

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.3.10

УДК 679.743.1:519.63

С.В. Ершов, Н.М. Труфанова, М.Д. ЛукинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В КАНАЛЕ ЗОНЫ ДОЗИРОВАНИЯ И ФОРМУЮЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ

В настоящее время в кабельной промышленности широко применяются полимерные материалы, имеющие в своем составе большое количество пластификаторов и наполнителей, которые придадут готовому продукту необходимые механические и электрические свойства. Для переработки подобных материалов наиболее часто применяется метод экструзии, который обладает высокими технологическими показателями. Основным преимуществом экструзионных машин является простота конструкции и возможность непрерывного ведения процесса наложения электрической изоляции.

Полимерные композиции характеризуются нелинейной зависимостью вязкости от скорости сдвига и температуры, вследствие чего возникает ряд проблем, связанных с выбором температурного режима их переработки. При этом для некоторых материалов превышение допустимой температуры на несколько градусов приводит к термической деструкции и, как следствие, к существенному снижению механических и электрических свойств готового изделия. Поскольку изучение процессов тепломассопереноса в рабочих каналах экструдера при помощи натуральных экспериментов влечет большие временные и материальные затраты, решение задачи минимизации локальных перегревов, вызванных диссипацией энергии, осуществлялось с использованием методов математического моделирования.

Целью данной работы было изучение процессов течения и теплообмена в рабочих каналах экструзионных машин. В данной статье предложена пространственная модель, позволяющая изучать процессы тепломассопереноса одновременно в зоне дозирования пластицирующего экструдера и формующем инструменте. В результате численного исследования получены поля распределения температуры, вязкости и скорости сдвига как в канале экструдера, так и в формующем инструменте. Произведен сравнительный анализ влияния геометрических параметров выходного адаптера на процессы переработки полимерных материалов методом экструзии. Даны рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров адаптера для достижения однородного потока расплава с равномерным распределением температуры в потоке.

Ключевые слова: полимерные материалы, кабельная промышленность, электрическая изоляция, тепломассоперенос, экструзионные машины, математическое моделирование, формующий инструмент, зона дозирования, выходной адаптер, локальные перегревы, экструзия, 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

Today, polymeric materials, which include a large number of plasticizers and fillers, which give the finished product the necessary mechanical and electrical properties, are found a wide application in the cable industry. The most commonly used method for the processing of such materials is extrusion, which has high technological parameters. The main advantage of extrusion machines is the simplicity of the design and the possibility of continuously maintaining the process of applying electrical insulation.

Polymeric compositions are characterized by non-linear dependence of viscosity on shear rate and temperature, which causes a number of problems associated with the choice of the temperature regime for their processing. At the same time, for some materials, exceeding the allowable temperature by several degrees leads to thermal destruction and, as a result, to a significant decrease in the mechanical and electrical properties of the finished product. Since the study of the heat and mass transfer processes in the working channels of an extruder using field experiments entails large time and material costs, the problem solution of minimizing local overheating, caused by energy dissipation, was carried out using mathematical modeling methods.

The purpose of this work was to study the processes of flow and heat transfer in the working channels of extrusion machines. In this paper, we propose a spatial model that allows us to study the processes of heat and mass transfer simultaneously in the dosing zone of a plasticizing extruder and a forming tool. As a result of numerical investigation, the fields of temperature, viscosity and shear rate distribution were obtained, both in the extruder channel and in the forming tool. Comparative analyses of the effect of the output adapter geometric parameters on the polymeric materials processing by extrusion were done. Recommendations on the choice of optimal geometric parameters of the adapter to achieve a homogeneous melt flow with a uniform temperature distribution in the flow are given.

Keywords: polymer materials, cable industry, electrical insulation, heat and mass transfer, extrusion machines, mathematical modeling, forming tool, dosing area, output adapter, local overheating, extrusion, dissipation.

Одной из основных зон экструдера является зона дозирования, в которой происходят интенсивное перемешивание и гомогенизация расплава полимера, нагнетание давления. Зона дозирования через адаптер, предназначенный для перестроения потока расплава и придания формы соответствующему готовому изделию, соединена с формирующим инструментом, который в зависимости от производимого изделия может иметь различную форму и геометрические размеры. К конструкции формирующего инструмента предъявляются высокие требования, поскольку необходимо обеспечивать равномерность подачи расплава полимера и стабильность температуры расплава без перегревов, приводящих к ухудшению качества изделия.

Вследствие большой производительности экструдеров, высокой их стоимости и цены перерабатываемых полимерных материалов, обладающих большим разнообразием свойств [1], экспериментальные работы по модернизации оборудования и совершенствованию технологических режимов превращаются в дорогостоящую и продолжительную работу. Методы математического моделирования [2–4] позволяют свести к минимуму дорогостоящие натурные испытания.

