



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.04

УДК 621.315

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БАРЬЕРНОГО ГРЕБНЯ НА ПРОЦЕСС ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ

С.В. Ершов, В.В. Черняев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 марта 2015 г.
Принята: 18 июня 2015 г.
Опубликована: 30 июня 2015 г.

Ключевые слова:

математическая модель,
полимер, экструзия,
переработка, плавление,
шнек, барьер, зазор,
метод конечных разностей,
реология, граничные условия

АННОТАЦИЯ

Исследуется влияние дополнительного (барьерного) гребня на процессы тепломассопереноса и фазовых превращений полимеров в канале пластицирующего экструдера. На основе уравнений энергии и гидродинамики построена математическая модель, описывающая процессы движения твердого и жидкого полимера внутри канала, а также претерпеваемые им фазовые превращения.

Для создания математической модели процессов плавления введен ряд упрощающих предположений, а именно: 1) процесс имеет стационарный характер при постоянном массовом расходе; 2) винтовой канал разворачивается на плоскость и используется принцип обращенного движения; 3) диффузия тепла вдоль канала не учитывается; 4) утечками расплава через основной гребень пренебрегаем; 5) упругие процессы в расплаве полимера не учитываются.

В результате процесс движения и теплообмена полимера в зоне плавления неклассического экструдера моделировался тепломассопереносом в длинном прямоугольном канале, разделенном барьерным гребнем на два (канал твердой фазы и канал расплава), в котором верхняя стенка двигалась с постоянной скоростью, равной окружной скорости червяка, под углом нарезки винтовой линии к оси канала.

Полученная модель решена методом конечных разностей, что позволило провести численное исследование зависимости процесса экструзии полимеров от геометрических параметров барьерного шнека. Расчет проводился для шнека ME-90, с числом $L/d = 26$ при расходе 78,7 кг/ч. Ширина барьерного гребня принималась равной 16 мм, зазор над барьерным гребнем составлял 1 мм. Перерабатываемый материал – полиэтилен высокой плотности.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что наличие дополнительного (барьерного) гребня увеличивает диссипативный разогрев расплавленного полимера, циркулирующего над ним, а также снижает величину пленки расплавленного полимера над твердой фазой, что позволяет интенсифицировать процесс плавления и повысить его однородность.

© ПНИПУ

© Ершов Сергей Викторович – аспирант, инженер-исследователь, e-mail: erшов_sv@bk.com
Черняев Владислав Васильевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: ktei@mail.com

Sergey V. Ershov – Postgraduate Student, Research Engineer, e-mail: erшов_sv@bk.com
Vladislav V. Chernyaev – PhD, Assistant Professor, e-mail: ktei@mail.com

RESEARCH OF INFLUENCE OF BARRIER CREST ON POLYMER EXTRUSION PROCESS

S.V. Ershov, V.V. Chernyaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 March 2015
Accepted: 18 June 2015
Published: 30 June 2015

Keywords:

mathematical model,
polymer, extrusion,
processing, melting,
screw, barrier gap,
finite difference method,
rheology,
boundary conditions

ABSTRACT

In this paper the effect of an additional (barrier) crest on heat and mass transfer processes and phase transitions of polymers in the channel plasticizing extruder is investigated. On the basis of the energy and hydrodynamics equations the mathematical model describing the processes of motion of a solid and a liquid polymer inside the channel as well as undergoing phase transformations is given.

To create a mathematical model of melting processes a number of simplifying assumptions was introduced, namely: 1) the process has a stationary character at a constant mass flow rate; 2) helical path is unfolded on the plane and the principle of reverse movement is used; 3) diffusion of heat along the channel is not taken into account; 4) loss of the melt through the main ridge is neglected; 5) the elastic polymer in the melt process is not taken into account.

As a result, the process of resin moving and heat exchange in the melting zone of the extruder was modeled by nonclassical heat and mass transfer in a long rectangular channel divided into two by barrier crest (solid phase channel and melt channel) in which the upper wall is moving at a constant speed equal to the peripheral speed of the worm at helical line cutting angle to the channel axis.

The resulting model is solved by finite difference method allowing doing the numeric investigation of the dependence of the extrusion process of polymers on the geometric parameters of the barrier screw. The calculation was performed for the screw ME-90 with a number of $L/d = 26$ at a rate of 78.7 kg/hour. The width of the barrier crest was assumed to be 16 mm, clearance above the barrier crest was 1 mm. Feed material was high density polyethylene.

