

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ЭКСТРУЗИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ\*

Н.М. Труфанова, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
Е.В. Субботин, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
А.Г. Щербинин, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
А.В. Казаков, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
С.В. Ершов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Выполнены численные исследования процессов экструзии нагревостойких полимерных композиций Фторопласт-4МБ, Teflon FEP 345, Tefzel ETFE 280 и полиэфирэфиркетон РЕЕК 151G, обладающих уникальными эксплуатационными свойствами. В работе использовалась пространственная математическая модель процессов теплопереноса нелинейновязких полимерных сред в условиях фазового перехода в винтовом канале экструдера с учетом теплопроводности шнека. Реологические и теплофизические свойства перерабатываемых материалов были определены в результате проведения комплексных экспериментальных исследований. По результатам численных исследований были построены напорно-расходные характеристики, картины изменения формы пробки, температурного поля и компонент скорости в винтовом канале экструдера. Показано, что производительность экструдера может существенно зависеть от свойств перерабатываемого материала. Установлено, что при переработке высоковязких полимерных композиций Фторопласт-4МБ, Teflon FEP 345 практически во всем диапазоне изменения частоты вращения шнека экструдер работает в режиме охлаждения (в отличие от материалов РЕЕК и Tefzel), компенсируя избыток тепловой энергии, выделяющейся в результате диссипации. Отмечено, что численные исследования предоставляют дополнительные возможности по изучению процессов экструзии и могут использоваться как инструмент при разработке новых конструкций шнеков экструдеров и подборе рациональных технологических режимов переработки для новых полимерных композиций.

**Ключевые слова:** *теплообмен, математическая модель, численный метод, полимер, экструзия, шнек.*

В настоящее время использование полимерных материалов, обладающих уникальными эксплуатационными свойствами при работе в условиях высоких температур, давлений и агрессивных сред, является одной из приоритетных

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Урал (грант № 13-08-96034).

задач для ряда отраслей промышленности. При экструзии подобных нагревостойких полимерных композиций возникает ряд проблем, связанных с необходимостью выбора подходящего оборудования и рациональных режимов их переработки. Для решения поставленной задачи были проведены комплексные экспериментальные работы по определению реологических и теплофизических свойств перерабатываемых материалов и выполнены численные исследования процессов движения и теплообмена нагревостойких полимерных композиций в условиях фазового перехода и вынужденной конвекции в каналах экструзионного оборудования.

Исследованию процессов переработки полимерных материалов на шнековых аппаратах и их расчету посвящено немало работ отечественных и зарубежных авторов [1, 4, 5, 7–12]. Математическое представление процессов движения и теплообмена полимеров в винтовом канале пластицирующего экструдера основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [1, 3–5]:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P + (\nabla \cdot \tilde{\tau}); \quad (2)$$

$$\rho C(\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot \lambda \nabla T + (\tilde{\tau} : \nabla \mathbf{V}), \quad (3)$$

где  $\rho$  и  $C$  – плотность и удельная теплоемкость полимера;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\mathbf{V}$  – вектор скорости;  $T$  – температура;  $P$  – гидростатическое давление;  $\tilde{\tau}$  – тензор девиатора напряжений, который связан тензором скоростей деформации выражением  $\tilde{\tau} = \mu_3 \tilde{\gamma}$ ;  $(\tilde{\tau} : \nabla \mathbf{V})$  – необратимый прирост внутренней энергии на единицу объема вследствие диссипации энергии при вязком течении;  $\tilde{\gamma}$  – тензор скоростей деформации;  $\mu_3$  – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры

$$\mu_3 = \mu_0 \exp(-\beta(T - T_0)) \tilde{\gamma}^{(n-1)}, \quad (4)$$

здесь  $\mu_0$  – коэффициент консистенции при температуре  $T_0$ ;  $\beta$  – температурный

коэффициент вязкости;  $n$  – показатель аномалии вязкости.

На корпусе экструдера задается известное распределение температуры, определяемое технологическими режимами работы оборудования. Температурное поле шнека определяется в результате итерационной процедуры совместного решения задачи общего теплообмена экструдера [6]. Температура материала на входе в зону загрузки равна температуре окружающей среды. Граничные условия для составляющих скоростей определяются из условия прилипания жидкости к твердым непроницаемым поверхностям (стенкам канала и поверхности раздела фаз).

Представленная математическая модель процессов движения, плавления и течения полимеров в винтовом канале одношнекового экструдера, с учетом теплопроводности шнека реализована в программном комплексе «Universal Screw 12» [2].