На сегодняшний день проблемам экструзии полимеров посвящено достаточно большое количество работ [5–12], однако все они изучают процессы тепломассопереноса отдельно в каналах экструзионных машин и формующем инструменте. Такой подход требует организации дополнительной итерационной процедуры для определения расходно-напорных характеристик экструдера и формующей головки, рабочих точек, величин давлений в формующем инструменте, что не всегда дает удовлетворительные результаты по точности (особенно величины давлений).

Данная статья посвящена численному исследованию процессов совместного течения и теплообмена в зоне дозирования пластицирующего экструдера и выходном адаптере.

Для решения поставленной задачи использовалась модель винтового канала с зазором. Исследование проводилось для двух пространственных моделей: 1 – винтового канала с зазором (L_1); 2 – винтового канала с зазором, дополненного выходным адаптером ($L_1 + L_2$) (рис. 1).

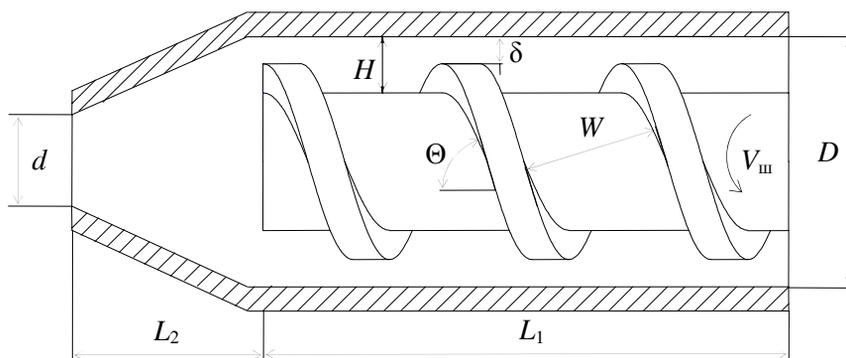


Рис. 1. Зона дозирования экструдера с выходным адаптером

При математическом моделировании процессов течения и теплообмена были введены следующие упрощающие предположения: процесс стационарный и установившийся, при постоянном массовом расходе; упругие процессы в расплаве отсутствуют; массовые силы по сравнению с силами вязкого трения пренебрежимо малы [13]. Система дифференциальных уравнений, полученная с учетом сделанных упрощающих предположений и замкнутая соответствующими граничными условиями, представлена в ранее опубликованной статье [14].

Ниже приведены геометрические параметры исследуемых моделей, а также реологические и теплофизические свойства материала.

Геометрические параметры исследуемых моделей

| | |
|---|--------|
| Внутренний диаметр цилиндра (корпуса) D , мм | 45 |
| Наружный диаметр шнека, мм | 44,8 |
| Шаг винтовой нарезки, мм | 43,31 |
| Ширина канала W , мм | 38,8 |
| Ширина гребня винтовой нарезки S , мм | 4,5 |
| Длина геометрической зоны дозирования L_1 , мм | 450 |
| Глубина канала в зоне дозирования, мм | 3 |
| Угол подъема винтовой линии Θ , град | 17°66' |
| Радиальный зазор между гребнем шнека и корпусом δ , мм | 0,1 |
| Длина формующего инструмента L_2 , мм | 30 |
| Диаметр выходного отверстия формующего инструмента d , мм | 22,5 |

Реологические и теплофизические свойства полимера

| Полимер | n | μ_0 , Па·с ^{n} | λ , с | a | T_0 , К | β , К | ρ_m , кг/м ³ | λ_m , Вт/(м·°С) | C_m , Дж/(кг·°С) |
|---------------|-------|--|---------------|-----|-----------|-------------|------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Lupolen 1800H | 0,334 | 12 156 | 0,6247 | 1 | 423,15 | 5533 | 785 | 0,21 | 2780 |

Решение полученной системы дифференциальных уравнений, замкнутой соответствующими краевыми условиями, возможно только с помощью метода конечных объемов [15], так как данный метод ши-

роко применяется при исследовании процессов течения расплава полимера в трехмерной постановке. Основным преимуществом данного метода является высокая точность решения задач, имеющих сложную геометрию исследуемой области. Дискретизация исследуемых пространственных моделей осуществляется в программном пакете ANSYS, использовалась блочно-структурированная сетка, в качестве формы конечного объема которой выступает гексаэдр.

Поскольку исследуемые модели имеют достаточно сложную геометрическую форму, для дискретизации их расчетных областей потребовалось использование многоблочной структурированной сетки.