Data analysis led to the conclusion that the presence of additional (barrier) crest increases dissipative heating of the molten resin circulating above it, as well as reduces the amount of molten polymer film on the solid phase, which allows intensifying melting process and improve its homogeneity.

© PNRPU

Зона плавления является одной из самых протяженных функциональных зон пластицирующего экструдера. В пределах этой зоны происходит плавление твердой фазы под действием тепла, подводимого от корпуса, и тепла, выделяющегося в результате работы сил вязкого трения расплавленного полимера [1–3].

В однозаходном (классическом) шнеке твердая фаза плавится, сохраняя целостность до тех пор, пока не станет физически нестабильной и не разрушится. Образовавшиеся частицы полимера смешиваются с расплавом и продолжают плавиться за счет теплопроводности [4–6]. Поскольку теплопроводность полимеров относительно низка, процесс плавления протекает медленно. В результате возможна ситуация, при которой частицы нерасплавленного полимера достигнут выходного сечения шнека и попадут в головку, вызывая колебания температуры расплава, что скажется на качестве конечного продукта [7–10].

Для исключения такой ситуации производителями экструзионного оборудования предложен ряд конструкций шнеков (рис. 1), в зоне плавления которых имеется дополнительный (барьерный) гребень, отделяющий расплав полимера от твердой фазы [11] (неклассический шнек). При этом по мере продвижения по каналу твердый полимер будет поджиматься к разогретому корпусу и плавиться. Расплав через барьерный гребень (направление течения расплава показано стрелкой) будет попадать в канал жидкой фазы, служащий для переноса и гомогенизации расплавленного полимера. Все многообразие

таких шнеков условно можно свести к двум типам: шнеку Майлифера (изменяется ширина канала при неизменной высоте) и шнеку Бара (изменяется высота канала при неизменной ширине).

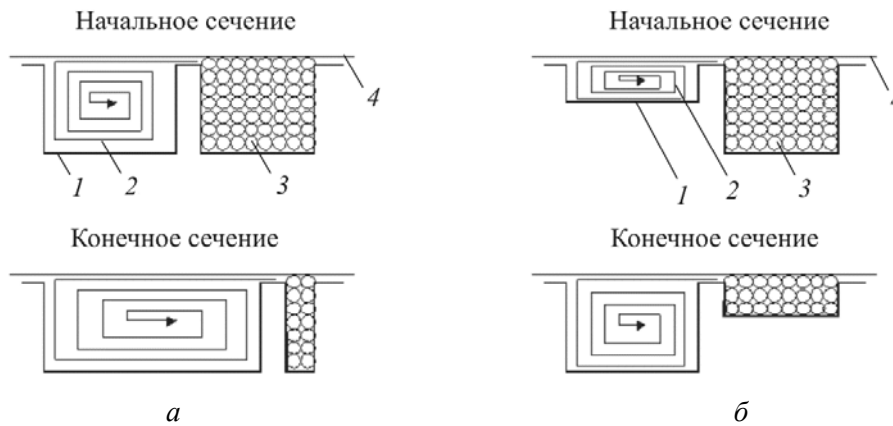


Рис. 1. Схема плавления полимера в барьерных шнеках: *а* – Майлифер; *б* – Бар: 1 – шнек; 2 – канал жидкой фазы; 3 – твердая фаза; 4 – корпус

В шнеке, выбранном нами в качестве объекта исследования (шнек экструдера ME-90 фирмы SKET), поджатие твердого полимера осуществляется как за счет снижения высоты канала твердой фазы, так и за счет снижения его ширины (рис. 2).



Рис. 2. Схема плавления полимера в шнеке ME-90

Для создания математической модели процессов плавления введем ряд упрощающих предположений: 1) процесс имеет стационарный характер при постоянном массовом расходе; 2) винтовой канал разворачивается на плоскость, и используется принцип обращенного движения; 3) диффузия тепла вдоль канала не учитывается; 4) утечками расплава через основной гребень пренебрегаем; 5) упругие процессы в расплаве полимера не учитываются.

