

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.08

УДК 679.743.1:519.63

С.В. Ершов, Н.М. Труфанова, М.Д. ЛукинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ
ТЕЧЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ
В ВИНТОВОМ КАНАЛЕ ЭКСТРУДЕРА**

На сегодняшний день среди изоляционных материалов широкое распространение получили полимерные композиции на основе полиэтилена и поливинилхлорида, основным способом переработки которых является метод экструзии. Использование экструзионных машин в современном кабельном производстве обусловлено их высокими технологическими показателями, главными из которых являются непрерывность ведения процесса и относительная простота конструкции.

Перерабатываемый полимер имеет нелинейную зависимость вязкости от скорости сдвига и температуры, вследствие чего возникает ряд проблем. Одной из основных, наиболее часто возникающих при переработке полимерных материалов, является появление локальных перегревов, вызванных диссипацией энергии, в винтовом канале экструдера. Перегревы расплава полимера отрицательным образом сказываются на качестве готового продукта и могут привести к ухудшению электрических и механических параметров изоляции кабеля и, как следствие, к выходу из строя кабельного изделия. Для решения задачи снижения объемов локальных перегревов или их устранения необходимо, на основе методов математического моделирования, исследовать процессы тепломассопереноса, протекающие в винтовом канале экструдера с учетом нелинейности свойств материала и сложной геометрии шнека.

В данной статье рассмотрены процессы течения и теплообмена полимерных материалов в зоне дозирования винтового канала экструдера. Определен алгоритм итерационных процедур для решения предложенных математических моделей – таких, как развернутый и винтовой каналы, с обращенным и не обращенным движением. В процессе численного исследования представленных моделей были определены температурные поля, поля скоростей сдвига и вязкости на выходе из канала для каждой модели. Также даны рекомендации по использованию на практике математических моделей, способствующих получению заданного результата и позволяющих свести к минимуму дорогостоящие натурные испытания.

Ключевые слова: экструзионные машины, изоляционные материалы, математическое моделирование, конечные элементы, принцип обращенного движения, реологические модели, тепломассоперенос, зона дозирования, расплав полимера, кабельное производство, диссипация.

S.V. Ershov, N.M. Trufanova, M.D. Lukin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT MODELS OF THE INSULATING POLYMER FLOW IN THE EXTRUDER SCREW CHANNEL

To date, among insulating materials widely spread polymer compositions based on polyvinyl chloride and polyethylene, which is the main processing way is an extrusion method. Using of extrusion machines in the modern cable manufacturing conditioned by their high technological parameters, the main ones being the continuity of the process and the relative simplicity of the design.

Processed polymer has a nonlinear dependence of viscosity on shear rate and temperature, a result of which appearing some problems. One of the main, most commonly occurring in the processing of polymer materials, is the occurrence of local overheating caused by power dissipation in the screw channel of the extruder. These overheating negatively affect the quality of the finished product and can lead to deterioration of insulation electrical and mechanical parameters, and, as a result, to the failure of cable product. To solve the problem of reducing the volume of local overheating or their elimination is necessary to explore heat and mass transfer processes occurring in the extruder screw channel in view of the nonlinear material properties and complex geometry of the screw, based on mathematical modeling techniques.

This article describes the processes of flow and heat transfer of polymer materials in the extruder screw channel of dosing area. Defined the algorithm of iterative procedures for solutions suggested by mathematical models such as: deployed and screw channels, reversed and not reversed movement. During the numerical investigation of the models were determined temperature field, the field of shear rate and viscosity at the outlet of the channel for each model. Also, recommendations are given for the use of mathematical models in practice contribute to obtaining the desired result, and allow to minimize expensive field tests.

Keywords: extrusion machines, insulating materials, mathematical modeling, finite elements, principle of inversed movement, rheological models, heat and mass transfer, dosing zone, polymer melt, cable production, dissipation.

Главными технологическими показателями, которыми обусловлено широкое использование экструзионных машин в современном кабельном производстве, являются непрерывность процесса и относительная простота.

Вследствие большой производительности экструзионных машин, высокой их стоимости и достаточно высокой цены полимерных материалов, обладающих большим разнообразием свойств, экспериментальные работы по модернизации оборудования и совершенствованию технологических режимов превращаются в дорогостоящую и продолжительную работу. Методы математического моделирования позволяют свести к минимуму дорогостоящие натурные испытания [1–3].

Одной из определяющих зон пластицирующего экструдера является зона дозирования, где происходит интенсивное перемешивание расплава, его гомогенизация, наращивание давления для последующего формования. Здесь наиболее часто возникают существенные перегревы материала, которые негативным образом сказываются на качестве готового изделия.