Оценка сходимости решения проводилась по относительной погрешности изменения температуры. В каждом узле относительная погрешность по модулю не должна была превышать некоторой заданной малой величины ε :

$$\left| \frac{T^{m+1} - T^m}{T} \right| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

при этом итерационная процедура сходилась и на $m + 1$ -й итерации.

Для решения задачи течения расплава полимера в винтовом канале с зазором потребовалась сетка с количеством элементов 1 757 000. Наибольшее число элементов потребовалось для полной модели – 3 678 000, так как кроме зоны дозирования в нее входят формирующий инструмент и адаптер.

Сходимость решения в случае модели винтового канала с зазором достигается за 22 000 итераций. Поскольку полная модель зоны дозирования и формирующего инструмента с адаптером имеет сложную геометрию и разбита на существенно большее число элементов, для установления решения потребовалось более 34 000 итераций.

На первом этапе исследования был произведен анализ влияния выходного адаптера на процессы течения и теплообмена в канале зоны дозирования. На рис. 2 представлен график изменения средней температуры по длине зоны дозирования для модели винтового канала в условиях вращения шнека и модели с адаптером. Из рисунка видно, что наличие адаптера вносит существенный вклад в распределение температуры по всей длине зоны дозирования.

В табл. 1 представлены значения температур, вязкости и скорости сдвига, реализующиеся в рассматриваемых моделях. Из полученных данных видно, что среднее значение вязкости в модели с адаптером

увеличивается на 7,5 %, в то время как величина средней скорости сдвига уменьшается на 8,1 %. Также наблюдается увеличение максимального и среднего значений температуры в случае модели с выходным адаптером на 2,6 %.

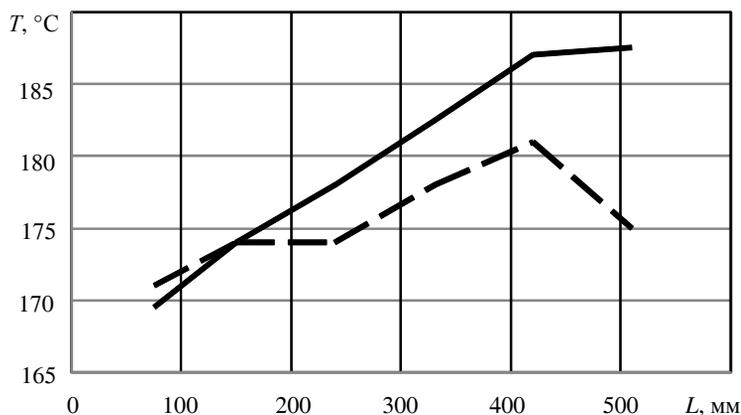


Рис. 2. Распределение средней температуры по длине канала: — — — зона дозирования без адаптера; — зона дозирования с адаптером

Таблица 1

Максимальные и средние значения температур, скоростей сдвига и вязкости для геометрических моделей канала с адаптером и без

| Геометрическая модель | Температура, °C | | Скорость сдвига, с ⁻¹ | Вязкость, Па·с |
|-----------------------|-----------------|--------|----------------------------------|----------------|
| | Макс. | Средн. | Средн. | Средн. |
| Канал без адаптера | 195,4 | 180,9 | 271 | 941,1 |
| Канал с адаптером | 200,51 | 185,8 | 250,6 | 1012 |

Ниже представлены поля распределения температуры в поперечном сечении канала для исследуемых моделей.

Анализируя данные рис. 3, можно сделать вывод о том, что наиболее разогретый материал в случае модели с выходным адаптером (рис. 3, а) располагается ближе к боковой поверхности гребня винта, в то время как в модели без адаптера (рис. 3, б) – ближе к поверхности, образованной телом шнека.

Ниже представлено распределение температуры на последних витках зоны дозирования и в выходном адаптере.

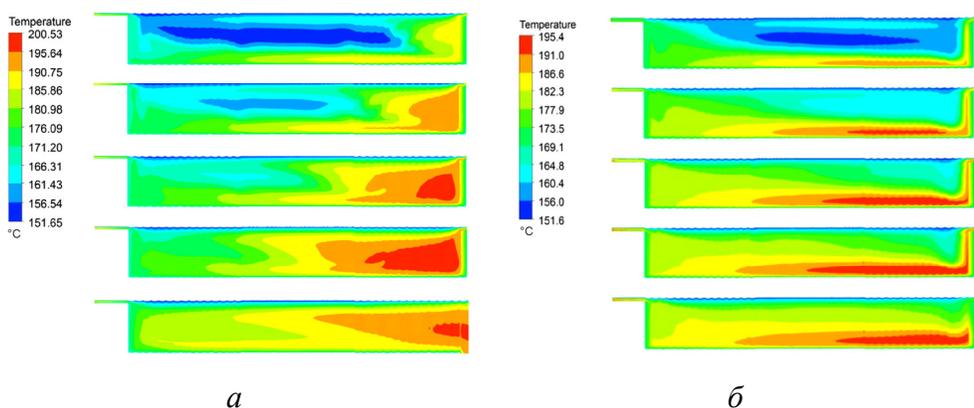


Рис. 3. Температурные поля в поперечном сечении винтового канала:
a – с учетом влияния выходного адаптера; *б* – без учета влияния
выходного адаптера

