

УДК 621.315

М.В. Пузанов, Е.В. Субботин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА НА ШНЕКЕ

Рассмотрен процесс течения и плавления полимерных материалов в винтовом канале экструдера с учетом теплопроводности шнека. Предложен многоуровневый алгоритм итерационных процедур для совместного решения задач тепломассопереноса полимеров в условиях фазового перехода в рабочем канале экструзионного оборудования и определения температурного поля шнека. Проведено численное исследование влияния тепломассопереноса в шнеке на процессы переработки изоляционных полимерных сред методом экструзии путем сравнения результатов, полученных при использовании в расчетах различных условий теплообмена на шнеке. Представлены графики изменения по длине канала экструдера температуры шнека, площади поперечного сечения твердой пробки, средней температуры полимера. Построены напорно-расходные характеристики экструдера. Даны рекомендации по использованию в математических моделях различных условий теплообмена на шнеке.

Ключевые слова: экструдер, полимер, тепломассоперенос, математическая модель, теплопроводность шнека, численные исследования.

M.V. Puzanov, E.V. Subbotin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE NUMERICAL STUDY OF EXTRUSION PROCESSES POLYMER MATERIALS UNDER VARIOUS HEAT EXCHANGE CONDITIONS ON THE SCREW

The process of flow and melting of polymer materials in the extruder screw channel taking into account the thermal conductivity of screw was considered. The multilevel algorithm of iterative procedures for joint solving tasks of heat and mass transfer of polymers under conditions of phase transition in the working channel of extrusion equipment and determination of the temperature field of screw was proposed. Carried out the numerical study of the influence of heat transfer in screw on the processing of insulating polymeric mediums by extrusion by comparison of the results obtained by using in the calculations of various heat exchange conditions on the screw. Shows graphs of changes along the length of the extruder channel of the screw temperature, the cross section area of solid bed, the average temperature of polymer. The pressure-flow characteristics of extruder were built. The recommendations for use in mathematical models of various heat exchange conditions on the screw were given.

Keywords: extruder, polymer, heat and mass transfer, mathematical model, thermal conductivity of screw, numerical study.

В современной промышленности пластицирующая экструзия, представляющая собой непрерывный высокопроизводительный технологический процесс формования готовых изделий из полимерных материалов, остается основным способом производства разнообразной профильной продукции большой длины. Во всем мире подавляющая часть погонажной продукции, такой как пленки, трубы, листы и кабельные оболочки, производится методом экструзии.

Систематическим исследованиям проблем течения полимеров посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов [1–3]. Однако, несмотря на значительные успехи в теории и математическом моделировании процессов теплопереноса при экструзии полимеров, следует отметить, что на сегодняшний день в открытой литературе практически не представлена информация о влиянии на экструзию процессов теплопереноса в шнеке, учет которых необходим для более точного определения температурных режимов переработки. В математических моделях, описывающих теплоперенос в винтовом канале пластицирующего экструдера, используются в основном два подхода для задания граничных условий по температуре на поверхности шнека: изотермическая стенка [4, 5] или адиабата [5–7]. Численные результаты, полученные с использованием данных допущений, как правило, имеют существенные расхождения с результатами натуральных экспериментов, что подтверждает необходимость учета реального распределения температуры на шнеке.

Задачу теплообмена в винтовом канале экструдера с учетом теплопроводности шнека можно разделить на две части, связанные между собой общим итерационным алгоритмом.

Первая часть представляет собой пространственную математическую модель процессов теплопереноса полимера в рабочем канале одношнекового экструдера, охватывающую все функциональные зоны, начиная от зоны загрузки и заканчивая зоной дозирования, и учитывающую: нелинейность свойств материала; вынужденную конвекцию расплава полимера в условиях фазового перехода; влияние потока утечек расплава полимера через зазор между гребнем нарезки червяка и внутренней поверхностью цилиндра [8].

Вторая часть описывает задачу определения температурного поля в шнеке и прилегающем к нему тонком слое полимера (рис. 1). Полимерный слой считается неподвижным, а его толщина равна шагу расчетной сетки по высоте рабочего канала экструдера. Обладающий

высоким значением коэффициента теплопроводности шнек заменяется полым толстостенным стальным цилиндром без гребней, внутренний и внешний диаметры которого постоянны по длине.