Численные исследования были проведены для экструдера, геометрические размеры которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Базовая геометрия шнека**

Внутренний диаметр цилиндра (корпуса), мм	45,0
Шаг винтовой нарезки, мм	45,0
Ширина канала $W$ , мм	40,0
Ширина гребня винтовой нарезки $s$ , мм	5,0
Суммарная длина шнека $Z_K$ , витки	26,2
Угол подъема винтовой линии $\Theta$ , °	17,65
Радиальный зазор между гребнем шнека и корпусом $\delta$ , мм	0,1

Для исследования были выбраны полиэтилен и нагревостойкие материалы: фторсодержащие полимеры (Фторопласт-4МБ, Teflon FEP 345, Tefzel ETFE 280) и полиэфирэфиркетон (ПЕЕК 151G). Реологические и теплофизические свойства вышеуказанных полимеров приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Поскольку зависимости теплофизических характеристик рассматриваемых полимеров от температуры представляют собой немонотонные кривые, то при проведении расчетов последние аппроксими-

Таблица 2

Реологические и теплофизические свойства полимеров

Полимер	$n$	$\mu_0$	$T_0$	$\beta$	$T_{II}$	$\rho_s$	$\rho_m$	$\lambda_s$	$\lambda_m$
	–	Па·с <sup><math>n</math></sup>	°C	1/°C	°C	кг/м <sup>3</sup>		Вт/(м·°C)	
Полиэтилен	0,44	10825	160	0,018	110	919	779	0,335	0,182
Фторопласт-4МБ	0,44	47197	280	0,011	244	1690	1437	0,250	0,250
Teflon FEP 345	0,49	41339	320	0,011	306	1690	1437	0,250	0,250
Tefzel ETFE 280	0,56	8900	310	0,025	263	1690	1437	0,250	0,250
PEEK 151G	0,72	1290	360	0,008	345	1320	1120	0,290	0,290

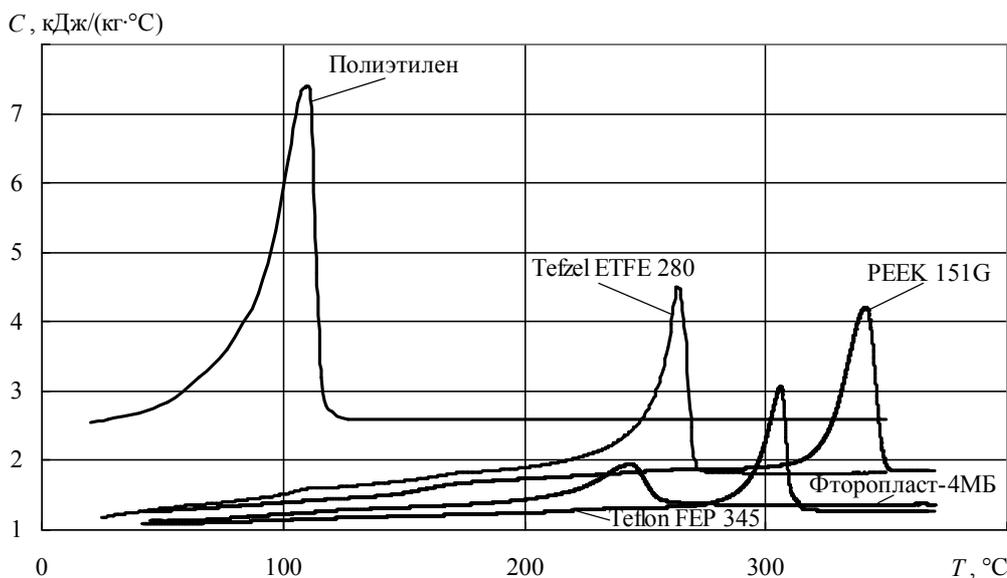


Рис. 1. Зависимость удельной теплоемкости полимеров от температуры

ровались кусочно-линейными функциями. Индекс  $s$  в табл. 2 соответствует твердому состоянию полимера, а  $m$  – расплавленному.

Начальная температура гранулята для всех полимеров задавалась равной 20°C. Температура цилиндра экструдера  $T_{Ц}$  из-

менялась по длине зон так, как показано на рис. 2.