Таким образом, процесс движения и теплообмена полимера в зоне плавления неклассического экструдера будем моделировать теплопереносом в длинном прямоугольном канале, разделенном барьерным гребнем на две части (канал твердой фазы и канал расплава), в котором верхняя стенка движется с постоянной скоростью, равной окружной скорости червяка, под углом нарезки винтовой линии к оси канала.

Анализ процессов, протекающих в шнеке, требует совместного рассмотрения уравнения энергии и уравнений гидродинамики. При этом система уравнений, описывающих движение и фазовые превращения в канале экструдера, примет вид [2, 5]

– в твердой фазе

$$C_s \rho_s V_p \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где ρ_s , C_s , λ_s – соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности твердого полимера; V_p – скорость нерасплавленных гранул; T – температура.

– в расплаве полимера

уравнение сплошности

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

уравнения движения

$$\rho_m \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right), \quad (3)$$

$$\rho_m \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right), \quad (4)$$

$$\rho_m \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \frac{\partial V_z}{\partial y} \right), \quad (5)$$

уравнение энергии

$$\rho_m C_m \left(V_z \frac{\partial T}{\partial z} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu_3 F, \quad (6)$$

где ρ_m , C_m , λ_m – соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава полимера; V_x , V_y , V_z – компоненты скорости движения расплава полимера; P – давление; F – функция диссипации [5]; μ_3 – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры и определяющаяся степенным законом [1]:

$$\mu_3 = \mu_0 \exp(-\beta(T - T_0)) \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{(n-1)}{2}}, \quad (7)$$

В формуле (7) I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации; μ_0 – вязкость при $I_2/2 = 1$ и $T = T_0$ (начальная вязкость); β – температурный коэффициент вязкости; n – показатель аномалии вязкости, характеризующий степень отклонения вязкости жидкости от ньютоновской.

Граничные условия по температуре на внутренней поверхности корпуса задаются формулой

$$T = T(z), \quad (8)$$

а на поверхности шнека

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

где $T(z)$ – заданное изменение температуры корпуса по длине (изменялась по длине от 200 до 250 °С); n – нормаль к поверхности шнека. Граница раздела фаз определялась изотермой, соответствующей некоторой средней (в интервале фазовых превращений) температуре плавления.

Граничные условия для составляющих скоростей на стенках канала и барьерном гребне задаются исходя из условия прилипания и непроницаемости:

$$\begin{aligned} V_{z|y=H} &= V_0 \cos(\theta), \quad V_{x|y=H} = V_0 \sin(\theta), \quad V_{y|y=H} = 0, \\ V_{x|г.ш.} &= 0, \quad V_{y|г.ш.} = 0, \quad V_{z|г.ш.} = 0, \\ V_{z|y=y_s(x)} &= V_p, \end{aligned} \quad (10)$$

где V_0 – окружная скорость шнека; V_p – скорость пробки полимера; г.ш. – граница шнека; H – высота канала шнека; θ – угол нарезки шнека.

Для того чтобы система определяющих уравнений была полной, необходимо дополнить ее условием постоянства массового расхода G_0 , которое должно выполняться в любом поперечном сечении по длине канала:

$$G_0 = \int_0^W \int_0^H \rho(x, y) V_z dx dy = \text{const.} \quad (11)$$

Полученная система уравнений решалась методом конечных разностей. Существует множество методов получения конечно-разностных схем, которые приводят либо к явной, либо к неявной схеме, преимущества и недостатки которых известны. В нашем случае использовался метод переменных направлений (МПН), сочетающий в себе лучшие качества обеих схем. Суть МПН состоит в том, что переход от временного слоя m к временному слою $m+1$ происходит в два этапа с шагом, равным $0,5\tau$. При этом исходное уравнение разбивается на два. Сначала на половинном шаге по времени решается первое уравнение, неявное по направлению x и явное по направлению y . На следующей половине шага решают уравнение, явное по направлению x и неявное по направлению y . Таким образом, решение двумерной задачи сводится к последовательному решению одномерных задач вдоль строк и вдоль столбцов. При решении стационарных задач методом переменных направлений шаг по времени τ становится итерационным параметром.

С помощью разработанной программы было проведено численное исследование процессов плавления в экструдерах с неклассической геометрией. Расчет проводился для шнека с базовой геометрией при расходе 78,7 кг/ч. Ширина барьерного гребня принималась равной 16 мм, зазор над барьерным гребнем составлял 1 мм. Перерабатываемый материал – ПЭВП.