Данная статья посвящена численному исследованию процессов тепломассопереноса в зоне дозирования пластицирующего экструдера при использовании различных реологических моделей расплавов изоляционных полимеров и различных геометрических моделей винтового канала. Несмотря на то, что рассматриваемой проблеме посвящено достаточно большое количество исследований [4–8], остается ряд неизученных аспектов, связанных с упрощающими предположениями математических моделей и выбором реологического закона для расплава полимера.

Математическое представление процессов движения и теплообмена полимеров в винтовом канале пластицирующего экструдера (рис. 1) основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [1, 2].

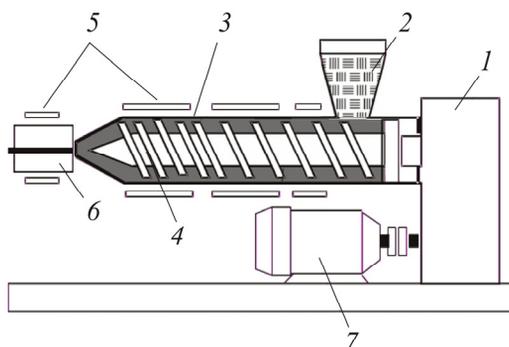


Рис. 1. Схематическое изображение экструдера: 1 – привод червяка; 2 – бункер с гранулами термопласта; 3 – материальный цилиндр экструдера; 4 – червяк с переменным шагом винтовой нарезки; 5 – нагревательные элементы; 6 – экструзионная (формирующая) головка; 7 – электродвигатель

В работе были рассмотрены две геометрии канала: канал, развернутый на плоскость (рис. 2), и винтовой канал (рис. 3).

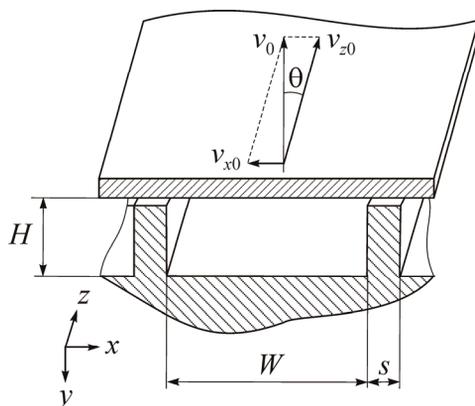


Рис. 2. Схема развернутого на плоскость канала

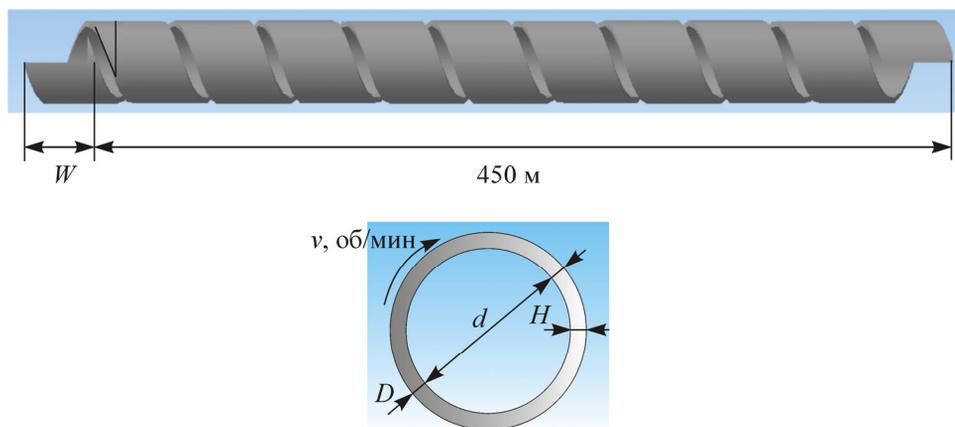


Рис. 3. Схема винтового канала

Таким образом, процесс движения и теплообмена полимера в канале пластицирующего экструдера рассматривался: а) в длинном прямоугольном канале (см. рис. 2), верхняя стенка которого движется под углом нарезки винтовой линии к оси канала θ с постоянной скоростью v_0 , равной окружной скорости червяка, б) в винтовом канале с вращающейся цилиндрической поверхностью с той же скоростью v_0 (см. рис. 3).