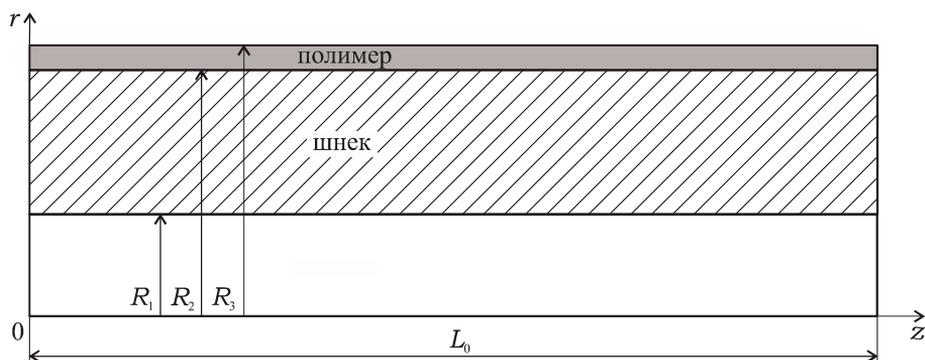


Рис. 1. Схема расчета теплообмена в шнеке

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R_1 – радиус внутреннего отверстия в шнеке; R_2 – внешний радиус шнека; R_3 – внешний радиус полимерного слоя; L_0 – длина шнека.

Таким образом, температурное поле шнека определяется при решении уравнения теплопроводности, которое для осесимметричной задачи в цилиндрических координатах будет иметь вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где r , z – радиальная и продольная координаты цилиндрической системы; T – температура; λ_r принимает значение коэффициента теплопроводности металла шнека λ_m или полимера λ_n , значения, которых считаются постоянными.

Распределение температуры на верхней границе слоя полимера задается из решения задачи пластицирующей экструзии [8]. Три другие внешние границы расчетной схемы (см. рис. 1) являются адиабатическими. На границах контакта материалов с разными теплофизическими характеристиками задаются условия равенства температур и тепловых потоков.

Задача определения температурного поля в шнеке и прилегающем к нему тонком слое полимера решается методом конечных элементов в пакете ANSYS.

Расчет процессов тепломассообмена высоковязких нелинейных полимерных сред в рабочем канале пластицирующего экструдера с учетом теплопроводности шнека осуществляется поэтапно, с помощью итерационной процедуры.

На первом этапе методом конечных разностей [9] решается пространственная задача тепломассопереноса полимера в винтовом канале одношнекового экструдера, при этом для первой итерации температурный профиль шнека рассчитывается по уравнению, предложенному Элбирли и Линдтом в работе [10].

В результате получаем поля температур, компоненты скорости, изменение давления и градиента давления по всем зонам экструдера. Зная температурные поля в поперечных сечениях рабочего канала экструдера, можно рассчитать распределение температуры в тонком слое полимера, прилегающем к шнеку, которое является граничным условием для задачи теплообмена в шнеке. Решение поставленной задачи позволяет получить изменение температуры на границе полимер–шнек, которое необходимо для начала следующей итерации. Данный циклический процесс продолжают до установления температурного профиля на границе полимер–шнек.

На рис. 2 представлены зависимости изменения температуры шнека по длине, определенные в результате численного исследования процесса переработки изоляционного полиэтилена на промышленном пластицирующем экструдере с диаметром шнека 160 мм.

Данные результаты были получены при использовании в вычислениях различных вариантов граничных условий на шнеке: 1 – температурный профиль шнека определялся с учетом теплопереноса; 2 – изменение температуры шнека рассчитывалось по эмпирическому уравнению [10]; 3 – теплообмен между перерабатываемым полимером и шнеком не учитывался (адиабатические условия).

Следует отметить существенное отличие температурных профилей шнека, представленных на рис. 2. Данные расхождения могут оказывать значительное влияние на результаты математического моделирования процессов экструзии. Например, для варианта 1 плавление завершилось на длине 14,9 витка (рис. 3) при средней температуре расплава полимера на выходе 225,9 °С (рис. 4), для варианта 2 аналогичные параметры составили 14,6 витка и 219,8 °С соответственно, для варианта 3 – 21,3 витка и 225,6 °С.