Из рис. 4 видно, что наиболее разогретый материал располагается в середине выходного адаптера, а ближе к стенкам расплав имеет более низкую температуру. При этом стоит отметить, что изменение температуры по длине адаптера не происходит.

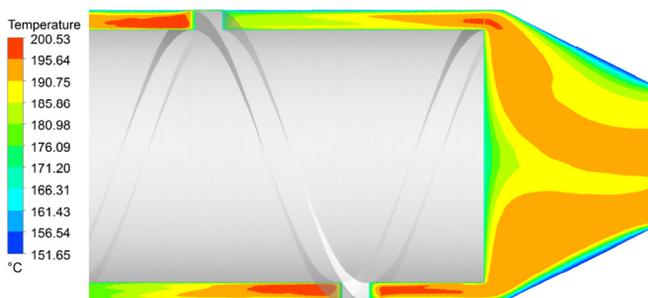


Рис. 4. Распределение температуры в выходном адаптере

На следующем этапе численного исследования был проведен анализ влияния геометрических размеров выходного адаптера на процессы течения и теплообмена в зоне дозирования экструдера и адаптере. В табл. 2 и 3 представлены значения максимальных и средних температур, вязкости и скоростей сдвига в исследуемых моделях в зависимости от диаметра отверстия выходного адаптера и его длины соответственно.

Таблица 2

Максимальные и средние значения температур, скоростей сдвига и вязкости для различных значений диаметра выходного отверстия адаптера

| L_2 , мм | d , мм | Температура, °С | | Скорость сдвига, c^{-1} | Вязкость, Па·с |
|------------|----------|-----------------|--------|---------------------------|----------------|
| | | Макс. | Средн. | Средн. | Средн. |
| 30 | 5,6 | 200,54 | 185,4 | 253,6 | 991,8 |
| | 11,2 | 200,51 | 185,8 | 250,6 | 1012 |
| | 22,5 | 200,53 | 187,5 | 252,9 | 1008 |

Таблица 3

Максимальные и средние значения температур, скоростей сдвига и вязкости для выходных адаптеров различной длины

| d , мм | L_2 , мм | Температура, °С | | Скорость сдвига, c^{-1} | Вязкость, Па·с |
|----------|------------|-----------------|--------|---------------------------|----------------|
| | | Макс. | Средн. | Средн. | Средн. |
| 11,2 | 18 | 200,54 | 185,0 | 261,2 | 946,1 |
| | 30 | 200,51 | 185,8 | 250,6 | 1012 |

Сравнение полученных численных значений исследуемых величин позволяет сделать вывод о том, что длина и диаметр выходного отверстия не оказывают существенного влияния на значения температуры. Однако стоит отметить, что с увеличением длины адаптера наблюдается уменьшение среднего значения скорости сдвига и увеличение вязкости. На рис. 5 представлены поля температур для адаптеров с разным диаметром выходного отверстия.

Анализ данных полей рис. 5 позволяет утверждать, что величина выходного отверстия адаптера не оказывает существенного влияния на распределение температуры. Аналогичным образом выглядят температурное поле модели с меньшей длиной выходного адаптера. Большой интерес при изучении течения расплава полимера представляют поля распределения вязкости и скорости сдвига, представленные на рис. 6 и 7. Для визуализации результатов расчета шкала изменения скорости

сдвига была ограничена по максимальному значению 70 с^{-1} , а по минимальному – 1 с^{-1} .