Ниже представлены базовая геометрия и режим работы шнека, а также физические свойства полиэтилена высокой плотности.

Базовая геометрия и режим работы шнека:

Диаметр шнека.....	90 мм
Число витков.....	8/8/10
Глубина канала в зоне загрузки.....	15 мм
Глубина канала в зоне дозирования.....	7 мм
Угол навивки.....	17,23°
Ширина основного гребня.....	11,5 мм
Частота вращения шнека.....	60 об/мин

Физические свойства полиэтилена высокой плотности:

Свойства расплава полимера

Показатель аномалии вязкости.....	0,5
Температурный коэффициент	0,007 °С ⁻¹
Начальная вязкость.....	25000 Па·с
Теплопроводность	0,182 Вт/м°С
Плотность	779 кг/м ³

Свойства твердого полимера

Теплопроводность	0.335 Вт/м°С
Плотность	920 кг/м ³
Теплоемкость	2680 Дж/кг°С
Температура плавления.....	130 °С

Рис. 3 представляет собой типичную картину изменения формы твердой пробки в зоне плавления барьерного шнека. Здесь же приведена зависимость изменения расхода нерасплавленного полимера ($Q_{тф}$) по длине канала. Из рисунка видно, что до введения барьерного гребня плавление материала с различной скоростью происходит одновременно по всей криволинейной поверхности раздела фаз (витки 4–10). На этом участке механизм процесса плавления можно объяснить следующим образом: тепло, расходуемое на нагрев и плавление, поступает в расплав от двух источников: внешнего и внутреннего, обусловленного энергией вязкого трения. Перенос тепла, в том числе и к границе твердой фазы, осуществляется как за счет конвективного, так и диффузионного механизмов. Однако в силу плохой теплопроводности полимерных материалов и интенсивной циркуляции расплава, вклад конвективного переноса тепла превалирует над диффузионным. Поэтому наиболее нагретые слои расплава полимера у поверхности цилиндра уносятся к толкающему гребню нарезки червяка, где и происходит наиболее интенсивное плавление материала.

Согласно принятой геометрии шнека в точке *A* (8-й виток) начинается конусная часть канала. С этого момента барьерный гребень только начинает отделяться от основного, уплотняя пробку полимера и поджимая ее к нагретому корпусу. Однако для упрощения мы пренебрегли данной переходной зоной, приняв, что на этом участке плавление происходит по классическому механизму вплоть до точки *B* (10-й виток).

Начиная с точки *B* расчет ведется с учетом барьерного гребня. При этом нерасплавленный полимер уплотняется и перераспределяется в канале твердой фазы. Если он не влезает в канал, его ускоряют, сохраняя расход твердой фазы постоянным. Теперь механизм плавления существенно отличается от предыдущего. Твердый полимер постоянно поджимается к разогретой верхней стенке и, расплавившись, перетекает в канал расплава. Так как пленка полимера над твердой фазой достаточно тонка, она не оказывает существенного теплового сопротивления. Вследствие этого количество тепла, поступающего в полимер за счет теплопроводности, увеличивается, и, соответственно, скорость плавления возрастает, что соответствует резкому снижению расхода твердой фазы. Такой режим, при котором полимер все время поджимается к нагретой поверхности, был бы наиболее целесообразен. Однако практически он труднодостижим, поскольку при малейшем отклонении от заданных условий переработки возрастает вероятность закупорки. Поэтому вследствие недостаточного поджатия над твердой фазой начинает образовываться собственный бассейн расплава, и скорость плавления снижается (вторая половина кривой *BC*).