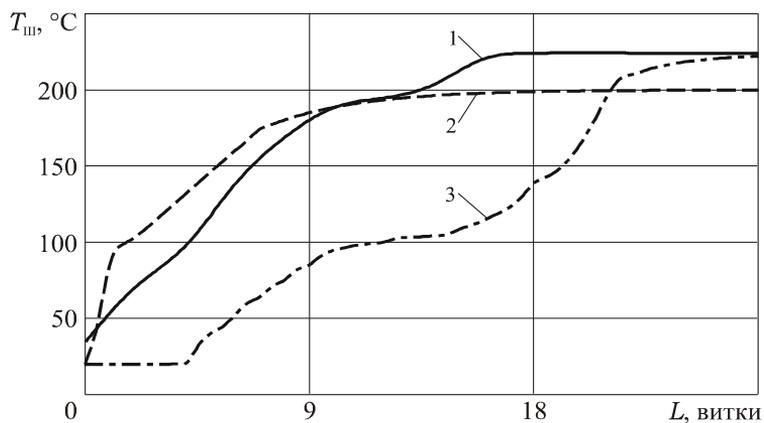


Рис. 2. Изменение температуры шнека по длине

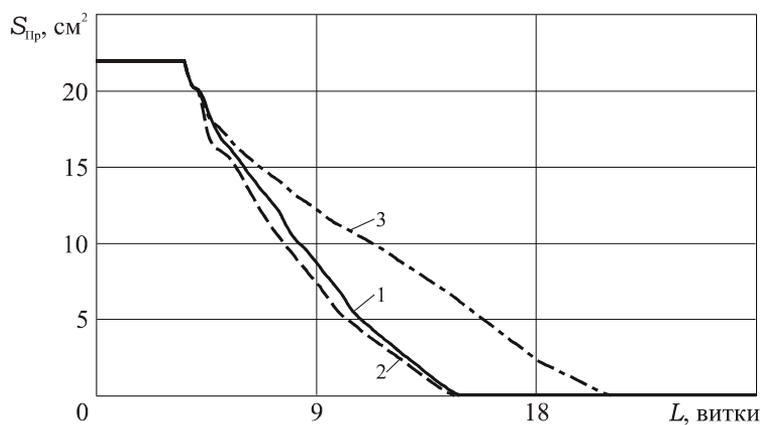


Рис. 3. Изменение площади поперечного сечения твердой пробки по длине канала

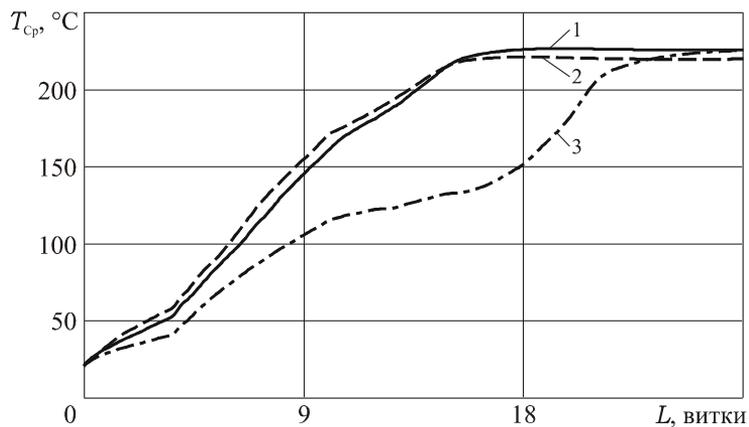


Рис. 4. Изменение средней температуры полимера по длине канала

Большой практический интерес представляют напорно-расходные характеристики экструдера (рис. 5).

Зависимости давления на выходе P_k от производительности экструдера G_0 , приведенные на рис. 5, построены для скорости вращения шнека 60 оборотов в минуту.

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод о том, что длина зоны плавления, протяженность которой для варианта 3 существенно превосходит аналогичные значения для вариантов 1 и 2, оказывает большое влияние на развиваемое экструдером давление.