При построении математической модели введены следующие упрощающие предположения: процесс стационарный и установившийся, при постоянном массовом расходе; используется обратное движение, т.е. при неподвижном шнеке вращается корпус с той же угловой

частотой в направлении, противоположном исходному вращению шнека; упругие процессы в расплаве отсутствуют; массовые силы по сравнению с силами вязкого трения пренебрежимо малы; зазор между шнеком и корпусом экструдера не учитывается.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений, описывающая движение и теплообмен полимера в канале червяка, будет иметь вид [9, 10]

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_m v_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\rho_m C_m v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

где x_i – прямоугольные координаты, $x_i = x, y, z$; v_i – компоненты вектора скорости, $v_i = v_x, v_y, v_z$; τ_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений; p – гидростатическое давление; T – температура; $\tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ – необратимый прирост внутренней энергии на единицу объема вследствие диссипации энергии при вязком течении; ρ_m – плотность полимера; C_m – удельная теплоемкость полимера; λ_m – коэффициент теплопроводности полимера.

Связь между тензором девиатора напряжений и тензором скоростей деформации определяется соотношением [1–3, 12–13]

$$\tau_{ij} = \eta_3 \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига исследуемого полимера – полиэтилена низкой плотности (Lupolen 1800H) (от BASF) определяется моделью Керри–Яшида [1, 14, 15]

$$\eta_3 = \eta_0 \alpha \left[1 + (\lambda \alpha \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{(n-1)}{a}}, \quad (5)$$

где $\eta_0 = 12\,156$ Па·с; $\lambda = 0,6247$ с; $a = 1$; $n = 0,334$.

Температурный коэффициент a определяется следующим образом:

$$a = \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (6)$$

где $\beta = 5533 \text{ К}$.

Теплофизические характеристики линейно зависят от температуры:

$$\lambda_m = k_1 + k_2(T - T_0) \quad (7)$$

и

$$C_m = c_1 + c_2(T - T_0), \quad (8)$$

где $k_1 = 0,2175 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $k_2 = -0,00025 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^2$, $c_1 = 2640 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $c_2 = 4,6 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Плотность ρ_m выражается функцией температуры и давления:

$$\rho_m = \frac{\rho_0}{1 + b_1(T - T_0) - \left[b_2 + b_3(T - T_0) b_4 \ln \left(1 + \frac{p}{b_5} \right) \right]}, \quad (9)$$

где $\rho_0 = 786,4 \text{ кг/м}^3$, $b_1 = 6,153 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, $b_2 = 8,95 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$, $b_3 = 1,276 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1} \cdot \text{К}$, $b_4 = 1643 \text{ Па}$, $b_5 = 1643 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$.

Система уравнений (1)–(9) замыкается следующими граничными условиями:

1. По температуре: на входе в канал задавалась температура расплава полимера $153 \text{ }^\circ\text{С}$. На внутренней поверхности корпуса и на шнеке задавалось распределение температуры, определяемое технологическими условиями переработки полимерного материала. Температура изменяется по линейному закону.

2. По скорости: на твердых стенках задавалось условие прилипания и непроникновения. На входе задается эпюра скоростей исходя из заданного расхода. На выходе из канала – граничное условие установившегося течения.

Геометрия зоны дозирования приведена в табл. 1, технологические параметры процесса – в табл. 2.

Таблица 1

Геометрия зоны дозирования

№ п/п	Геометрические параметры	Значение
1	Внутренний диаметр цилиндра (корпуса) d , мм	45
2	Наружный диаметр шнека D , мм	44,823
3	Шаг винтовой нарезки, мм	43,31
4	Ширина канала W , мм	38,8
5	Ширина гребня винтовой нарезки S , мм	4,5
6	Длина геометрической зоны дозирования, витки	10
7	Глубина канала в зоне дозирования, мм	3
8	Угол подъема винтовой линии Θ , град	17,66
9	Радиальный зазор между гребнем шнека и корпусом δ , мм	0,1

Таблица 2

Технологические параметры

N , об/мин	Расход m , кг/ч	T_0 , °C	Изменение температуры корпуса по длине, °C		Изменение температуры шнека по длине, °C	
			от	до	от	до
200	43,8	153	151,3	150,6	171,5	174

Решение полученной системы дифференциальных уравнений производилось с помощью универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS и ее пакетов (CFD-Post и ICEM CFD). Для определения необходимого числа узлов и итераций были проведены исследования по сходимости решения данной задачи. Анализировалась невязка по максимальной температуре на выходе из канала. Таким образом, для развернутого канала была выбрана сетка в 20 000 элементов и 10 000 итераций, для винтового канала – 150 000 элементов и 15 000 итераций.

