

УДК 621.315

**А.Н. Федосеева, А.В. Казаков**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ АДАПТЕРА НА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В КАНАЛЕ ЭКСТРУДЕРА**

Представлена трехмерная математическая модель процессов течения и теплообмена в зоне дозирования шнекового агрегата с адаптером. Рассмотрено влияние геометрических параметров адаптера на процессы тепломассообмена при течении расплава полимера.

В математической модели были учтены вязкостные характеристики материала от температуры и скорости сдвига, канал с адаптером рассматривался в трехмерной пространственной системе без разворачивания канала на плоскость и без использования принципа обращенного движения.

**Ключевые слова:** математическая модель, шнек, полимер, зона дозирования, адаптер, плавление.

**A.N. Fedoseyeva, A.V. Kazakov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE ADAPTER ON HEAT AND MASS TRANSFER IN A POLYMER MELT EXTRUDER CHANNEL**

Presented a three-dimensional mathematical model of flow and heat transfer in the metering auger unit with an adapter. The effect of geometrical parameters on the processes temlomassoobmena adapter for flow of the polymer melt.

In mathematical models have been considered the material of the viscosity characteristics of the temperature and shear rate, the channel adapter considered in three-dimensional spatial reference system, without the unfolding plane, and channel without using the reversed principle of motion.

**Keywords:** mathematical model, screw, polymer dosing area, adapter melting

При производстве кабельной продукции из пластмассовой изоляции полимер, как правило, находится только в жидком состоянии в следующих конструктивных элементах экструзионного агрегата: зона дозирования, адаптер и носиковая часть кабельной головки. В наше

время кабельная головка достаточно изучена, поэтому данное исследование посвящено только зоне дозирования с адаптером.

Математическая модель основывается на рассмотрении законов сохранения массы, количества движения и энергии, реологических уравнений состояний, дополненных граничными условиями и свойствами материала.

С целью упрощения математической модели принимаются некоторые допущения: процесс стационарный; гравитационные и инерционные силы пренебрежимо малы; плотность, теплоемкость и теплопроводность постоянны; на границах модели, образованных формирующим инструментом, задаются условия прилипания; поток утечек через гребень нарезки шнека не учитывается.

С учетом сделанных допущений в цилиндрической системе координат математическая модель выглядит следующим образом:

– уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) = 0;$$

– уравнения движения:

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\Theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \Theta} - \frac{V_\Theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{rr} r) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\Theta}}{\partial \Theta} - \frac{\tau_{\Theta\Theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z};$$

$$\begin{aligned} \rho \left( V_r \frac{\partial V_\Theta}{\partial r} + \frac{V_\Theta}{r} \frac{\partial V_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{V_r V_\Theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\Theta}{\partial z} \right) = \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \Theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{r\Theta} r^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\Theta\Theta}}{\partial \Theta} + \frac{\partial \tau_{z\Theta}}{\partial z}; \end{aligned}$$

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\Theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \Theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{rz} r) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\Theta z}}{\partial \Theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z};$$

– уравнение энергии:

$$\rho C \left( V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\Theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \Theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \Theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi;$$

– реологические уравнения состояния:

$$\tau_{rr} = 2\mu_\Theta \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \tau_{\Theta\Theta} = 2\mu_\Theta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{V_r}{r} \right), \quad \tau_{zz} = 2\mu_\Theta \frac{\partial V_z}{\partial z},$$

$$\tau_{rz} = \mu_{\ominus} \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right), \quad \tau_{r\Theta} = \mu_{\ominus} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_{\Theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \Theta} \right),$$

где  $\mu_{\ominus}$  – эффективная вязкость, зависящая от скорости сдвига;

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

где  $\mu_0$  – начальная вязкость;  $I_2$  – второй инвариант тензора скоростей деформации;  $n$  – показатель аномалии вязкости;  $V_z, V_r, V_{\Theta}$  – компоненты вектора скорости;  $\tau_{i,j}(i, j = r, \theta, z)$  – компоненты тензора напряжений,  $T$  – температура,  $\beta$  – температурный коэффициент,  $T_0$  – начальная температура [1].

Численные исследования проведены для экструдера с классической геометрией с параметрами, указанными в табл. 1 [2]. Геометрические размеры зоны дозирования и адаптера представлены на рис. 1.