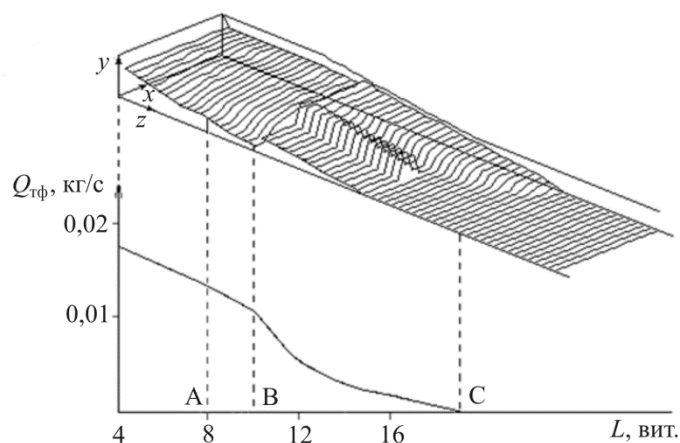


Рис. 3. Изменение формы твердой пробки и расхода твердой фазы по длине канала

Поля температур (рис. 4) построены в виде изотерм. Светло-серая область соответствует нерасплавленной пробке полимера, темно-серая – барьерному гребню. На рисунке отчетливо видна область максимального нагрева, которая образуется у толкающей стенки. Также можно заметить, что при введении барьерного гребня (см. рис. 3, точка *B*) в зазоре над пробкой возникают большие градиенты температур, ускоряющие процесс плавления.

Анализируя течение в поперечном сечении канала (рис. 5), можно сделать вывод о существовании интенсивной циркуляции расплавленного полимера поперек канала. При этом в отсутствие барьерного гребня образуется один большой вихрь, размеры и форма которого меняются при движении вдоль канала. При введении дополнительного гребня изначально поперечное течение происходит в основном в канале жидкой фазы. Однако по мере плавления полимера и при его недостаточном поджатии в канале твердой фазы образуется собственный бассейн расплава, и жидкий полимер начинает циркулировать между двумя каналами.

