

5. Hentschel, H. G. E. Barkhausen noise in metallic glasses with strong local anisotropy: Model and theory [Text] / H. G. E. Hentschel, V. Ilyin, I. Procaccia, B. S. Gupta // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2014. – Vol. 2014, Issue 8. – P. P08020. doi: 10.1088/1742-5468/2014/08/p08020
6. Gutiérrez, J. Induced anisotropy and magnetoelastic properties in Fe-rich metallic glasses [Text] / J. Gutiérrez, V. Muto, P. T. Squire // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2001. – Vol. 287, Issue 1–3. – P. 417–420. doi: 10.1016/s0022-3093(01)00599-3
7. Ferenc, J. Mechanical testing of iron based bulk metallic glasses and their suitability for force sensors [Text] / J. Ferenc, M. Kowalczyk, T. Erenc-Sędziak, G. Cieślak, T. Kulik // EPJ Web of Conferences. – 2013. – Vol. 40. – P. 16001. doi: 10.1051/epjconf/20134016001
8. Ferenc, J. Magnetostrictive iron-based bulk metallic glasses for force sensors [Text] / J. Ferenc, M. Kowalczyk, G. Cieślak, T. Kulik // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. – Vol. 50, Issue 4. – P. 1–3. doi: 10.1109/tmag.2013.2287240
9. Chiriac, H. Sensor applications of amorphous glass-covered wires [Text] / H. Chiriac, C. S. Marinescu, T. A. Óvari, M. Neagu // Sensors and Actuators A: Physical. – 1999. – Vol. 76, Issue 1–3. – P. 208–212. doi: 10.1016/s0924-4247(99)00032-1
10. Hristoforu, E. Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications [Text] / E. Hristoforu // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2002. – Vol. 249, Issue 1–2. – P. 387–392. doi: 10.1016/s0304-8853(02)00563-2
11. Bydzowski, J. Strain sensors based on stress-annealed $\text{Co}_{69}\text{Fe}_2\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ amorphous ribbons [Text] / J. Bydzowski, L. Kraus, P. Svec, M. Pasquale, M. Kollar // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – Vol. 110, Issue 1–3. – P. 82–86. doi: 10.1016/j.sna.2003.09.042

Розроблено модель руху розплаву полімеру в зоні дозування одношнекового екструдера, яка передбачає, що розплав рухається у вигляді «корки». Отримано рівняння розрахунку зони дозування, що враховують пристінну в'язкість (адгезію) розплаву до поверхні шнека і циліндра. Виконано порівняльний аналіз з класичним рівнянням екструзії ньютонівської рідини. Показані переваги використання моделі «коркового» течія – більш загальний характер, простота сприйняття, облік нових параметрів процесу

Ключові слова: ньютонівська рідина, екструзія, шнек, модель течія, тертя розплаву

Разработана модель движения расплава полимера в зоне дозирования одношнекового экструдера, которая предполагает, что расплав движется в виде «пробки». Получены уравнения расчета зоны дозирования, учитывающие пристенную вязкость (адгезию) расплава к поверхности шнека и цилиндра. Выполнен сравнительный анализ с классическим уравнением экструзии ньютоновской жидкости. Показаны преимущества использования модели «пробкового» течения – более общий характер, простота восприятия, учет новых параметров процесса

Ключевые слова: ньютоновская жидкость, экструзия, шнек, модель течения, трение расплава

УДК 678; 532.135

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51338

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЭКСТРУДЕРЕ

В. В. Леваничев

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра системной инженерии
Восточноукраинский национальный
университет им. В. Даля
пр. Советский, 59-а,
г. Северодонецк, Украина, 93400
E-mail: levanichev@yandex.ru

1. Введение

В настоящее время моделирование процесса течения расплава полимера в зоне дозирования шнека экструдера требует доработок и уточнений.

Совершенствование конструкции одношнекового экструдера идет в направлении модификации геометрии шнека и цилиндра, повышения чистоты и твердости их поверхности. Разработаны и повсеместно применяются биметаллические пары шнек-цилиндр, причем марки покрытия адаптируются под задачи повышения абразивной или коррозионной стойкости, подобраны различные сочетания покрытий шнека и цилиндра для оптимальной работы экструдера [1].

Значительное повышение производительности одношнекового экструдера достигнута за счет применения барьерного шнека в сочетании с продольными

канавками вдоль всего цилиндра. Такой экструдер получил название Helibar extruder и рассматривается как одно из эффективных средств ресурсосбережения при переработке пластмасс [2].