В результате численных исследований были получены поля температур, скоростей, вязкостей и скоростей сдвига для модели плоского и винтового каналов в условиях обращенного движения и при вращении шнека.

Проверка адекватности полученных результатов была реализована путем сопоставления полученных результатов и экспериментальных данных, приведенных в статье [1], расхождение по температуре не превысило 1 %.

Полученные результаты численных значений температур расплава на выходе из канала для всех вариантов расчета, экспериментальные данные и результаты расчета, приведенные в работе [1], представлены в табл. 3.

Таблица 3

Средние температуры расплава

Данные из статьи [11]		Результаты: прямой канал, обращенное движение		Результаты: прямой канал, необращенное движение		Результаты: винтовой канал, обращенное движение		Результаты: винтовой канал, необращенное движение		Экспериментальные (статья [11])
°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	
178	3,26	185,8	0,98	221	20,11	180	2,28	208,3	13,21	184

Поля температур в поперечном сечении в выходном сечении канала представлены на рис. 4 (прямой канал), рис. 6 (винтовой канал) – модель обращенного движения; рис. 5 (прямой), рис. 7 (винтовой) – необращенное движение.

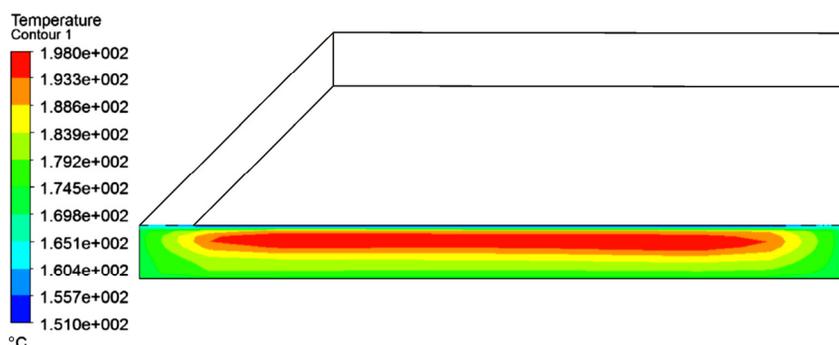


Рис. 4. Поле температуры: прямой канал, обращенное движение

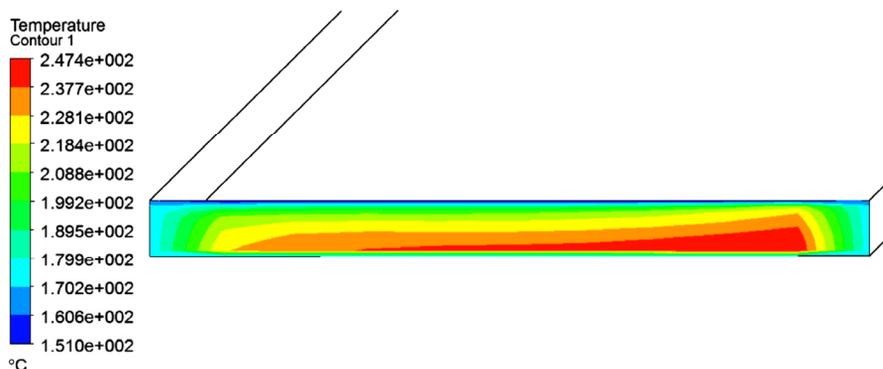


Рис. 5. Поле температуры: прямой канал, необращенное движение



Рис. 6. Поле температуры: винтовой канал, обращенное движение

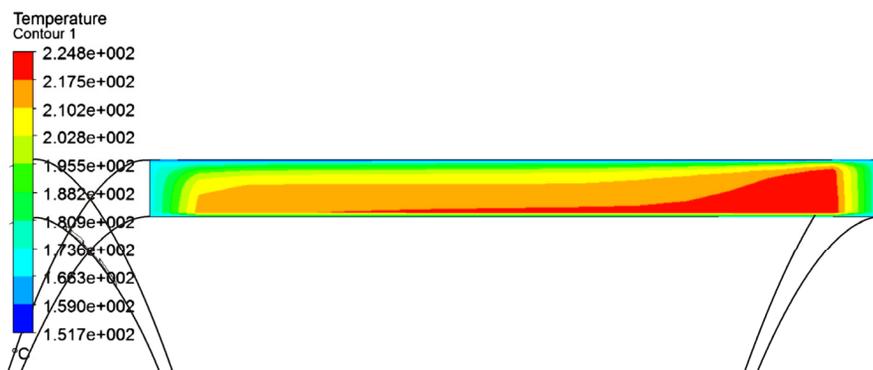


Рис. 7. Поле температуры: винтовой канал, необращенное движение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что модель канала, развернутого на плоскость, с обращенным движением дает наибольшее совпадение по значениям средних температур, отличие с экспериментально замеренной температурой не превышает одного процента. В целом модель винтового канала тоже достаточно адекватно описывает процессы течения и теплообмена, поля температур близки (см. рис. 4 и 6), а отличие с экспериментом – чуть больше 2 %.