Таблица 1

Базовая геометрия зоны дозирования в шнеке

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 вдоль оси шнека, мм	144,7
5	Ширина гребня винтовой нарезки $S$ , мм	15,3
6	Длина зоны дозирования, витки	7
7	Глубина канала в зоне дозирования $H_2$ , мм	4

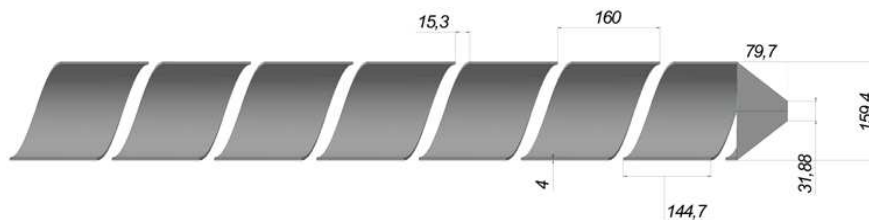


Рис. 1. Геометрические размеры зоны дозирования с адаптером

Была исследована зависимость параметров течения полимера от вида канала истечения. Изменялись выходной диаметр и длина адаптера. Геометрические размеры адаптера приведены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические размеры адаптера

Номер модели	Диаметр выходного отверстия адаптера	Длина адаптера
1	$0,15d$	$0,5d$
2	$0,2d$	$0,5d$
3	$0,3d$	$0,5d$
4	$0,4d$	$0,5d$
5	$0,2d$	$d$
6	$0,2d$	$1,5d$

Здесь  $d$  – это наружный диаметр шнека, м.

В качестве полимера выбран полиэтилен, теплофизические и реологические свойства которого приведены в табл. 3 [3].

Таблица 3

Реологические и теплофизические свойства полиэтилена

1	Плотность, $\text{кг/м}^3$	779
2	Вязкость, Па·с	10 825
3	Теплоемкость, Дж/кг·К	2600
4	Теплопроводность, Вт/м·К	0,182
5	Коэффициент аномалии	0,44
6	Температурный коэффициент вязкости, 1/К	0,018

Технологический режим переработки полимера приведен ниже [4].

Число оборотов шнека, об/мин	60
Температура адаптера, шнека и корпуса экструдера, °С	200
Массовый расход, кг/с	0,06

Для моделирования и решения поставленной задачи были использованы *ANSYS* с библиотекой *ICEM CFD* и *ANSYS Fluent*. Ниже представлены результаты расчета.

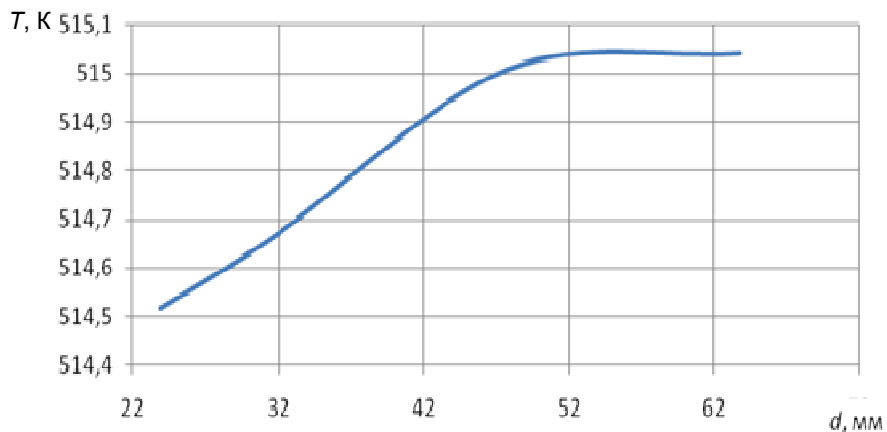


Рис. 2. Распределение температуры расплава полимера на выходе в зависимости от выходного диаметра адаптера

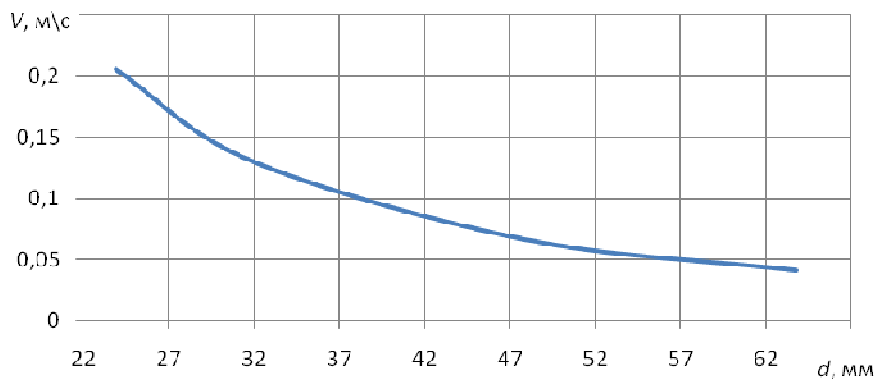


Рис. 3. Распределение скорости течения расплава полимера на выходе в зависимости от выходного диаметра адаптера