Эти практические результаты во многом не стыкуются с современным теоретическим представлением работы зоны дозирования как насоса для перекачки жидкости.

Очень часто теория в процессах переработки пластмасс отстает от практики, возможно одна из причин в том, что расплав рассматривается как жидкость, а реальное движение ближе к скольжению твердого тела по поверхности. В работе [3] впервые получено уравнение полной реологической кривой течения, на основе физической модели, при этом движение расплава представляется как «пробка», которая скользит по стенкам канала.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Модели течения ньютоновской, неньютоновской жидкости степенного типа в шнеке экструдера были детально проработаны многими исследователями [4, 5], но в данных моделях используется ограничение – скорость на стенке неподвижного канала равна нулю. Также предполагается, что основным элементом, который создает давление в экструдере, является движущаяся поверхность. То есть когда вращается шнек, модель предполагает, что расплав как жидкость прилипает к поверхности и максимальная скорость развивается около стенки шнека в направлении его вращения. Прилипание расплава ко всей поверхности, которая движется, является обязательным условием работы экструдера.

При анализе способов создания давления, указывается [5] что основная идея работы экструдера в том, что это плоскость, свернутая в спираль, поэтому если подавать расплав двумя движущимися плоскостями, то можно значительно повысить производительность экструдера. Для реализации этой идеи было разработано экспериментальное устройство, состоящее из двух обогреваемых, вращающихся дисков, где расплав подавался поверхностями дисков, устройство надежно работало в лаборатории, но имело ряд недостатков, в частности ограниченную длину канала течения. Шнек не имеет такого ограничения, поэтому развитие конструкции экструдера [5] предлагалось следующим образом: витки не связаны со шнеком, сердечник шнека и цилиндр вращаются в одном направлении. В таком устройстве расплав, прилипая к сердечнику шнека и цилиндру, увлекается к выходу двумя поверхностями. При этом витки лучше вращать в противоположном направлении. Таким образом, теоретически, производительность увеличится в два раза по сравнению с обычной конструкцией экструдера (за счет прямого потока).

Но экструдер Helibar, где увеличена производительность на 30–50 %, без увеличения диаметра шнека, разработан с абсолютно другими конструктивными элементами. Отметим, что заявляется [2], в том числе, снижение затрат энергии на 10–60 % и ускоренная промывка при замене рецептур.

Проведем анализ конструкции Helibar extruder на основе доступной информации [2, 6–9]. Продольные канавки улучшают теплоотдачу за счет увеличения площади поверхности цилиндра, смесительное и пластифицирующее действие происходит за счет барьерного шнека, повышение производительности за счет того, что пластифицированный материал дополнительно подается по канавкам (высотой 0,5–1,0 мм) [9], которые проходят вдоль всего цилиндра. Канавки могут быть прямые или спиральные, как минимум нужна одна канавка, причем если канавка спиральная, то проходит перпендикулярно оси витка шнека [2]. Перерабатываются почти все термопластичные материалы и вторичное сырье. И что очень важно – расчет производительности экструдера возможен с применением модели «винт-гайка» [8]. То есть подтверждается, что движение расплава полимера (даже в такой сложной конфигурации каналов), можно рассматривать как движение гайки (пробки), насаженной на винт (шнек), и которая движется за счет торможения о стенки цилиндра и скольжения относительно вращающегося шнека.

Следовательно, канавки действительно повышают производительность, но прежде всего создавая дополнительное торможение на поверхности пробки расплава.

Можно предположить, что расплав полимера, спирально охватывающий шнек, обладает структурной прочностью – «формирует гайку», поэтому тормозящее действие канавок в цилиндре усиливает скольжение расплава (спираль) относительно шнека, соответственно производительность экструдера возрастает.

Таблица 1

Характеристики стандартных экструдеров в сравнении с HELIBAR

Фирма	Описание экструдера ø45 мм	L/D	P _{ном} , kW	N _{max} , 1/min	Q _{max} , kg/h	Q _{max} /N _{max} , кг·мин/об
Komax	Гладкий цилиндр, зона загрузки гладкая или с небольшими канавками (1950 г)	26	13,2	100	50	0,50
	Цилиндр из состоит из двух частей, канавки в зоне загрузки на длине 5D, гладкий цилиндр на длине 25D (1980 г)	30	35	200	160	0,80
	Экструдер HELIBAR (2000 г)	30	37	210	180	0,86
EXTRUDEX GmbH	Экструдер HELIBAR/стандартный	30	34	150	135	0,90
	Экструдер HELIBAR/высокопроизводительный	36	75	275	300	1,09

Анализ характеристик экструдера Helibar, которые заявляются фирмами-производителями оборудования [7, 8], показывает, что по сравнению с экструдером с гладкой зоной загрузки, удельная (специфическая) производительность повышается в 2,18 раза (1,09/0,5), также повышается рабочая частота вращения шнека, соответственно пропорционально и общая производительность.