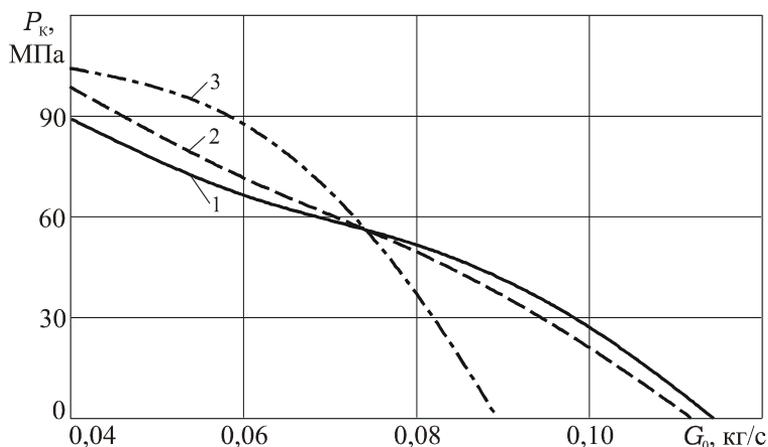


Рис. 5. Напорно-расходные характеристики экструдера

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что в случае отсутствия жестких требований к температурному режиму переработки полимеров в численных исследованиях при расчете температурного профиля шнека можно ограничиться применением эмпирических уравнений [10]. В то время как использование адиабатического условия на шнеке не позволяет с достаточной степенью точности численно описать процесс экструзии полимера.

Однако при экструзии материалов, свойства которых могут существенно изменяться в условиях чрезмерного нагрева, например, безгалогенных компаундов, не поддерживающих горение [11], ключевой характеристикой становится температура потока расплава в экструдере и формирующем инструменте. В таких случаях учет процесса теплопереноса в шнеке необходим для точного определения параметров технологического режима переработки.

Таким образом, учет теплопроводности шнека при решении задачи тепломассопереноса полимеров в винтовом канале пластицирующего экструдера позволяет получать более точную и полную картину переработки полимерных сред на одношнековых экструзионных аппаратах.

Библиографический список

1. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
2. Басов Н.И., Брой В. Техника переработки пластмасс. – М.: Химия, 1985. – 528 с.
3. Раувендаль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2008. – 786 с.
4. Chung C.I. A new theory for single-screw extrusion // *Modern. Plast.* – 1968. – № 9. – P. 178–198.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщ. 1. Математическая модель процесса тепломассопереноса полимера в канале экструдера // *Пластические массы.* – 2004. – № 6. – С. 38–41.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1972. – 656 с.
10. Elbirli B., Lind J.T. Mathematical modeling of melting of polymers in single-screw extruder // *Polymer Eng. Sci.* – 1984. – Vol. 24, № 12. – P. 988–999.
11. Лина В., Чамов А.В. Экструзия полимеров, не поддерживающих горение // *Кабели и провода.* – 2003. – № 6(283). – С. 16–20.

References

1. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Theoretical Bases of Polymer Processing]. Moscow: Khimiia, 1984. 632 p.
2. Basov N.I., Broi V. Tekhnika pererabotki plastmass [Plastics Processing Technics]. Moscow: Khimiia, 1985. 528 p.
3. Rauvendal' K. Ekstruziia polimerov [Polymer Extrusion]. Saint Petersburg: Professiiia, 2008. 786 p.
4. Chung C.I. A new theory for single-screw extrusion. *Modern. Plast.*, 1968, no. 9, pp. 178-198.
5. 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, no. 1, pp. 25-47.
6. 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, pp. 3239-3253.
7. He H., Zhou J. Simulation of cottonseed cake melt flow in metering zone of a single screw extruder. *Front. Chem. Eng. China*, 2010, no. 4(3), pp. 263-269.
8. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Iankov V.I. Prostranstvennaia matematicheskaia model' odnocherviachnogo plastitsiruiushchego ekstrudera. Soobshchenie 1. Matematicheskaiia model' protsessa teplomassoperenosa polimera v kanale ekstrudera [Spatial Mathematical Model of a Single-Screw Plasticating Extruder. Message 1. Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Process of Polymer in the Extruder Channel]. *Plasticheskie massy*, 2004, no. 6, pp. 38-41.
9. Samarskii A.A. Teoriia raznostnykh skhem [The Theory of Finite Difference Schemes]. Moscow, Nauka, 1972. 656 p.
10. Elbirli B., Lind J.T. Mathematical modeling of melting of polymers in single-screw extruder. *Polymer Eng. Sci*, 1984, vol. 24, no. 12, pp. 988-999.
11. Lina V., Chamov A.V. Ekstruziia polimerov, ne podderzhivaiushchikh gorenii [Extrusion of Polymers do not Support Burning]. *Kabeli i provoda*, 2003, no. 6(283), pp. 16-20.

Сведения об авторах

Пузанов Максим Васильевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

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

About the authors

Puzanov Maksim Vasilievich (Perm, Russian Federation) is student Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: ktei@pstu.ru).

Subbotin Evgenii Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 10.06.2014