В случае вращения шнека значения средних температур выше, чем при обращенном движении, для плоского канала отличие составляет 20 %, винтового – более 13 %, что связано с дополнительным движением боковых поверхностей и, как следствие, с большими значениями скоростей сдвига и более интенсивной диссипацией энергии.

Нужно отметить, что во всех вариантах расчета область наибольших температур в поперечном сечении канала смещается в сторону подвижной стенки, где реализуются наибольшие значения скоростей сдвига и наименьшие значения вязкости.

Полученные поля скоростей сдвига в поперечном сечении на выходе из канала экструдера представлены на рис. 8, 10 – модель обращенного движения; на рис. 9, 11 – модель необращенного движения.

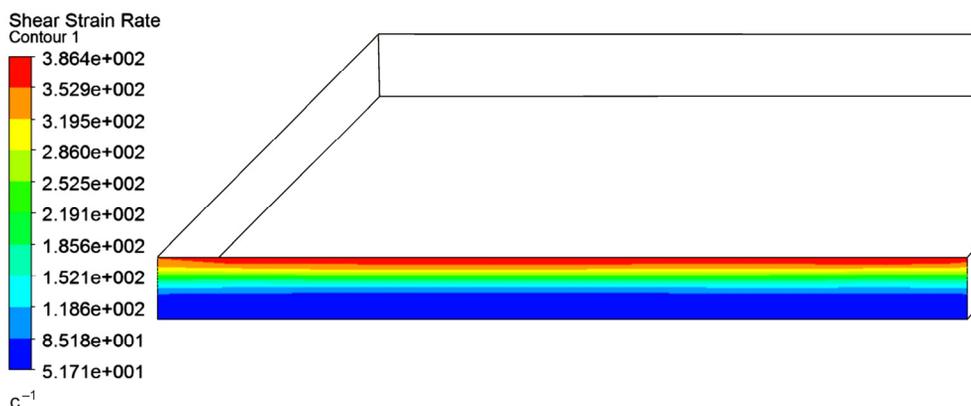


Рис. 8. Поле скорости сдвига: прямой канал, обращенное движение

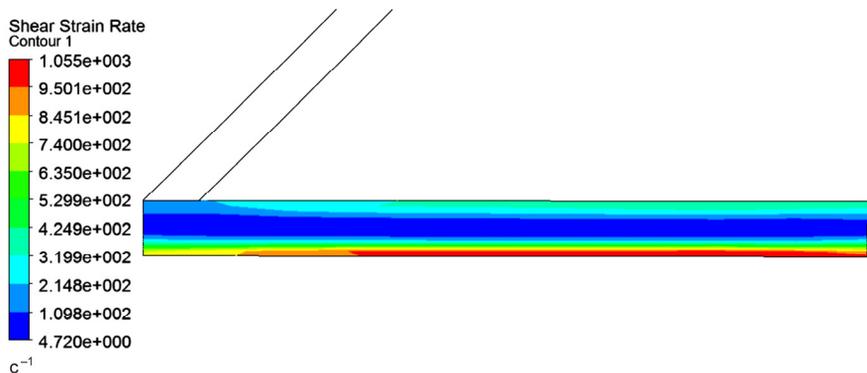


Рис. 9. Поле скорости сдвига: прямой канал, необращенное движение

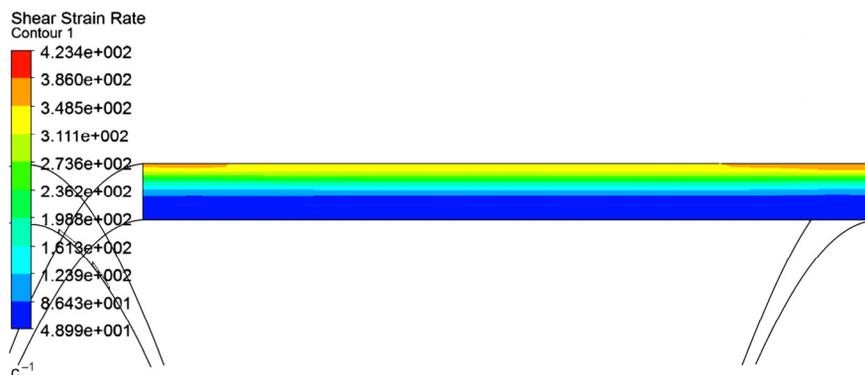


Рис. 10. Поле скорости сдвига: винтовой канал, обращенное движение

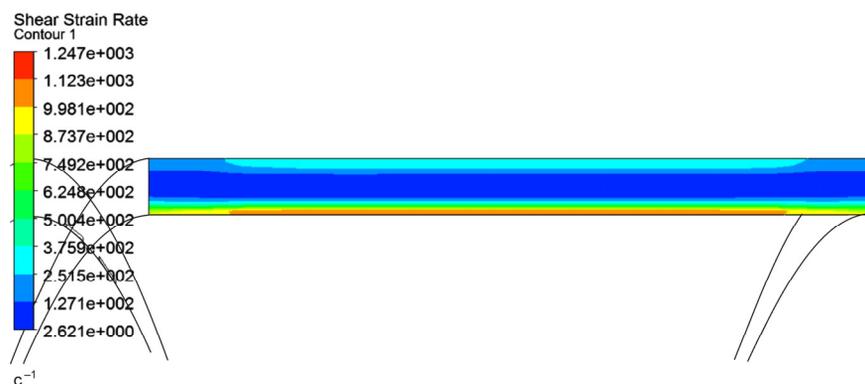


Рис. 11. Поле температуры: винтовой канал, необращенное движение