3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является развитие методов расчета и анализа процессов переработки пластмасс с помощью модели пробкового течения расплава полимера.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

– сравнить результаты расчета течения между параллельными пластинами при сдвиговом и пробковом течении;

- разработать метод расчета основных параметров течения расплава в зоне дозирования одношнекового экструдера с помощью модели пробкового течения, использующей полную реологическую кривую течения расплава;
- выполнить анализ результатов моделирования течения, полученных с помощью классической и пробковой моделей течения.

4. Описание исследования течения расплава полимера на основе пробковой модели

4.1. Течение между параллельными пластинами

Рассмотрим процесс течения между двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии h , на основе общепринятого сдвигового течения и течения в виде «пробки». Одна пластина неподвижна, другая движется со скоростью V_0 (рис. 1).

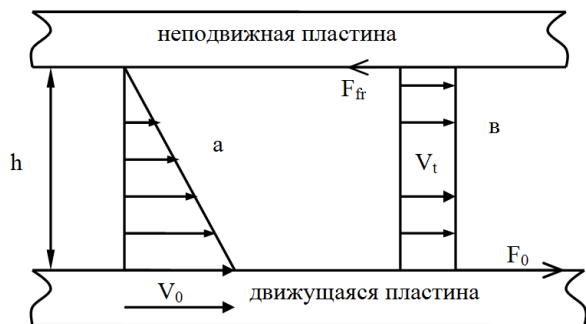


Рис. 1. Эпюры скоростей при различных моделях течения: а – сдвиговое течение, в – пробковое течение

Анализ пробкового течения проводим по уравнениям [11], при этом считаем, что расплав прилипает к пластинам с одинаковой силой и площадь пластин одинакова. Итоговая эпюра скоростей при таком течении прямоугольная, расплав увлекается движущейся пластиной.

$$F_{fr} = V_t \eta S_p; F_0 = (V_0 - V_t) \eta S_p,$$

где F_{fr} – сила, препятствующая сдвигу «пробки» расплава, характеризующая прилипание (адгезию) расплава к неподвижной пластине; F_0 – сила, действующая на пробку расплава со стороны движущейся пластины со скоростью V_0 ; S_p – площадь поверхности пластин; V_t – скорость движения пробки расплава; η – пристенная вязкость [11], которая характеризует сопротивление сдвигу пробки на стенке пластины.

В установившемся режиме сила, действующая на пробку расплава со стороны движущейся пластины и увлекающая ее в сторону движения пластины, равна силе торможения пробки со стороны неподвижной пластины, поэтому:

$$V_t \eta S_p = (V_0 - V_t) \eta S_p; V_t = V_0 / 2.$$

То есть при одинаковой площади контакта и одинаковом трении (скольжении) расплава на подвижной и неподвижной пластинах скорость движения пробки будет в два раза меньше скорости движения пластины.

Поэтому расход на единицу ширины: $q_A = V_0 h / 2$.

Таким образом, общепринятый подход анализа сдвигового течения [5] и анализ движения пробки дают одинаковый результат по расходу вынужденного течения.

Для неньютоновской жидкости скорость движения V_t и пристенная вязкость η связаны соотношением [3], которое описывает полную реологическую кривую течения:

$$\eta = \frac{H}{\sin \alpha} - \frac{H}{\frac{V_t}{V_r} + 1}. \quad (1)$$

Скорость «пробкового» течения определяется производительностью и сечением канала, например для трубного канала: $V_t = \frac{Q}{S_c} = \frac{Q}{\pi R^2}$.

В табл. 2 даны сравнительные параметры модели пробкового течения с общепринятым подходом, приведены формулы для пересчета параметров течения для целевого канала.