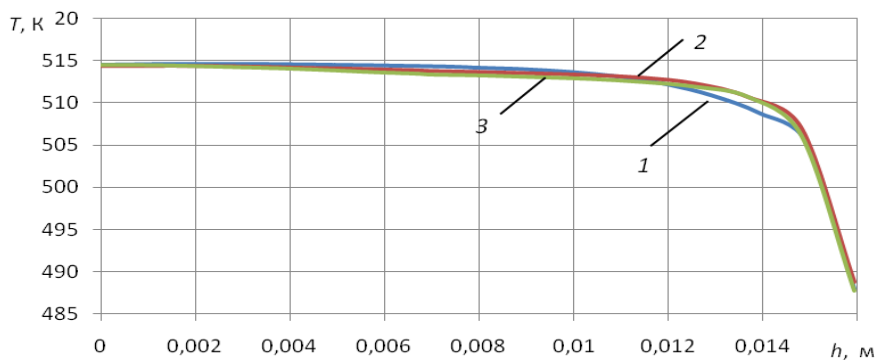


Рис. 4. Радиальное распределение температур по высоте канала в адаптере: 1, 2, 3 – адаптеры с разной длиной,  $l_1 > l_2 > l_3$

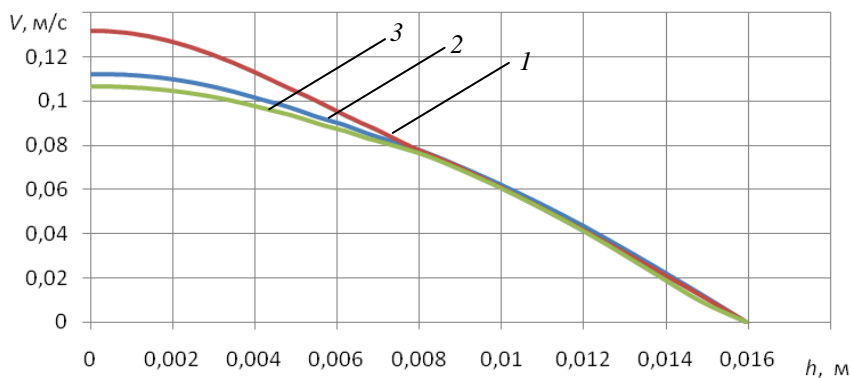


Рис. 5. Радиальное распределение скоростей по высоте канала в адаптере: 1, 2, 3 – адаптеры с разной длиной,  $l_1 > l_2 > l_3$

На рис. 2–5 видно, что при увеличении выходного диаметра адаптера уменьшается скорость течения расплава на 79 %, при увеличении длины адаптера температура и скорость расплава полимера изменяются незначительно.

Из проведенного исследования видны зависимость и незначительное изменение параметров течения полимера от выходного диаметра и длины адаптера соответственно. Данная трехмерная модель может использоваться при исследовании процессов тепло- и массопереноса в экструзионном агрегате.

### Библиографический список

1. Труфанова Н.М. Переработка полимеров. – М., 2009. – 159 с.
2. Субботин Е.В., Черняев В.В. Исследование влияния геометрии шнека на процесс плавления // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 3. – С. 25–32.
3. 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.
4. Гадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

## References

1. Trufanova N.M. Pererabotka polimerov [Processing of polymers]. Moscow, 2009. 159 p.
2. Subbotin E.V., Cherniaev V.V. Issledovanie vliianiia geometrii shneka na protsess plavleniia [Investigation of the influence of the screw geometry on the melting process]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2009, no 3, pp. 25-32.
3. Savchenko V.G., Kazakov A.V., Trufanova N.M. Raschet vliianiia geometrii kanalov tekhnologicheskogo instrumenta kabel'noi golovki na vzniknovenie vikhrevykh potokov pri nalozhenii izoliatsii [The calculation of the geometry of the channel process tool cable head on the occurrence of eddy currents when applied insulation]. *Kabeli i provoda*, 2010, no. 2, pp. 11-13.
4. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov. Moscow: Khimiia, 1984. 632 p.

## Сведения об авторах

**Федосеева Анастасия Николаевна** (Пермь, Россия) – студентка кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

**Казаков Алексей Владимирович** (Пермь, Россия) кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

## About the Authors

**Fedoseyeva Anastasia Nikolaevna** (Russian Federation) – Student of the chair Designing and technology in electrical engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

**Kazakov Alexey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair Design and Technology in electrical engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 23.04.2014