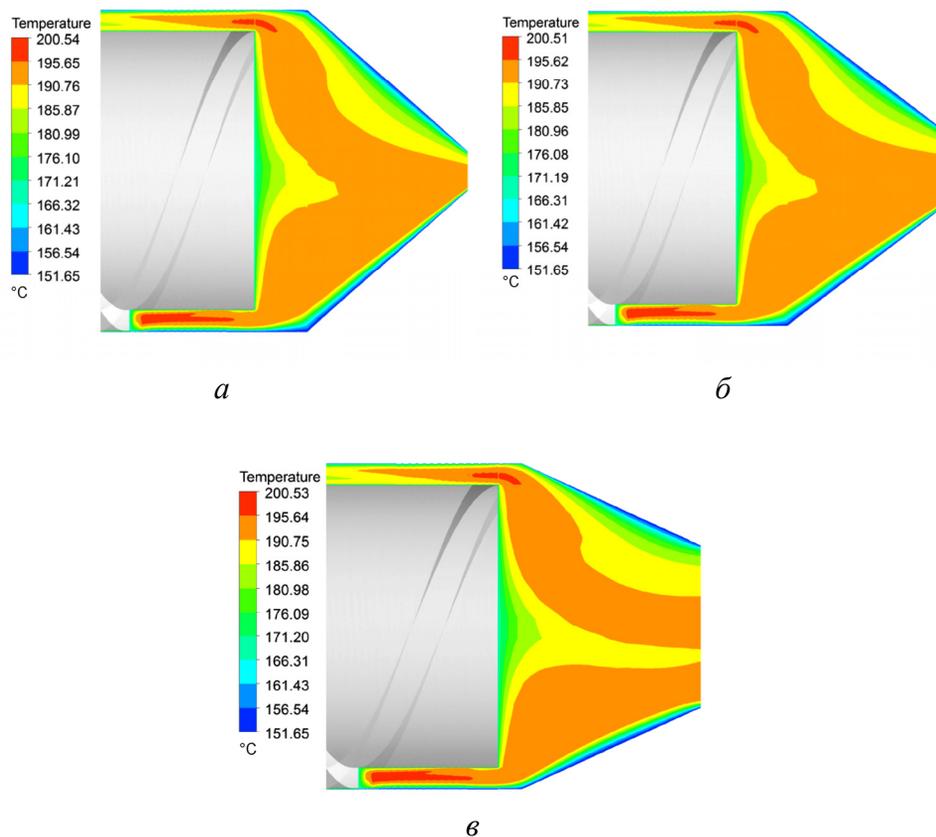


Рис. 5. Распределение температуры в продольном сечении выходного адаптера длиной $L_2 = 30$ мм с различной величиной диаметра выходного отверстия: *a* – $d = 5,6$ мм; *б* – $d = 11,2$ мм; *в* – $d = 22,5$ мм

Сравнительный анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что адаптер с меньшим диаметром выходного отверстия помогает получить более однородный материал на входе в головку формирующего инструмента, тем самым обеспечивая большую стабильность потока расплава.

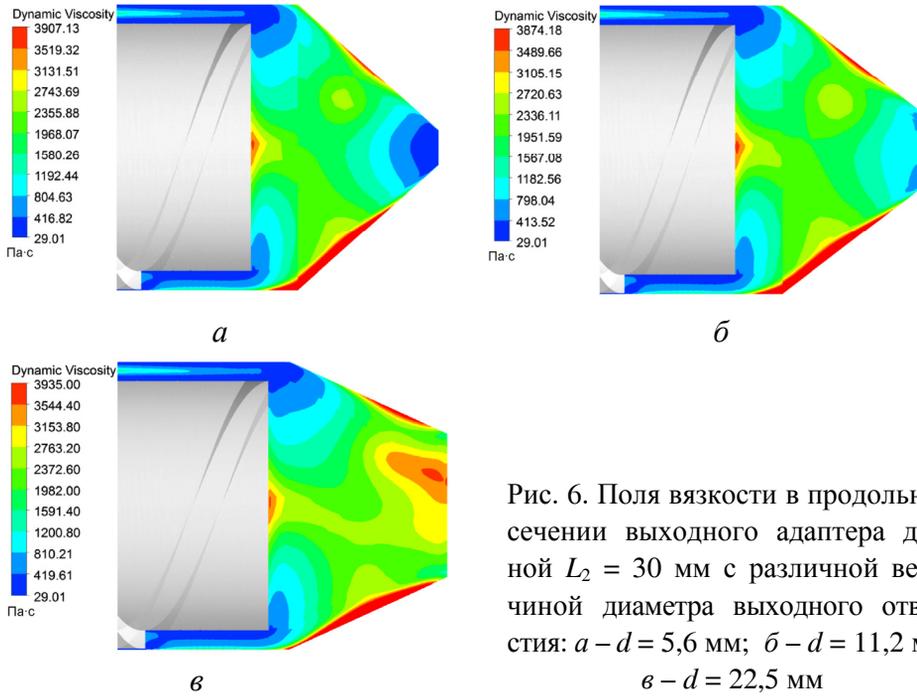


Рис. 6. Поля вязкости в продольном сечении выходного адаптера длиной $L_2 = 30$ мм с различной величиной диаметра выходного отверстия: *a* – $d = 5,6$ мм; *б* – $d = 11,2$ мм; *в* – $d = 22,5$ мм

