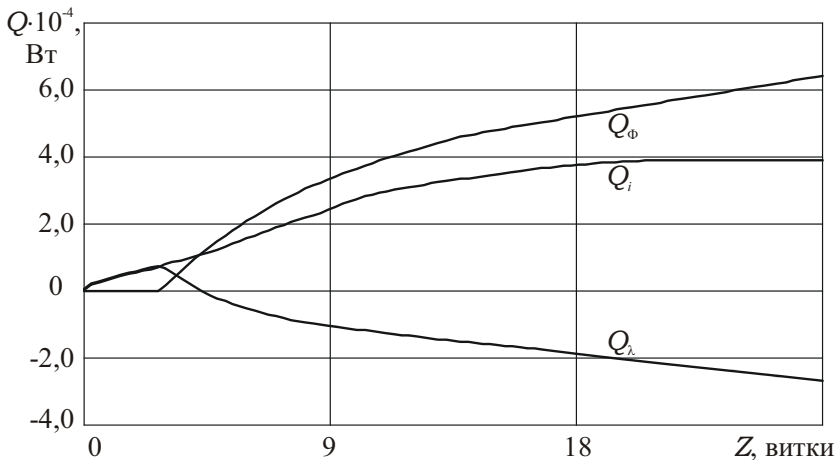


Рис. 4. Изменение внутренней энергии полимера, диссипативной и подводимой (отводимой) через стенки канала составляющих тепла в единицу времени по длине канала

Из рис. 5 видно, что  $Q_{\lambda\text{Ш}}$  по длине сначала возрастает. На этом участке шнек отдает тепло полимеру. Максимальное значение  $Q_{\lambda\text{Ш}}$  достигает на длине, где происходит пересечение зависимостей средней температуры  $T_{\text{Ср}}$  и температуры шнека  $T_{\text{Ш}}$  (рис. 5). Величина  $Q_{\lambda\text{Ш}}$  на этой длине составляет 30 % от величины  $Q_{\lambda\text{Ц}}$ . Далее до конца канала тепло переходит от более горячего полимера к шнеку. Поскольку

на внутренней поверхности шнека задана адиабата, то величина  $Q_{\lambda\text{Ш}}$  в конце шнека стремится к 0. Таким образом, массивный стальной шнек, имеющий большое значение коэффициента теплопроводности, вносит достаточно существенный вклад в перераспределение энергетических параметров экструдера.

По изменению  $Q_{\lambda\text{Ц}}$  на рис. 5 видно, что корпус практически на всей длине работает в режиме отвода тепла, за исключением первых трех витков.

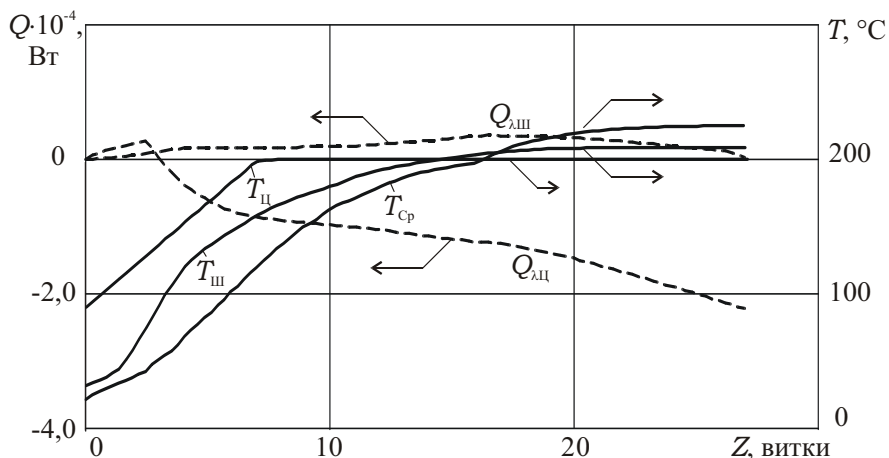


Рис. 5. Изменение энергетических параметров и температуры по длине канала

Температура шнека  $T_{\text{Ш}}$  на последних 12,5 витках превышает температуру цилиндра  $T_{\text{Ц}}$ . К выходу средняя температура расплава полиэтилена достигает 226 °С, температура шнека – 209 °С при температуре корпуса 200 °С.

Представленная в данной работе модель совместно с моделью [3] позволяет получать наиболее полную картину процесса переработки полимеров на одночервячных экструзионных агрегатах с учетом геометрических и технологических параметров, а также свойств перерабатываемого материала. Кроме того, с помощью данного подхода можно подбирать режимы охлаждения шнека водой или другими теплоносителями с целью обеспечения необходимого качества изделия и увеличения производительности экструдера.

### Библиографический список

1. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщение 2: Математическая модель по определению температуры шнека // Пластические массы. – 2004. – № 8. – С. 38–40.

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