Максимальные значения скоростей сдвига наблюдаются вблизи движущихся поверхностей, в моделях с необращенным движением – около подвижных боковых стен. Значения средних скоростей сдвига в моделях с использованием принципа обращенного движения значительно меньше (в 2–3 раза), чем в моделях без использования последнего, соответственно, и значения температур в них существенно ниже.

На рис. 12–15 представлены поля вязкости в поперечном сечении на выходе материала из канала экструдера: на рис. 12, 14 – модель обращенного движения; на рис. 13, 15 – модель необращенного движения. Видно, что максимальные значения вязкостей расположены в областях наименьших значений скоростей сдвига.

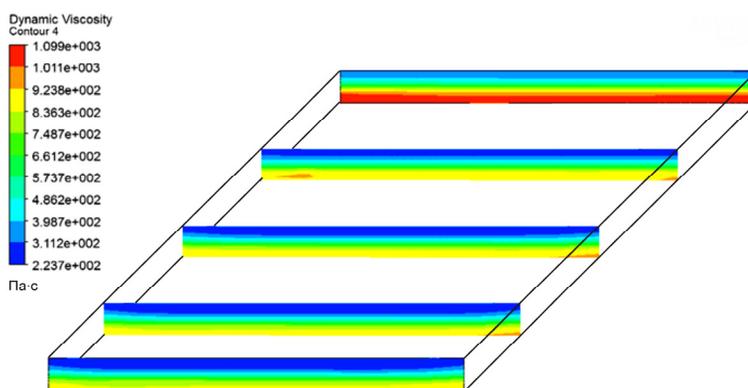


Рис. 12. Поле вязкости: прямой канал, обращенное движение

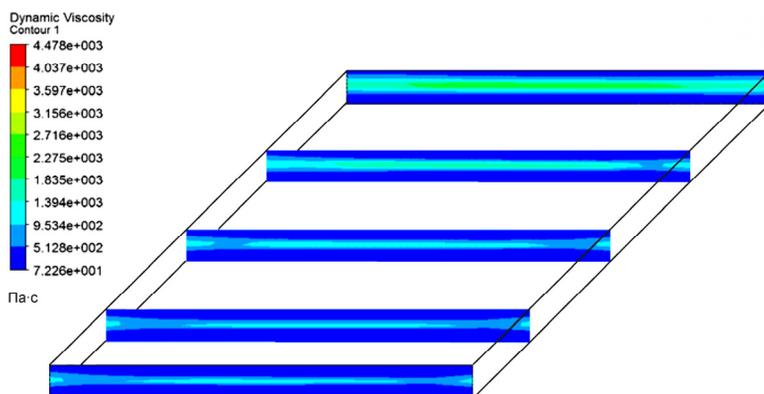


Рис. 13. Поле вязкости: прямой канал, необращенное движение

Таким образом, поскольку областям с наибольшими значениями температур соответствуют области с наименьшими значениями вязкости и наибольшими значениями скоростей сдвига, то можно сделать вывод о влиянии каждого из указанных факторов на величину диссипируемой энергии.