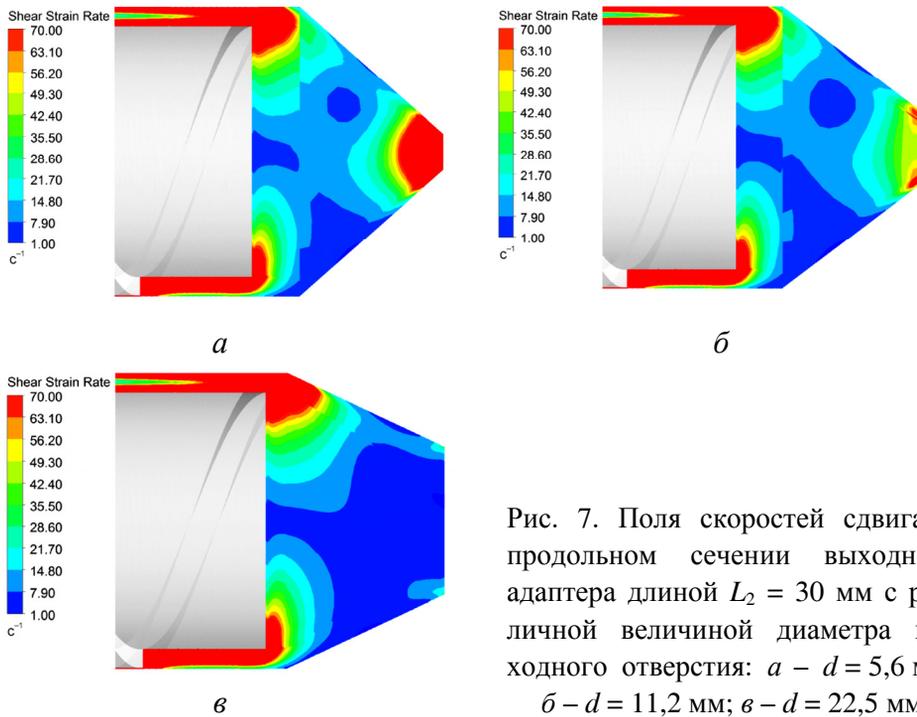


Рис. 7. Поля скоростей сдвига в продольном сечении выходного адаптера длиной $L_2 = 30$ мм с различной величиной диаметра выходного отверстия: *a* – $d = 5,6$ мм; *б* – $d = 11,2$ мм; *в* – $d = 22,5$ мм

На рис. 8 и 9 представлены распределения вязкости и скоростей сдвига для адаптеров с различной длиной конической части.

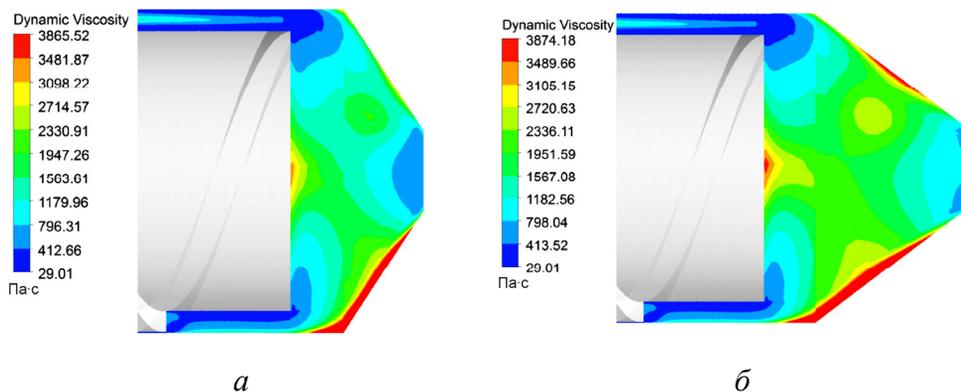


Рис. 8. Распределение полей вязкости в продольном сечении выходного адаптера диаметром $d = 11,2$ мм с различной длиной: $a - L_2 = 18$ мм; $б - L_2 = 30$ мм

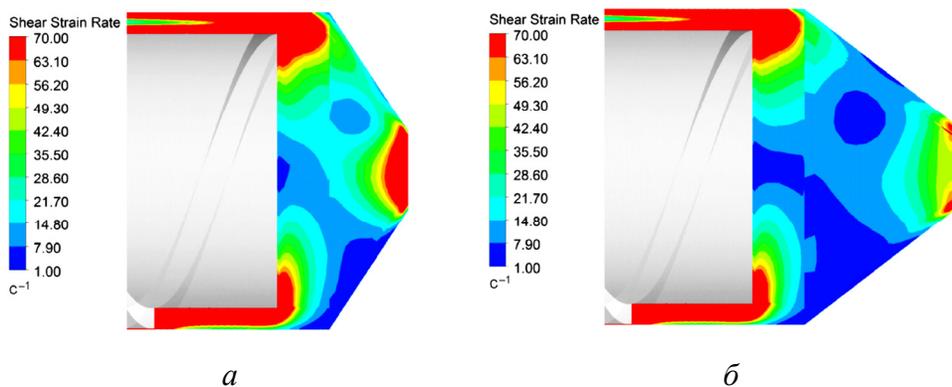


Рис. 9. Поля скоростей сдвига в продольном сечении выходного адаптера диаметром $d = 11,2$ мм с различной длиной: $a - L_2 = 18$ мм; $б - L_2 = 30$ мм