На рис. 3 представлены характерные картины изменения формы твердой пробки при частоте вращения шнека 40 об./мин и объемном расходе  $4,08 \cdot 10^{-06}$  м<sup>3</sup>/с для ПЭ и нагревостойких материалов: Ф4МБ,

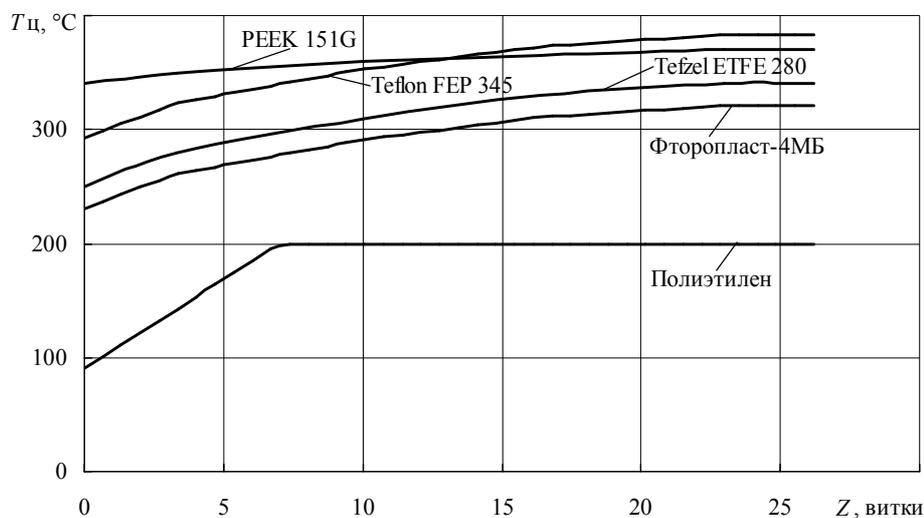


Рис. 2. Изменение температуры цилиндра экструдера

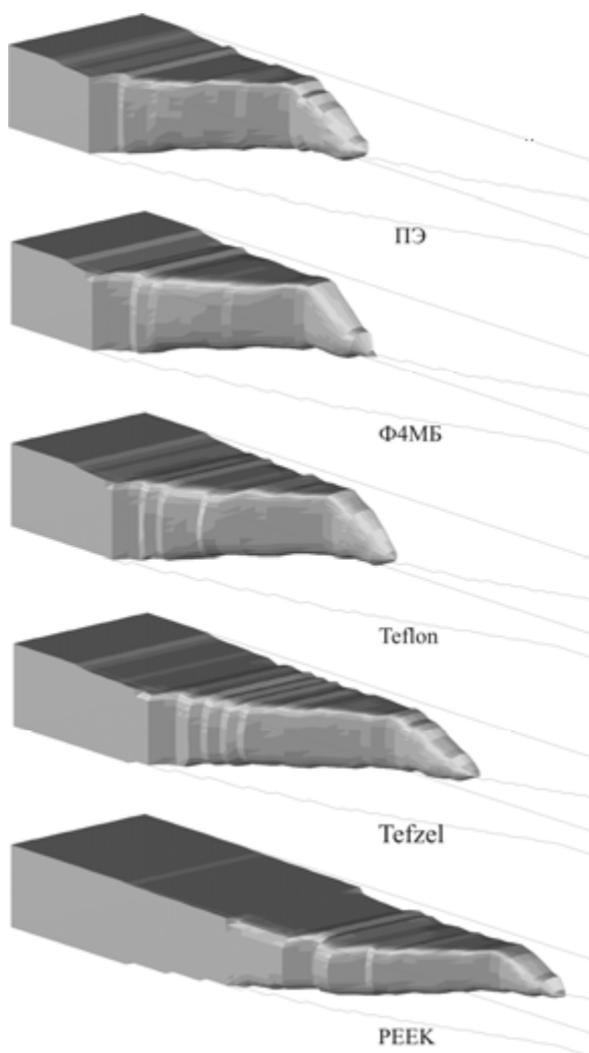


Рис. 3. Изменение формы пробки по длине канала для исследуемых материалов

Teflon, Tefzel и PEEK. Из рис. 3 видно, что наибольшая длина зоны плавления реализуется при переработке PEEK. Это обусловлено тем, что превышение температуры корпуса над температурой плавления для этого материала составляет 25°C, тогда как для остальных материалов – больше 70°C.

Для проведения сравнительного анализа интегральных характеристик работы пластицирующего экструдера для указанных материалов были проведены численные исследования, для которых частоту вращения шнека изменяли в диапазоне от 10 до 60 об./мин с шагом 10 об./мин. На рис. 4 представлены зависимости производительности экструдера от числа оборотов шнека, которые для всех материалов имеют характер близкий к линейному. Из рис. 4 видно, что производительность экструдера при переработке нагревостойкого материала PEEK практически вдвое меньше, чем при переработке других нагревостойких материалов и полиэтилена.