Таблица 2

Уравнения течения жидкости между параллельными пластинами длиной L шириной w и высотой h

Общепринятый подход, ньютоновская жидкость	Модель «пробкового» течения неньютоновской жидкости	Взаимосвязь параметров
Вязкость $\mu, [\text{Па} \cdot \text{с}]$	Пристенная вязкость $\eta, \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right]$	$\eta = \frac{6\mu}{h}$
Скорость сдвига $\gamma, \left[\frac{1}{\text{с}} \right]$ $\gamma = \frac{6Q}{wh^2}$	Скорость течения «пробки» расплава $V_t, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$ $V_t = \frac{Q}{wh}$	$V_t = \frac{\gamma h}{6}$
Противодавление из-за сдвигового течения жидкости $\Delta P_n, [\text{Па}]$ $\Delta P_n = \frac{6\mu L^2}{wh^3}$	Противодавление из-за прилипания расплава к стенкам канала $\Delta P_c, [\text{Па}]$ $\Delta P_c = \frac{Q\eta L}{wh^2}$	$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_c} = \frac{6\mu}{\eta h} = 1$ $\Delta P_n = \Delta P_c$
Напряжение сдвига $\tau_n, [\text{Па}]$ $\tau_n = \frac{\Delta P_n h}{2L}$ $\tau_n = \mu \gamma$	Напряжение сдвига $\tau_c, [\text{Па}]$ $\tau_c = \frac{\Delta P_c h}{2L}$ $\tau_c = \eta V_t$	$\tau_n = \tau_c$

Согласно пробковой модели течения [11], противодавление определяется силой вязкого трения F_t которая развивается между стенками (поверхностью) канала и пробкой расплава:

$$\Delta P = \frac{F_t}{S_c} = \frac{V_t \eta S_p}{S_c} = \frac{V_t \eta 2wL}{wh} = \frac{V_t \eta 2L}{h} = \frac{Q\eta 2L}{wh^2}, \quad (2)$$

где S_c – площадь сечения канала; S_p – площадь поверхности канала; F_t – сила, препятствующая сдвигу «пробки» расплава, характеризующая прилипание (адгезию) расплава к стенкам канала.

4.2. Разработка модели движения расплава в шнеке

Анализ движения пробки расплава в зоне дозирования проводим аналогично анализу движения полимера в зоне питания червячного экструдера. На рис. 2 представлена схема, показывающая различные силы,

действующие на элемент пробки расплава. Обозначения геометрических параметров шнека являются общепринятыми и соответствуют обозначениям в [5].

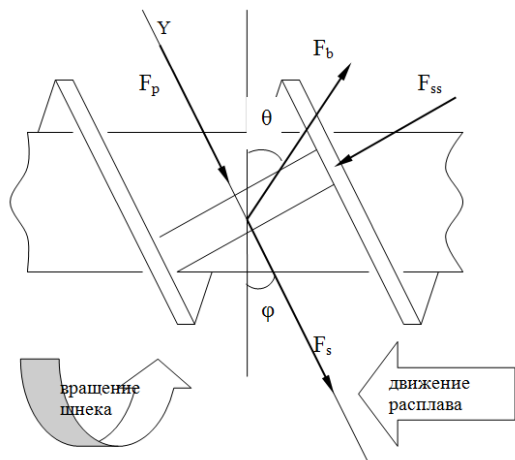


Рис. 2. Диаграмма сил, действующих на пробку расплава полимера: F_s – сила трения, действующая на расплав со стороны шнека; F_{ss} – сила, толкающая расплав со стороны активной нарезки витка; F_b – сила трения, действующая на расплав со стороны цилиндра; F_p – сила, действующая на пробку расплава по причине противодействия в головке

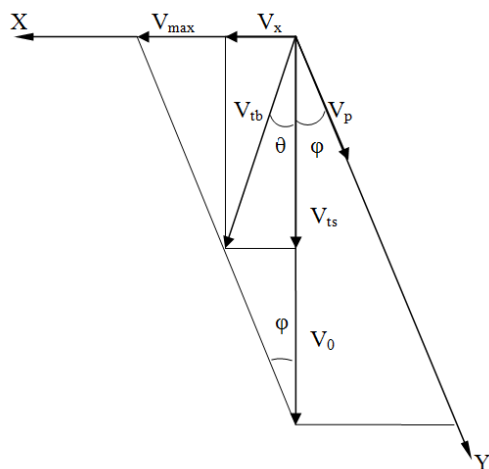


Рис. 3. Диаграмма скоростей движения расплава в зоне дозирования шнека: V_0 – скорость вращения шнека; V_{ts} – скорость движения пробки расплава относительно шнека; V_{tb} – скорость движения пробки расплава относительно цилиндра; V_x – полезная составляющая скорости движения пробки расплава вдоль оси шнека; V_{max} – максимально возможная полезная скорость движения пробки расплава; V_p – скорость движения пробки расплава под действием противодействия головки; ϕ – угол наклона витка; θ – угол трения

