

14. Vrentas, J. S. Diffusion in Polymer – Solvent Systems; II.A Predictive Theory for the Dependence of Diffusion Coefficient on Temperature, Concentration and Molecular Weight [Text] / J. S. Vrentas, J. L. Duda // Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition. – 1977. – Vol. 15, Issue 3. – P. 417–439. doi: 10.1002/pol.1977.180150303
15. George, S. C. Transport phenomena through polymeric systems [Text] / S. C. George, S. Thomas // Progress in Polymer Science. – 2001. – Vol. 26, Issue 6. – P. 985–1017. doi: 10.1016/S0079-6700(00)00036-8
16. Буртная, И. А. Мембранное выделение керосиновой и дизельной фракций из смеси тяжелой нефти и газового конденсата [Текст] / И. А. Буртная, О. О. Гачечиладзе, Н. В. Шафаренко // Промышленный Сервис. – 2012. – Т. 1, № 42. – С. 2–3. – Режим доступа: http://www.nitu.ru/tpps/2012_1.pdf

Виконано порівняльний аналіз повних реологічних кривих течії розплавів полімерів за допомогою двох моделей течії. Визначено похибки прогнозування в'язкості і показані переваги використання моделі «коркової» течії. Запропоновано методіку розрахунку течії неньютонівської рідини, де в'язкість розуміється як зміна площі взаємодії, опір стиску розплаву і подолання адгезії розплаву до стінок каналу

Ключові слова: неньютонівська рідина, реологія, модель течії, релаксація, розплав полімеру

Выполнен сравнительный анализ полных реологических кривых течения расплавов полимеров с помощью двух моделей течения. Определены погрешности прогнозирования вязкости и показаны преимущества использования модели «пробкового» течения. Предложена методика расчета течения неньютоновской жидкости, где вязкость понимается как изменение площади взаимодействия, сопротивление сжатию расплава и преодоление адгезии расплава к стенкам канала

Ключевые слова: неньютоновская жидкость, реология, модель течения, релаксация, расплав полимера

УДК 678; 532.135

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38951

АНАЛИЗ ПОЛНОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА

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

Современное соэкструзионное производство гибких многослойных упаковочных полимерных материалов является многономенклатурным, в некоторых случаях мелкосерийным или единичным. Потери времени на переналадки могут достигать 20 % в смену, соответственно увеличиваются отходы, снижается качество, повышается себестоимость готовой продукции.

Основные трудности возникают в процессе управления и прогнозирования времени промывки при смене рецептур, так как на него влияют не только текущие параметры сырья и технологические режимы линии, но и предшествующая номенклатура, а также текущее состояние соэкструзионной головки, качество внутренней поверхности по которой течет расплав.

Течение расплава возле стенки канала влияет на многие эффекты (дробление поверхности экструдата, потение головки “die drop”) которые пока не возможно рассчитать, и разработаны только направления решения подобных проблем [1].

Методы расчета современных процессов переработки пластмасс построены на упрощенных моделях, которые прогнозируют вязкость в очень узком диапазоне скоростей сдвига и построены с ограничениями

параметров, которые на практике значительно влияют на производственный процесс.

Поэтому разработка точных и простых моделей течения расплавов учитывающих воздействие на пристенный слой в максимально широком диапазоне скоростей сдвига является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для описания полной реологической характеристики предложено ряд уравнений. Общепринятыми являются Ellis model, Carreau model, Cross model [2–5]. Есть и другие модели развития степенного закона, где предлагается воспользоваться взаимосвязью индекса течения со скоростью сдвига и температурой [6].

В связи с созданием различных композиций и сополимеров, развитием технологических добавок, появилась задача создания моделей течения учитывающих, что расплав скользит по стенке канала [7, 8]. Модели, учитывающие скольжение на стенке канала, также используют степенной закон, то есть характер зависимости сохраняется, но процесс течения, анализируемые параметры и эпюра скоростей потока расплава, при таком подходе, значительно изменя-

ются, а степень воздействия на пристенный слой не учитывается.

Также недостатком предлагаемых моделей является то, что они являются эмпирическими, поэтому параметры моделей сложно соотносить с физическими, молекулярными характеристиками полимеров, технологическими режимами их переработки.

В модели «пробкового» течения [9] впервые найдено уравнение полной реологической кривой на основе физической модели. Найдена более глубокая взаимосвязь параметров течения с релаксацией полимера, получены формулы расчета точек перехода между характерными областями течения расплава.