По результатам численных исследований установлено, что для материалов Ф4МБ и Teflon практически во всем диапазоне изменения частоты вращения шнека экструдер работает в режиме охлаждения (в отличие от материалов PEEK, Tefzel и ПЭ), компенсируя избыток тепловой энергии, выделяющейся в результате диссипации. Такой режим работы

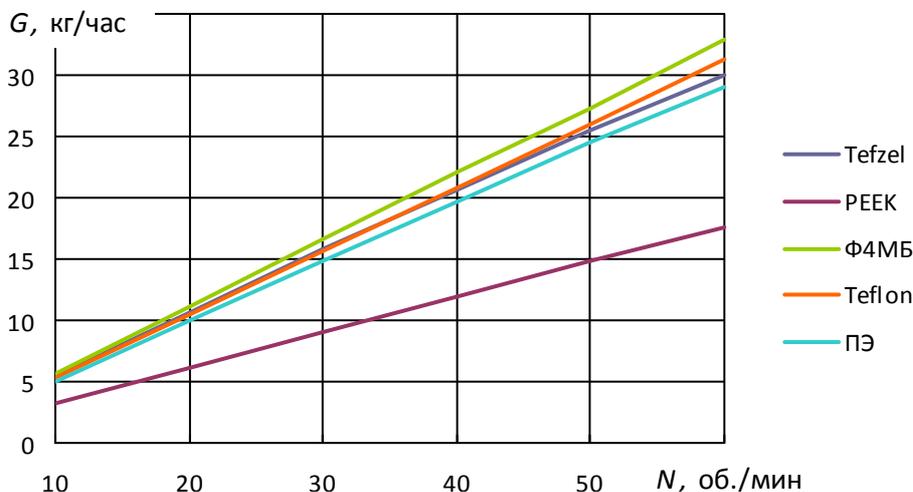


Рис. 4. Зависимости производительности экструдера от частоты вращения шнека

экструдера характерен при переработке полимеров, расплавы которых обладают высоким значением вязкости. Кроме того, избыточная мощность диссипативного источника тепла приводит к перегревам расплава на выходе из экструдера, что видно из рис. 5.

Таким образом, по результатам работы можно сделать вывод, что численные исследования предоставляют дополнительные возможности при изучении процессов экструзии, позволяющие находить опти-

мальные технические решения при разработке новых конструкций шнеков экструдеров, сводя к минимуму дорогостоящие натурные испытания; подбирать рациональные технологические режимы переработки при переходе на новые полимерные композиции; выявлять скрытые особенности изучаемого процесса; определять дифференциальные и интегральные характеристики работы экструдера с учетом геометрических, технологических параметров и свойств перерабатываемого материала.

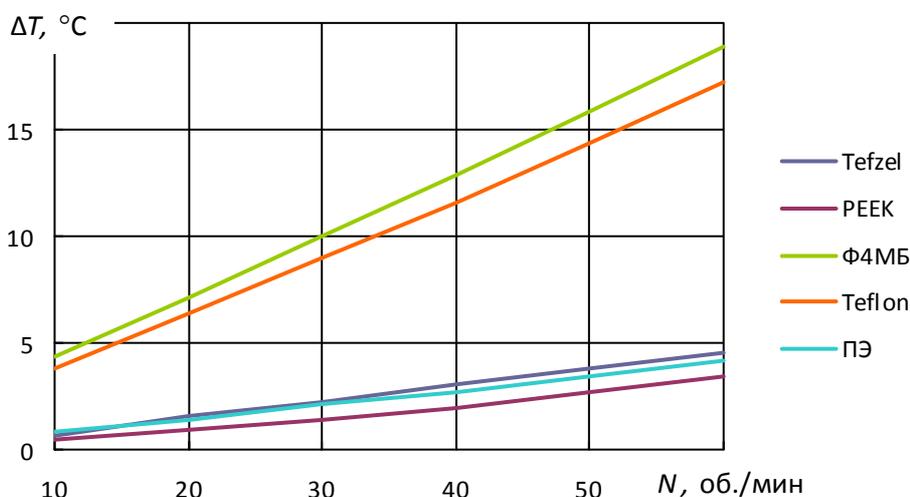


Рис. 5. Зависимости превышения средней температуры расплава над температурой корпуса на выходе из экструдера от частоты вращения шнека