Согласно разработанной диаграмме скоростей (рис. 3), движение шнека и расплава связаны следующими соотношениями:

$$V_x = \frac{V_0}{\left(\frac{1}{\text{tg}\theta} + \frac{1}{\text{tg}\phi}\right)}; V_0 = \pi DN. \tag{3}$$

$$V_x = V_{tb} \sin\theta; V_x = V_{ts} \text{tg}\theta. \tag{4}$$

4. 2. 1. Движение расплава при отсутствии давления на выходе зоны дозирования

Силы, действующие на элемент пробки, можно выразить через геометрические параметры шнека, пристенную вязкость и скорости движения шнека, для этого рассмотрим уравнение установившегося движения при условии $V_p=0, F_p=0$, проекция на ось витка Y:

$$F_b \cos(\theta + \phi) = F_s. \tag{5}$$

Согласно модели пробкового течения:

$$S_b \eta_b V_{tb} \cos(\theta + \phi) = S_s \eta_s \frac{V_0 - V_{ts}}{\cos\phi}, \tag{6}$$

где S_b – площадь поверхности цилиндра; S_s – площадь поверхности шнека; S_w – площадь сечения витка, сечение перпендикулярно оси Y.

После преобразований, с учетом уравнений (4), получаем уравнение для расчета угла трения θ :

$$\frac{1}{\text{tg}\theta} = \frac{S_s \eta_s}{S_b \eta_b \sin\phi \cos\phi} + \text{tg}\phi. \tag{7}$$

Последовательность расчета «прямого потока»:

- 1) по реологическим характеристикам, константам пристенной вязкости (1) рассчитываем соотношение $\eta_s/\eta_b = H_s/H_b$;
- 2) определяем угол трения по уравнению (7);
- 3) по уравнению (3), задаваясь скоростью вращения шнека N , определяем скорость движения пробки расплава V_x ;
- 4) рассчитываем производительность зоны дозирования $Q = V_x \pi Dh(1 - e/t)$;
- 5) рассчитав скорости движения V_{tb} и V_{ts} по уравнениям (4), определяем соответствующую пристенную вязкость на стенке цилиндра η_b и шнека η_s по уравнению (1).

4. 2. 2. Движение при наличии противодействия

При наличии противодействия ΔP на выходе зоны дозирования скорость расплава уменьшается. Торможение расплава, «скорость обратного потока», рассчитаем с применением модели пробкового течения [11] в направлении оси витка:

$$V_p = \frac{\Delta P S_w}{(S_b + S_s) \eta_{cp}}, \tag{8}$$

где средняя вязкость в канале: $\eta_{cp} = (\eta_s + \eta_b)/2$.

Вязкость на стенке цилиндра η_b и шнека η_s рассчитываем по скорости движения расплава относительно шнека V_{ts} и цилиндра V_{tb} по уравнению (4) без учета противодействия, это допустимо, так как для расчета скорости V_p используется средняя вязкость η_{cp} в канале. Для расчета η_b и η_s требуется применять соответствующую реологическую модель согласно уравнению (1), где константы вязкости $\eta_s/\eta_b = H_s/H_b$.

Результирующая скорость движения расплава вдоль оси шнека:

$$V = V_x - V_p \sin\phi. \tag{9}$$

Итоговое уравнение работы зоны дозирования шнека получаем после подстановки переменных из уравнений (3), (7), (8) в (9):

$$V = \frac{\pi DN \sin \phi \cos \phi}{S_s \eta_s + 1} - \frac{\Delta P S_w \sin \phi}{\eta_{cp} (S_b + S_s)} \quad (10)$$

Для зоны дозирования с длиной L, с шириной витка w и высотой витка h:

$$S_w = hw; S_b = \frac{Lw}{\sin \phi}; S_s = \frac{L(w+2h)}{\sin \phi} \quad (11)$$

Если принять, что $\eta_s/\eta_b = 1$, тогда уравнение работы зоны дозирования преобразуется к виду более удобно для инженерных расчетов:

$$V = \frac{w}{2(h+w)} \left[\pi DN \sin \phi \cos \phi - \frac{\Delta P h \sin^2 \phi}{\eta_{cp} L} \right] \quad (12)$$

Коэффициент формы канала

$$F_d = F_p = w/(h+w) \quad (13)$$

Производительность зоны дозирования

$$Q = V \pi Dh(1-e/t) \quad (14)$$

Если считать, что площади шнека и цилиндра одинаковы и равны площади цилиндра (когда $w \gg h$), то при таком упрощении моделируется движение между параллельными пластинами «пробки» расплава, и уравнение работы зоны дозирования преобразуется к виду:

$$V = \frac{\pi DN \sin \phi \cos \phi}{2} - \frac{\Delta P h \sin^2 \phi}{\eta_{cp} L} \quad (15)$$