Анализ полученных полей вязкости и скоростей сдвига позволяет сделать вывод о том, что уменьшение расстояния от торца шнека до выходного отверстия адаптера позволяет получать более равномерное распределение потока расплава.

На следующем этапе исследования процессов течения и теплообмена в каналах экструзионного оборудования была построена полная геометрическая модель зоны дозирования и формующего инструмента,

представленная на рис. 10. Исследование проводилось для экструдера с внутренним диаметром цилиндра 160 мм, геометрические размеры которого приведены ниже.

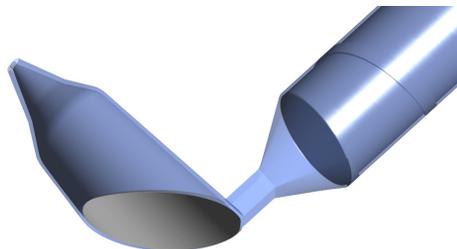


Рис. 10. Геометрическая модель исследуемого канала экструдера и формирующего инструмента

Базовая геометрия экструдера

| | |
|---|--------|
| Внутренний диаметр цилиндра (корпуса) D , мм | 160,0 |
| Наружный диаметр шнека, мм | 159,4 |
| Шаг винтовой нарезки, мм | 160,0 |
| Ширина канала W , мм | 137,3 |
| Ширина гребня винтовой нарезки S , мм | 15,3 |
| Длина геометрической зоны дозирования, витки | 5 |
| Глубина канала в зоне дозирования H , мм | 4 |
| Угол подъема винтовой линии Θ , град | 17°39' |
| Радиальный зазор между гребнем шнека и корпусом δ , мм | 0,3 |

Реологические и теплофизические свойства перерабатываемого материала представлены ниже. Зависимость вязкости от температуры определяется уравнением Рейнольдса:

$$\mu_0 = \mu_{0|T_0} \exp(-\beta(T - T_0)), \quad (2)$$

где $\mu_{0|T_0}$, β , T_0 – реологические и температурные константы.

Реологические и теплофизические свойства полимера

| Полимер | n | μ_0 , Па·с ^{n} | T_0 , °С | β , °С ⁻¹ | ρ_m , кг/м ³ | λ_m , Вт/(м·°С) | C_m , Дж/(кг·°С) |
|------------|------|--|------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------|
| ПЭ 153-02К | 0,34 | 23336,9 | 160 | 0,0124 | 779,0 | 0,182 | 2484 |

Для описания зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига использовался степенной закон

$$\mu_3 = \mu_0 \dot{\gamma}^{\frac{n-1}{2}}, \quad (3)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; μ_0 – начальная вязкость; n – показатель аномалии вязкости.

Важным параметром при выборе рационального режима работы экструзионного оборудования является давление. В результате численного исследования была построена напорно-расходная характеристика, представленная на рис. 11. Значения давления, полученные при расчете модели с учетом выходного адаптера и формирующего инструмента (отмеченные точками), достаточно хорошо совпадают с рабочими точками, которые определяются исходя из расчета напорно-расходных характеристик отдельно для экструдера и кабельной головки. Отличие не превышает 4 %. Полная модель позволяет получить значения давления непосредственно в месте установки манометра в реальном экструдере.

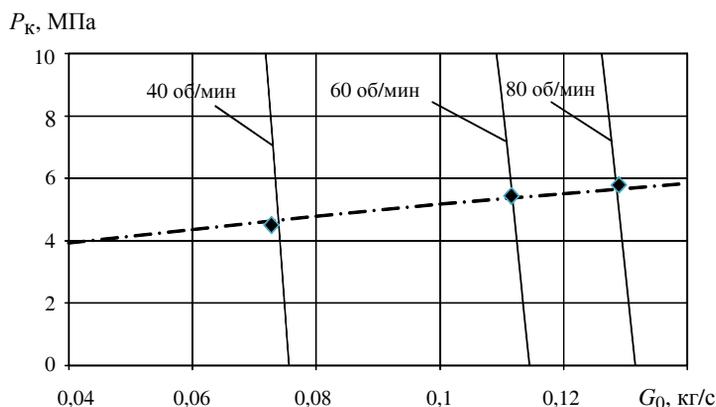


Рис. 11. Напорно-расходная характеристика экструдера и формирующего инструмента: ♦ – данные, полученные при расчете полной модели; — — — — напорно-расходная характеристика экструдера при разных скоростях вращения шнека; — · — — напорно-расходная характеристика формирующего инструмента

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие адаптера на выходе из зоны дозирования оказывает существенное влияние на значения максимальных и средних температур непосредственно в самом канале экструдера. Также стоит отметить, что от геометрических

параметров самого адаптера зависит равномерность распределения потока расплава полимера на входе.