#### Библиографический список

1. Раувендаль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2008. – 786 с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660591, РФ. Программный комплекс по расчету процессов теплопереноса полимерных материалов в каналах одношнековых экструдеров («Universal Screw 12») / Субботин Е.В., Щербинин А.Г.; правообладатель ФГБОУ ВПО «ПНИПУ». – № 2012618748. Заявл. 16.10.2012; опублик. 23.11.2012.
3. Субботин Е.В., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М. Численное исследование процессов течения полимеров в условиях фазового перехода в винтовых каналах экструдеров при производстве пластмассовой изоляции // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 171–177.
4. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
5. Труфанова Н.М., Щербинин А.Г., Янков В.И. Плавление полимеров в экструдерах. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 336 с.
6. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одношнекового пластицирующего экструдера. Сообщение 2. Математическая модель по определению температуры шнека // Пластические массы. – 2004. – № 8. – С. 38–40.
7. Altinkaynak A., Gupta M., Spalding M.A., Crabtree S.L. Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D Finite Element Simulations // International Polymer Processing. – 2011/02. – P. 182–196. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2419>
8. Das M.K., Ghoshdastidar P.S. Quasi two-dimensional and fully two-dimensional computer models of flow and conjugate heat transfer in the metering section of a single-screw plasticating extruder: a comparative study // In Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference. – 1994. – Vol. 2. – P. 331–336.
9. Ghoshdastidar P.S., Ghai G., Chhabra R.P. Computer simulation of three-dimensional transport during moistened defatted soy flour processing in the metering section of a single-screw extruder // Proc. Inst. Mech. Eng., Part C. – 2000. – Vol. 214. – P. 335–349. <http://dx.doi.org/10.1243/0954406001523001>

10. He H., Zhou J. Simulation of cottonseed cake melt flow in metering zone of a single screw extruder // Front. Chem. Eng. China. – 2010. – № 4(3). – P. 263–269. <http://dx.doi.org/10.1007/s11705-009-0276-4>
11. Lin P., Jaluria Y. Conjugate Thermal Transport in the Channel of an Extruder for Non-Newtonian Materials // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1998. – Vol. 41. – P. 3239–3253.
12. Syrjälä S. On the analysis of fluid flow and heat transfer in the melt conveying section of a single-screw extruder // Numer. Heat Transfer, Part A. – 1999. – Vol. 35. № 1. – P. 25–47. <http://dx.doi.org/10.1080/104077899275353>

**MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE EXTRUSION OF NON-LINEAR POLYMER COMPOSITIONS AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THEIR PROPERTIES**

N.M. Trufanova, E.V. Subbotin, A.G. Shcherbinin, A.V. Kazakov, S.V. Ershov

*Perm National Research Polytechnic University*

Numerical study of extrusion processes of heat-resistant polymer compositions Ftoroplast-4MB, Teflon FEP 345, Tefzel ETFE 280 and polyetheretherketone PEEK 151G with unique performance properties was executed. In this work a spatial mathematical model of heat and mass transfer processes of polymer media with nonlinear viscosity was used in conditions of phase transition in the extruder screw channel, taking into account the thermal conductivity of the screw. The rheological and thermal properties of recyclable materials were identified as a result of comprehensive experimental studies. According to the results of numerical studies pressure-flow characteristics, pictures of plug shape changes, temperature field and velocity components in the extruder screw channel were built. It is shown that the productivity of the extruder can depend strongly on the properties of the processed material. It was found that in the processing of high-viscosity polymer compositions Ftoroplast-4MB, Teflon FEP 345 almost in the entire range of changes in the screw rotation frequency, the extruder operates in cooling mode (as opposed to materials PEEK and Tefzel), offsetting the heat energy excess released as a result of dissipation. It is noted that the numerical investigations provide additional possibilities for the study of extrusion processes and can be used as a tool for the development of new screw extruder designs, and the selection of processing rational technological modes for new polymer compositions.

*Keywords:* heat and mass transfer, mathematical model, numerical method, polymer, extrusion, screw.

**Сведения об авторах**

*Труфанова Наталия Михайловна*, доктор технических наук, заведующая кафедрой конструирования и технологий в электротехнике, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: [trufanova@pstu.ru](mailto:trufanova@pstu.ru)

*Субботин Евгений Владимирович*, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий в электротехнике, ПНИПУ; e-mail: [e.subbotin81@mail.ru](mailto:e.subbotin81@mail.ru)

*Щербинин Алексей Григорьевич*, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологий в электротехнике, ПНИПУ; e-mail: [agshch@mail.ru](mailto:agshch@mail.ru)

*Казakov Алексей Владимирович*, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий в электротехнике, ПНИПУ; e-mail: [ktei@pstu.ru](mailto:ktei@pstu.ru)

*Ершов Сергей Викторович*, инженер-исследователь кафедры конструирования и технологий в электротехнике, ПНИПУ; e-mail: [ktei@pstu.ru](mailto:ktei@pstu.ru)

*Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.*