Рассчитав значение скорости V, необходимо уточнить угол трения, который меняется под действием противодействия:

$$V = V_{ts} \operatorname{tg} \theta \quad (16)$$

4. 2. 3. Сравнительный анализ полученных уравнений с классическим уравнением экструзии

Классическое уравнение экструзии ньютоновской жидкости $Q_c = \alpha N F_d - \beta \frac{\Delta P}{\mu} F_p$, преобразуем к виду, где будут учитываться только скорости движения расплава вдоль оси однозаходного шнека $V_c = V_{xc} - V_{pc}$:

$$V_c = \frac{Q_c}{\pi Dh [1-e/t]} = \alpha_1 N F_d - \beta_1 \frac{\Delta P}{\mu} F_p \quad (17)$$

Или, без учета коэффициентов формы F_d, F_p (когда $w \gg h$):

$$V_c = \frac{\pi DN \cos \phi \sin \phi}{2} - \frac{\Delta P h^2 \sin^2 \phi}{\mu L} \quad (18)$$

Проведем анализ расчетов по уравнениям (15) и (18).

Прямой поток одинаков для обеих моделей. Для равенства обратного потока необходимо чтобы:

$$1/\eta_{cp} = h/6\mu \quad (19)$$

Такое же соотношение вязкостей получается и при анализе течения между параллельными пластинами по сдвиговой и пробковой модели течения (табл. 2). Таким образом, уравнения (15) и (18) тождественны.

Уравнения (10) и (12) имеют более общий характер по сравнению с классическим уравнением экструзии, учитывают неньютоновский характер течения расплава, при этом достаточно просты для понимания и практического применения. Уравнение (10) учитывает качество поверхности шнека и цилиндра, которое влияет на отношение η_s/η_b .

5. Результаты моделирования течения в зоне дозирования

В качестве примера рассмотрим расчеты по уравнениям (12) и (17).

Материал ПЭВД, температура переработки 230 °С, плотность $\rho=1 \text{ г/см}^3$, реологические характеристики, измерение на стандартном капилляре $D=2,1 \text{ мм}$, $L=8 \text{ мм}$.

Таблица 3

Реологические характеристики ПЭВД

Параметр	Значение			
	1	20	100	400
Скорость сдвига, c^{-1}				
Вязкость, Па·с	738	625	350	170

На основе реологической характеристики были рассчитаны параметры моделей течения материала.

Таблица 4

Параметры моделей течения материала ПЭВД

Модель течения	Параметр	Значение	Диапазон скоростей
$\eta = \frac{H}{\sin \alpha} - \frac{V_r}{V_t \operatorname{tg} \alpha} + 1$	Угол взаимодействия	α , [град]	70
	Скорость релаксации	V_r , [м/с]	0,07
	Константа пристенной вязкости	H , $\left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right]$	2,66E+06
Степенная $\mu = m_0 \gamma^{n-1}$	Константа вязкости	m_0 , [Па·с]	2976
	Индекс течения	n	0,52
	Вязкость при нулевой скорости течения	μ_0 , [Па·с]	745

Далее при моделировании течения в зоне дозирования пристенную вязкость расплава в шнеке η_b и η_s рассчитываем согласно параметрам модели из табл. 4, скорости движения пробки расплава $V_t(V_{tb}, V_{ts})$ – по уравнениям (4).

Вязкость для классической модели определяли по степенной модели, с параметрами из табл. 4, скорость сдвига $\gamma = \pi DN/h$. Отношение обратного потока к прямому по уравнению: $\alpha = V_p/V_x \cdot 100$.

Необходимо отметить, что для стандартного капилляра между константой пристенной вязкости H и вязкостью μ_1 существует взаимосвязь $H \approx 3810 \cdot \mu_1$ [11].

Геометрические параметры исследуемого шнека: $D=45 \text{ мм}$, $\phi=17,50$, $e=5 \text{ мм}$, $L=600 \text{ мм}$, $h=4 \text{ мм}$, $w=37,7 \text{ мм}$. Согласно уравнениям (7) при $\Delta P=0$ угол трения составляет $\theta=12,420$.

Анализ результатов моделирования, приведенных в табл. 5, показывает, что обе модели дают близкие результаты, различие в прогнозировании производи-

тельности не более 10 %. Основное влияние оказывают формулы для расчета коэффициента формы канала, скорости сдвига и вязкости.