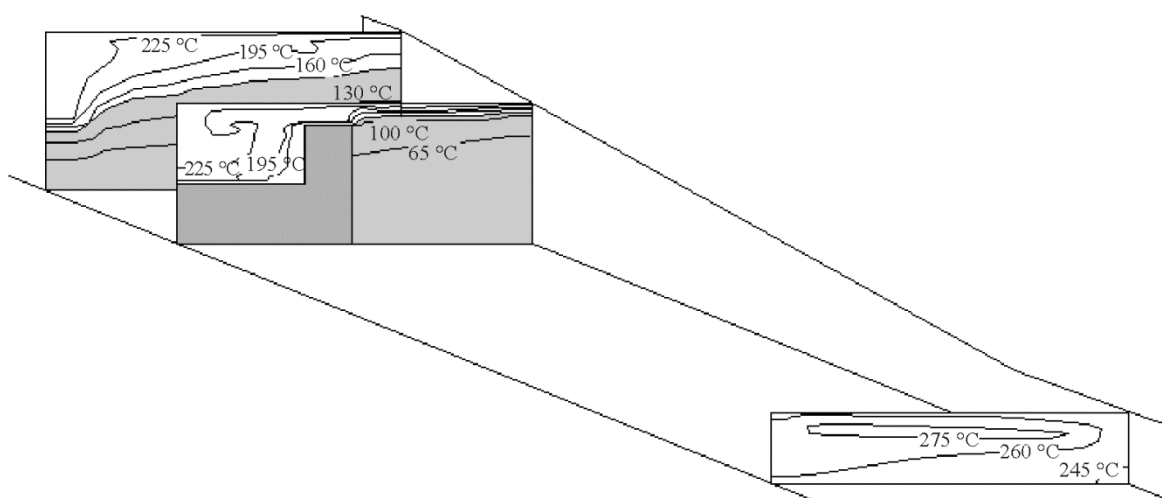


Рис. 4. Поля температур по длине канала

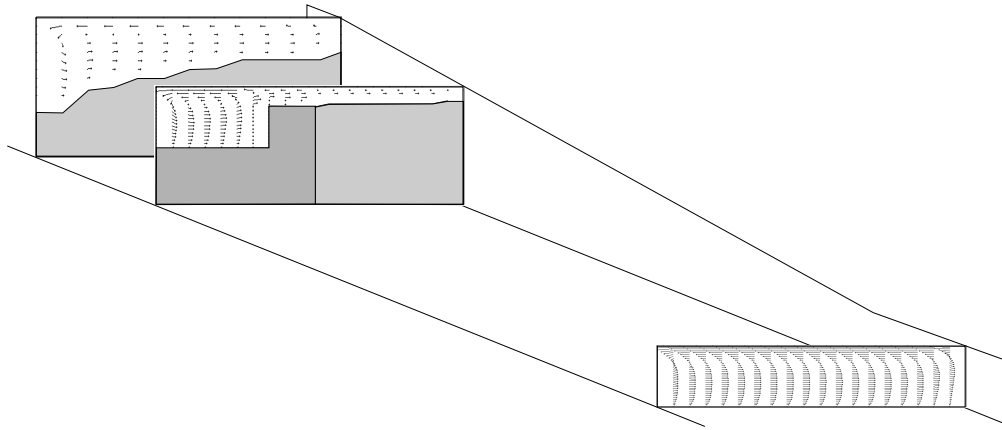


Рис. 5. Векторы скоростей в поперечном сечении канала

На рис. 6 представлена зависимость градиента давления по длине канала. Расчет давления начинали с зоны задержки плавления, поскольку на сегодняшний день не существует модели, позволяющей получить адекватную зависимость распределения давления в зоне загрузки. Как следует из рисунка, на участке зоны задержки плавления и в начале зоны плавления, т.е. в области, где толщина расплава достаточно мала, градиент давления имеет довольно большие значения. В точке ввода барьерного гребня (10-й виток) наблюдается небольшое скачкообразное снижение положительного градиента давления вследствие уменьшения поперечного сечения канала.

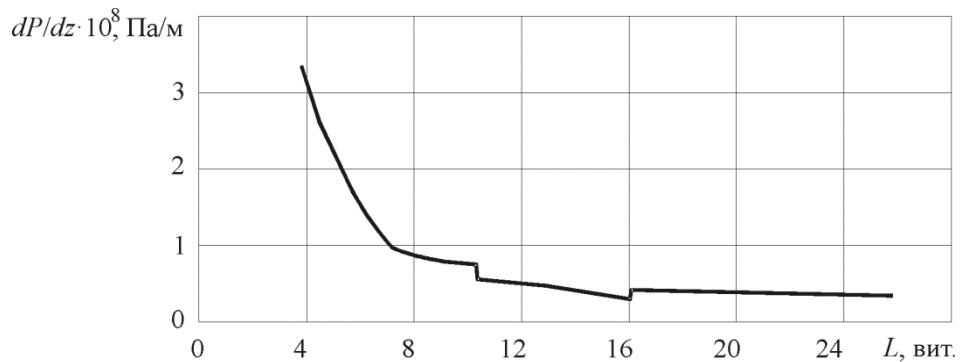


Рис. 6. Изменение градиента давления по длине канала

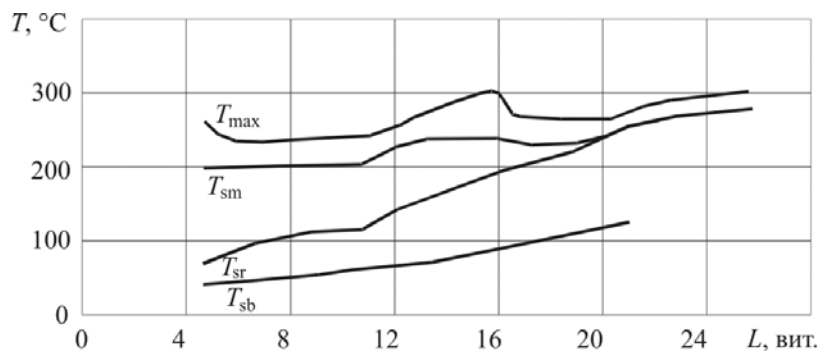


Рис. 7. Изменение температуры по длине канала

Распределение средней T_{sr} и максимальной T_{max} температур в канале шнека, средних температур пробки полимера T_{sb} и расплава T_m приведено на рис. 7. Заметим, что при введении барьерного гребня температура расплава резко увеличивается, поскольку возрастает доля диссипативного разогрева и снижается площадь контакта с нерасплавленным (холодным) полимером.

Таким образом, при помощи пространственной математической модели зоны плавления экструзионных агрегатов с неклассической геометрией шнека исследовано влияние барьерного гребня на процесс экструзии полимеров с учетом нелинейности теплофизических и реологических свойств материала. В результате решения поставленной задачи получены поля температур в канале шнека, определен профиль твердой фазы полимера, градиенты давления, векторные поля скоростей в поперечном направлении, а также длины функциональных зон.