Список литературы

1. Theoretical and experimental analysis of interfacial ionstabilities in coextrusion flows / M. Zatloukal, W. Kopytko, A. Lengálová, J. Vlček // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2005. – Vol. 98. – P. 153–162.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
4. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективно-го теплообмена при течении в каналах. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
5. Скульский О.И. Осесимметричная неизотермическая модель экструзии // *Течение полимеров и наполненных систем*. – Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1986. – С. 63–66.
6. Rauwendaal C. Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders // *Plastics, Rubbers and Composites*. – 2004. – Vol. 33, № 9/10. – P. 390–396.
7. 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.
8. 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.
9. Рауwendаль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2008. – 786 с.
10. 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.
11. Kelly L., Brown E.C., Howell K. Melt temperature field measurements in extrusion using thermocouple meshes // *Plastics, Rubber and Composites*. – 2008. – Vol. 37, № 2. – P. 151–157.
12. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 159 с.
13. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (Механика процессов). – М.: Химия, 1977. – 464 с.
14. Ершов С.В., Труфанова Н.М., Лукин М.Д. Сравнительный анализ различных моделей течения изоляционных полимеров в винтовом канале экструдера // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение и материаловедение*. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 105–121.
15. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // *Науч.-техн. ведомости СПбГТУ*. – 2004. – № 2. – С. 70–81.

References

1. Theoretical and experimental analysis of interfacial ionstabilities in coextrusion flows / M. Zatloukal, W. Kopytko, A. Lengálová, J. Vlček // *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, vol. 98, pp. 153–162.
2. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in the equipment]. Moscow: Mir, 1975, 539 p.
3. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of a finite element method]. Moscow: Mir, 1979. – 392 c.
4. Patankar S.V. Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh [The numerical solution of problems of heat conductivity and convective heat exchange at a current in channels]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo Energiticheskogo Instituta, 2003, 312 p.
5. Skul'skii O.I. Osesimmetrichnaia neizotermicheskaia model' ekstruzii [Axisymmetric not isothermal model of extrusion]. *Techenie polimerov i napolnennykh sistem*. Sverdlovsk. Издательство Уральского отделения Академии наук СССР, 1986, pp. 63–66.
6. Rauwendaal C. Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders. *Plastics, Rubbers and Composites*, 2004, vol. 33, no. 9/10, pp. 390–396.
7. 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.
8. 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 Pro-cessing Technology*, 2002. Jan., vol. 120, iss. 1–3, pp. 397.
9. Rauvendal' K. Ekstruziia polimerov [Extrusion of polymers]. Saint-Petersburg: Professiiia, 2008, 786 p.
10. 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.
11. Kelly L., Brown E.C., Howell K. Melt temperature field measurements in extrusion using thermocouple meshes. *Plastics, Rubber and Composites*, 2008, vol. 37, no. 2, pp. 151–157.
12. Trufanova N.M. Pererabotka polimerov [Processing of polymers]: uchebnoe posobie. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 159 p.
13. Torner R.V. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov (Mekhanika protsessov) [Theoretical bases of processing of polymers (Mechanics of processes)]. Moscow: Khimiia, 1977, 464 p.
14. Ershov S.V., Trufanova N.M., Lukin M.D. Sravnitel'nyi analiz razlichnykh modelei techeniia izoliatsionnykh polimerov v vintovom kanale ekstrudera [The comparative analysis of various models of a current of insulating polymers in the screw channel of

an extruder]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie i materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 105–121.

15. Smirnov E.M., Zaitsev D.K. Metod konechnykh ob'emov v prilozhenii k zadacham gidrogazodinamiki i teploobmena v oblastiakh slozhnoi geometrii [Method of final volumes in the annex to problems of hydraulic gas dynamics and heat exchange in the fields of difficult geometry]. *Nauchno-tekhnichestkie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 2, pp. 70–81.

Получено 4.07.2017

Об авторах

Ершов Сергей Викторович (Пермь, Россия) – ассистент 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 технологий 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) – Assistant, 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.