Таблица 5

Сравнительные расчеты по двум моделям зоны дозирования шнека

Параметр	Результаты моделирования					
	1	2	3	4	5	6
ΔP , [Бар]	20	300	20	300	20	300
N, [об/мин]	10	10	40	40	80	80
Пробковая модель						
θ , [град]	11,28	-5,25	11,88	4,19	12,01	6,24
Q, [кг/ч]	4,96	-2,29	20,94	7,30	42,35	21,75
α , [%]	9,45	141,76	4,45	66,71	3,36	50,37
Сдвиговая модель						
Q _c , [кг/ч]	5,19	-2,27	21,87	7,36	44,37	24,13
α_c , [%]	9,3	139,6	4,5	67,9	3,2	47,3

Согласно результатам, приведенным в табл. 6, управляя параметром η_s/η_b можно регулировать производительность экструдера. Максимально возможный угол трения, прогнозируемый по уравнению (7), составляет 72,5 град, при этом производительность составит 97 кг/ч.

При достижении максимально высокого торможения расплава на стенке цилиндра и скольжения на стенке шнека производительность экструдера повышается в 2,21 раза (97/43,8), такой уровень хорошо согласуется с повышением удельной производительности в 2,18 раза, в экструдере Helibag согласно данным табл. 1.

Таблица 6

Влияние соотношения пристенных вязкостей шнек/цилиндр на производительность исследуемой зоны дозирования

Параметр		Результаты моделирования (N=80об/мин)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP , Бар	η_s / η_b	10,0	5,0	3,01	2,01	1,02	0,53	0,37	0,24	0,13	0,07
300	θ , [град]	0,4	0,9	1,6	2,7	6,2	13,5	20,0	29,8	43,1	53,0
	Q, [кг/ч]	2,2	4,5	7,7	11,6	21,8	35,3	43,3	51,9	59,7	63,8
0	θ , [град]	1,3	2,7	4,4	6,5	12,4	22,4	30,1	40,8	53,6	62,3
	Q, [кг/ч]	7,4	13,7	20,9	28,3	43,8	60,4	69,1	78,0	86,5	91,4

Анализ данных табл. 7 показывает, что применение степенной и пробковой моделей течения, по сравнению

с ньютоновской, имеют большую сходимость результатов прогнозирования производительности.

Необходимо отметить, что оба подхода взаимно дополняют друг друга. Пробковое течение более характерно для высоковязких, высокомолекулярных полимеров, при большом количестве наполнителей, в технологиях, где применяются процессинговые, антипригарные добавки которые влияют на скольжение расплава относительно поверхности каналов экструдера.

Сдвиговое течение развивается при высокотемпературной переработке, экструзии низкомолекулярных полимеров. Также на характер течения оказывают влияние размеры каналов, материал покрытия каналов течения расплава и износ оборудования.

Таблица 7

Влияние вида модели течения расплава применяемой для расчета обратного потока на производительность экструдера

Исходные параметры		Результаты моделирования ($\Delta P=200$ Бар)							
Модель течения	Частота вращения	N	0,1	1,0	5,0	10,0	40,0	80,0	120,0
Ньютоновская при $\mu_0=745$ Пас	Производительность	Q _n	-9,0	-8,5	-6,2	-3,4	13,8	36,7	59,6
		Q _c	-0,5	-1,2	-1,0	0,4	12,5	31,4	51,2
Пробковая Табл. 3		Q	-3,4	-3,1	-1,6	0,3	12,2	29,1	47,0

6. Выводы

1. Представление течения расплава полимера в виде пробки, которая обладает определенной формой и скользит по поверхности формирующего канала, дополняет теорию процессов переработки пластмасс, дает новое понимание работы зоны дозирования одношнекового экструдера.

2. Анализ процессов экструзии с помощью сдвигового и пробкового течения дает близкие результаты, различие в прогнозировании производительности между моделями составляет не более 10 %.

3. Преимущество модели пробкового течения в том, что применяется полная реологическая кривая течения, соответственно точно прогнозируется вязкость при любой скорости движения расплава, также учитывается влияние качества поверхности каналов течения полимера. Уравнение пробкового течения имеет более общий характер по сравнению с классическим уравнением экструзии.