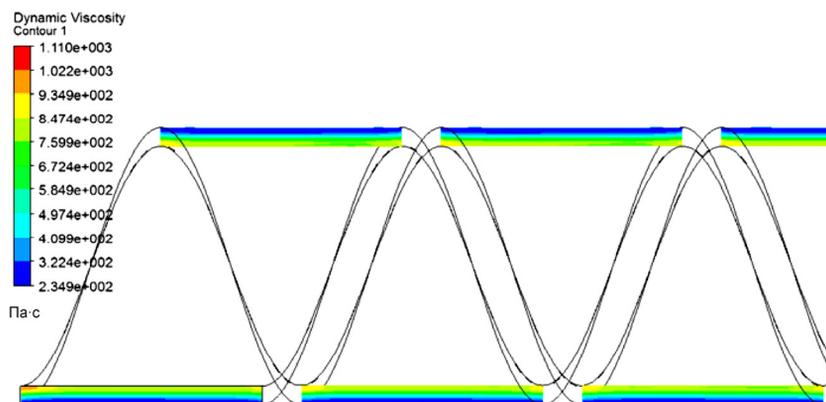


Рис. 14. Поле вязкости: винтовой канал, обращенное движение

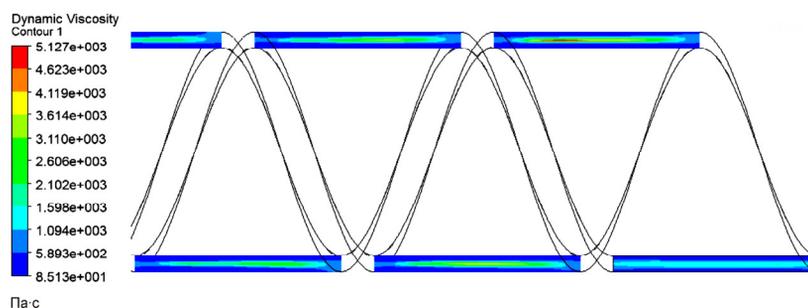


Рис. 15. Поле вязкости: винтовой канал, необращенное движение

Итак, в целом результаты исследования показали, что в случае использования принципа обращенного движения для описания процессов теплопереноса в зоне дозирования могут быть применены обе геометрические модели канала (плоского и винтового). Несмотря на то, что модель необращенного движения для винтового канала наиболее приближена к реальному процессу переработки полимера в экструдере, результаты, полученные при использовании этой модели, существенно (в сравнении с другими моделями) отличаются от эксперимен-

тальных данных, что говорит о необходимости уточнений математической модели и дополнительных исследований.

Список литературы

1. Syrjälä S. On the analysis of fluid flow and heat transfer in the melt conveying section of a single-screw extruder // Numer. Heat Transfer. – 1999. – Part A, vol. 35. – P. 25–47.

2. Manab Kumar Das, Ghoshdastidar P.S. Experimental validation of a quasi three-dimensional conjugate heat transfer model for the metering section of a single-screw plasticating extruder // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Jan. – Vol. 120, iss. 1–3. – P. 397.

3. Раувендаль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2008. – 786 с.

4. Манат Б.Т., Шевцов П.Н. Разработка математической модели и компьютерное моделирование процесса экструзии в зоне дозирования // Theoretical & Applied Science. – 2014. – № 5(13). – С. 9–23.

5. Субботин Е.В., Зиннатуллин Р.Р. Экспериментальное определение реологических характеристик расплава полимера при численном моделировании процесса экструзии // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 28–30.

6. Митрошин В.Н. Структурное моделирование температурного поля расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2006. – № 41. – С. 191–194.

7. Camesasca M., Manas-Zloczower I., Kaufman M. Influence of extruder geometry on laminar mixing: entropic analysis // Plastics, Rubbers and Composites. – 2004. – Vol. 33, № 9/10. – P. 372–376.

8. Леваничев В.В. Разработка модели движения расплава полимера в экструдере // Вост.-Европ. журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 5(77). – С. 7–13.

9. Басов Н.И., Брой В. Техника переработки пластмасс. – М.: Химия, 1985. – 528 с.

10. Труфанова Н.М., Щербинин А.Г., Янков В.И. Плавление полимеров в экструдерах – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2009. – 336 с.