Библиографический список

1. Раувендаль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2008. – 786 с.
2. Yankov V.I., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Flow of polymeric fluids in helix seals // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2005. – No. 6. – С. 6.
3. Казаков А.В., Савченко В.Г., Труфанова Н.М. Моделирование процессов тепломассопереноса полимера в головке экструдера с учетом и без учета зависимости вязкости от температуры // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2010. – No. 1. – С. 130–134.
4. 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 // *Известия Том. политехн. ун-та*. – 2004. – No. 6. – С. 38–41.
5. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщение 3. Проверка адекватности модели // *Пластические массы*. – 2005. – No. 5. – С. 43–45.
6. Rauwendaal C. New directions for extrusion: compounding with single screw extruders // *New Plastics, Additives and Compounding*. – June 2002. – Vol. 4. – Iss. 6. – P. 24–27.
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). – P. 263–269.
8. Kelly A.L., Brown E.C., Coates P.D. Melt temperature field measurement: influence of extruder screw and die geometry // *Plastics, Rubber and Composites*. – 2005. – Vol. 34. – No. 9. – P. 410–416.
9. Campbell G.A., Spalding M.A. Analysis and troubleshooting single-screw extrusion. – Munich: Hanser Publications, 2013. – 777 с.
10. Савченко В.Г., Казаков А.В. Расчет влияния геометрии каналов технологического инструмента кабельной головки на возникновение вихревых потоков при наложении изоляции // *Кабели и провода*. – 2010. – No. 2(321). – С. 11–14.
11. Субботин Е.В., Черняев В.В. Исследование влияния геометрии шнека на процесс плавления // *Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – No. 3. – С. 25–32.

References

1. Rauwendal' K. Ekstruziia polimerov [Polymer extrusion]. Saint Petersburg: Professiiia, 2008. 786 p.
2. Yankov V.I., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Potok polimernykh zhidkostei v vintovykh uplotnieniakh [Flow of polymeric fluids in helix seals]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2005, no. 6, pp. 6.

3. Kazakov A.V., Savchenko V.G., Trufanova N.M. Modelirovanie protsessov teplomassoperenosa polimera v golovke ekstrudera s uchetom i bez ucheta zavisimosti viazkosti ot temperatury [Simulation of heat and mass transfer processes in polymer extrusion head with and without the temperature dependence of viscosity]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2010, no. 1, pp. 130-134.

4. Subbotin E.V., Shcherbinin A.G., Trufanova N.M. Chislennoe issledovanie protsessov techeniia polimerov v usloviakh fazovogo perekhoda v vintovykh kanalakh ekstrudera pri proizvodstve plastmassovoi izoliatsii [Numerical investigation of flow processes in polymers under phase transfer conditions in the extruder screw channels in the production of plastic insulation]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 6, pp. 38-41.

5. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Iankov V.I. Prostranstvennaia matematicheskaia model' odnocherviachnogo plastitsiruiushchego ekstrudera. Soobshchenie 3. Proverka adekvatnosti modeli [Spatial mathematical model of a single-screw kneading extruder. Post 3. Check the adequacy of the model]. *Plastics*, 2005, no. 5, pp. 43-45.

6. Rauwendaal C. New directions for extrusion: compounding with single screw extruders. *New Plastics, Additives and Compounding*. June 2002, vol. 4, iss. 6, pp. 24-27.

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), pp. 263-269.

8. Kelly A.L., Brown E.C., Coates P.D. Melt temperature field measurement: influence of extruder screw and die geometry. *Plastics, Rubber and Composites*, 2005, vol. 34, no. 9, pp. 410-416.

9. Campbell G.A., Spalding M.A. Analysis and troubleshooting single-screw extrusion. Munich: Hanser Publications, 2013. 777 p.

10. Savchenko V.G., Kazakov A.V. Raschet vliianiia geometrii kanalov tekhnologicheskogo instrumenta kabel'noi golovki na vzniknovenie vikhrevykh potokov pri nalozhenii izoliatsii [The calculation of the geometry of the channels of technological tool cable head on the occurrence of eddy currents when applied insulation]. *Cables and wires*, 2010, № 2 (321), pp. 11-14.

11. Subbotin E.V., Cherniaev V.V. Issledovanie vliianiia geometrii shneka na protsess plavleniia [Investigation of the effect of the geometry of the screw on the process plavleniia]. *PSTU Bulletin. Electrical, information technology, control systems*, 2009, no. 3. pp. 25-32.