Литература

1. Screw and barrel combinations [Electronic resource] / The official website company Bernex Bimetall AG, 2015. – Available at: <http://www.bernexgroup.com/mm/Barrel-Screwcombination1.pdf>
2. Bonten, C. Resource Efficiency in Plastics Technology [Electronic resource] / C. Bonten, Oliver Kast // Institut für Kunststofftechnik Stuttgart, Germany / По материалам Motiva Group, Helsinki, 2015. – Режим доступа: http://www.motiva.fi/files/9729/02_Resource_efficiency_in_plastics_industry_Bonten_Kast.pdf
3. Леваничев, В. Модель течения расплава полимера [Текст] / В. Леваничев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 7 (64). – С. 39–41. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/16685/14175>
4. Раувендаль, К. Экструзия полимеров [Текст] / К. Раувендаль; под ред. А.Я. Малкина; пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
5. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / З. Тадмор, К. Тогос; пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
6. US7083321 Single screw extruder. / Eberhard Grunschloss. Assignee: Krauss-Maffei Kunststofftechnik GmbH, Appl. No.: US 10/600,217.

7. Single screw extruder range Helibar U [Electronic resource] / The official website company Komax, 2015. – Available at: <http://www.komax.pro/en/extrusion/extruder-long-helical-grooves>
8. HELIBAR®- single-screw extruders [Electronic resource] / The official website company EXTRUDEX GmbH, 2015. – Available at: <http://extrudex.de/en/helibar>
9. HELIBAR® Plastification Unit [Electronic resource] / Official site of company HELIX GmbH, 2015. – Available at: <http://www.helixgmbh.com/index.php?id=7&lang=en>
10. EXTRUDEX introduces economic single-screw HELIBAR® extruder at K 2010 [Electronic resource] / The official website company Messe Düsseldorf GmbH, 2010. – Available at: <http://www.k-online.com/>
11. Леваничев, В. Анализ полной реологической модели течения расплава полимера [Текст] / В. Леваничев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 6 (74). – С. 11–16. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/38951/37879>

В роботі показано, що в інтервалі температур 0–600 К Ве володіє різним типом ауксетичності, який змінюється в наступному порядку: неаксіальний ауксетик → не ауксетик → аксіальний ауксетик → повний ауксетик. Проаналізовано вплив величини і знаку коефіцієнтів Пуассона на енергію Пайерлса для крайових і гвинтових компонент дислокацій в Ве. Пояснено аномальну поведінку його амплітудних залежностей внутрішнього тертя від температури

Ключові слова: аксіальна, неаксіальна ауксетичність, енергія Пайерлса, крайові, гвинтові дислокації, внутрішнє тертя

В работе показано, что в интервале температур 0–600 К Ве обладает разным типом ауксетичности, который изменяется в следующем порядке: неаксиальный ауксетик → не ауксетик → аксиальный ауксетик → полный ауксетик. Проанализировано влияние величины и знака коэффициентов Пуассона на энергию Пайерлса для краевых и винтовых компонент дислокаций в Ве. Объяснено аномальное поведение его амплитудных зависимостей внутреннего трения от температуры

Ключевые слова: аксиальная, неаксиальная ауксетичность, энергия Пайерлса, краевые, винтовые дислокации, внутреннее трение

УДК 539.22: 539.32: 669.539.67

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51339

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ АУКСЕТИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ

М. Н. Гунько

Аспирант*

E-mail: gunko125@mail.ru

А. В. Олейнич-Лисюк

Кандидат физико-математических наук, доцент*

E-mail: a_oliynich@ukr.net

Н. Д. Раранский

Доктор физико-математических наук, профессор*

E-mail: ftt2010@bigmir.net

А. Ю. Ташук

Аспирант*

E-mail: sashatashuk@gmail.com

*Кафедра физики твердого тела

Черновицкий национальный

университет им. Ю. Федьковича

ул. Коцюбинского, 2, г. Черновцы, Украина, 58012

1. Введение

Первые сведения о веществах, в которых коэффициент Пуассона принимает отрицательные значения (теперь за ними закрепилось название ауксетики), появились около 70 лет назад, однако экспериментальные исследования их свойств в основном проведены в последнее десятилетие [1].

Ауксетические свойства имеют композиционные, гранулированные и пористые материалы со специфическим строением, а также довольно большой класс кристаллов, в частности с кубическими и гексагональными типами решеток. Среди ГПУ-кристаллов ауксетические свойства обнаружены в Zn, Cd, Be, Tl и др. [1, 2], среди которых только бериллий используют в

качестве конструкционного материала в аэрокосмической и атомной отраслях промышленности. Известно, что при комнатных температурах бериллий достаточно хрупкий материал, поэтому достоверные знания о характере его поведения во время деформации имеют не только познавательное значение.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Сведения о ауксетических свойствах Ве в современной научной литературе недостаточны и неоднозначны, несмотря на их немалую практическую значимость. Так, в обзоре [1] указано, что Ве является