11. Труфанова Н.М. Переработка полимеров. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 158 с.

12. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (Механика процессов). – М.: Химия, 1977. – 464 с.

13. Carreau P.J. Rheological equations from molecular network theories // Transactions of the Society of Rheology. – 1972. – Vol. 16, iss. 1. – P. 99–127.

14. Yasuda K., Armstrong R.C., Cohen R.E. Shear flow properties of concentrated solutions of linear and star branched polystyrenes // Rheologica Acta. – 1981. – Vol. 20, № 2. – P. 163–178.

15. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения: пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.

References

1. Syrjälä S. On the analysis of fluid flow and heat transfer in the melt conveying section of a single-screw extruder. *Numer. Heat Transfer*, 1999, Part A, vol. 35, pp. 25-47.

2. Manab Kumar Das, Ghoshdastidar P.S. Experimental validation of a quasi three-dimensional conjugate heat transfer model for the metering section of a single-screw plasticating extruder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, Jan., vol. 120, iss. 1-3, p. 397.

3. Rauvandal' K. Ekstruziia polimerov [Extrusion of polymers]. Saint Petersburg: Professiiia, 2008. 786 p.

4. Manat B.T., Shevtsov P.N. Razrabotka matematicheskoi modeli i komp'iuternoe modelirovanie protsessa ekstruzii v zone dozirovaniia [Development of mathematical model and computer modeling of process of extrusion in a dispensing zone]. *Theoretical & Applied Science*, 2014, no. 5(13), pp. 9-23.

5. Subbotin E.V., Zinnatullin R.R. Eksperimental'noe opredelenie reologicheskikh kharakteristik rasplava polimera pri chislennom modelirovanii protsessa ekstruzii [Experimental definition of rheological characteristics of fusion of polymer at numerical modeling of process of extrusion]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 4, pp. 28-30.

6. Mitroshin V.N. Strukturnoe modelirovanie temperaturnogo polia rasplava polimera v zone dozirovaniia odnocherviachnogo ekstrudera [Structural modeling of the temperature field of fusion of polymer in a zone of dispensing of a one-worm extruder]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2006, no. 41, pp. 191-194.

7. Camesasca M., Manas-Zloczower I., Kaufman M. Influence of extruder geometry on laminar mixing: entropic analysis. *Plastics, Rubbers and Composites*, 2004, vol. 33, no. 9/10, pp. 372-376.

8. Levanichev V.V. Razrabotka modeli dvizheniia rasplava polimera v ekstrudere [Development of model of the movement of fusion of polymer in an extruder]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2015, vol. 5, no. 5(77), pp. 7-13.

9. Basov N.I., Broi V. Tekhnika pererabotki plastmass [Technology of processing of plastic]. Moscow: Khimiia, 1985. 528 p.

10. Trufanova N.M., Shcherbinin A.G., Iankov V.I. Plavlenie polimerov v ekstruderakh [Melting of polymers in extruders]. Moscow, Izhevsk: Reguliarnaia i khaoticheskaia dinamika, 2009. 336 p.

11. Trufanova N.M. Pererabotka polimerov [Processing of polymers]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009. 158 p.

12. Torner R.V. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov (Mekhanika protsessov) [Theoretical bases of processing of polymers (Mechanics of processes)]. Moscow: Khimiia, 1977. 464 p.

13. Carreau P.J. Rheological equations from molecular network theories. *Transactions of the Society of Rheology*, 1972, vol. 16, iss. 1, pp. 99-127.

14. Yasuda K., Armstrong R.C., Cohen R.E. Shear flow properties of concentrated solutions of liner and star branched polystyrenes. *Rheologica Acta*, 1981, vol. 20, no. 2, pp. 163-178.

15. Malkin A.Ia., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniia: perevod s angliiskogo [Rheology: concepts, methods, applications: translation from English]. Saint Petersburg: Professiia, 2007. 560 p.

Получено 12.09.2016

Об авторах

Ершов Сергей Викторович (Пермь, Россия) – инженер-исследователь кафедры конструирования и технологий в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ershov_sv@bk.ru.

Труфанова Наталия Михайловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ktei@pstu.ru.

Лукин Максим Дмитриевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ktei@pstu.ru.

About the authors

Sergei V. Ershov (Perm, Russian Federation) – Engineer-Researcher, Department of Design and Technology in Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ershov_sv@bk.ru.

Natalia M. Trufanova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Design and Technology in Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ktei@pstu.ru.

Maksim D. Lukin (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ktei@pstu.ru.