В модели [9, 10] предлагается следующий механизм течения неньютоновской жидкости. Прежде всего, поскольку полимерные цепи находятся во взаимном зацеплении, в установившемся режиме всегда развивается «пробковый» характер течения. То есть взаимоспутанность макромолекул блокирует развитие плавной эпюры скоростей от нуля на стенке канала до максимума в центре и эпюра имеет телескопический характер. При течении полимера формируется пристенный слой W3, молекулы которого сжаты и практически не релаксируют, и центральный слой W1 (пробка), который скользит по пристенному слою. Центральный слой сжимаем и обладает упругостью. Толщина пристенного слоя составляет 0,5–1 % от ширины канала. Взаимодействие происходит по макронеровностям и сегментам молекул которые выступают из спутанного клубка и адгезируют с молекулами пристенного слоя. Участок, где происходит взаимодействие, можно назвать низковязким межслоем W2, его толщина составляет от 1 % до 8 % от ширины канала (согласно исследований распределения слоев при соэкструзии [10]).

На рис. 1 представлены эпюры скоростей, общепринятой, рассчитанной согласно степенного закона и предлагаемой телескопической, где течение происходит со скольжением на стенке канала, с различной толщиной низковязкого слоя W2 (производительность трех потоков одинакова). На рис. 2 приведена расчетная схема модели «пробкового» течения неньютоновской жидкости.

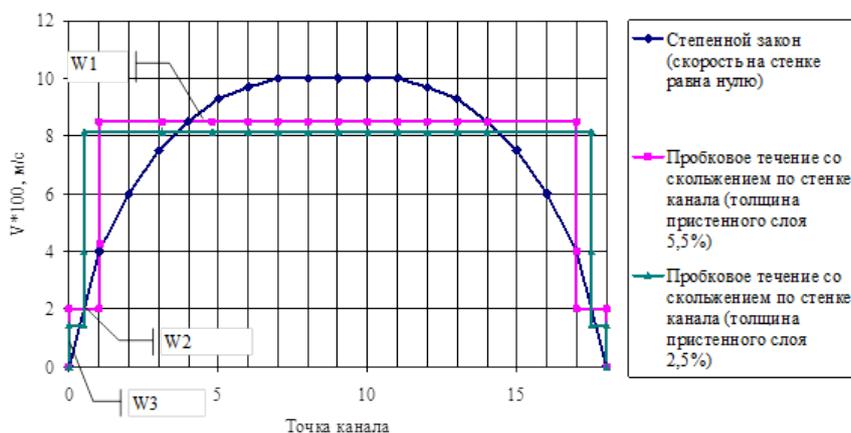


Рис. 1. Эпюры скоростей течения расплавов полимеров

В модели показано, что неньютоновская область течения формируется когда скорость релаксации V_r и скорость течения V_t близки, то есть макронеровности

не успевают релаксировать, но уже передвинулись на новый выступ, и здесь заметно уменьшается μ – длина линии, где соприкасаются молекулы центрального и пристенного слоев, поэтому наблюдается снижение вязкости.

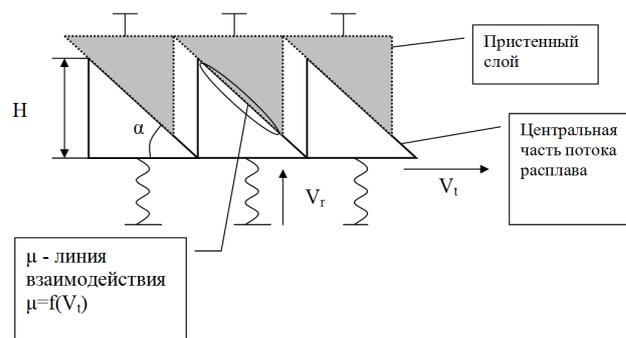


Рис. 2. Графическая интерпретация модели «пробкового» течения сжимаемой жидкости

3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является развитие методов расчета и анализа процессов переработки пластмасс с помощью различных моделей, описывающих полную реологическую кривую течения расплава полимера.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- определить погрешность прогнозирования вязкости такими моделями в максимально широком диапазоне скоростей сдвига;
- разработать метод расчета основных параметров течения расплава с помощью полной реологической модели;
- выполнить анализ процессов переработки, эффектов и технологических приемов экструзии на основе модели полной реологической кривой с учетом воздействия на пристенный слой.

4. Описание исследования погрешности прогнозирования вязкости

Реологические кривые HDPE (200 °С, Алатон ТМ7040) и PP (190 °С, CD460) в диапазоне скоростей сдвига $\dot{\gamma}$ от 10^{-2} до 10^4 взяты из [3].

Степенной закон позволяет рассчитывать течение на ограниченном участке кривой [2, 3], и охватывает область скоростей сдвига $\dot{\gamma}$ от 10^1 до 10^4 для PP, и от 10^2 до 10^4 для HDPE (рис. 3). Следует отметить, иногда указывается, что область скоростей сдвига, которые достаточно точно охватываются степенным законом, совпадает с характерной областью переработки полимеров от 10^0 до 10^4

[2], но при анализе конкретных характеристик, видно что переходная (линейная область в логарифмических координатах) значительно меньше, поэтому в данном исследовании степенной закон не рассматривался.

Модель Carreau выбрана для сравнительного анализа:

$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left(1 + (\lambda\dot{\gamma})^2\right)^{\frac{n-1}{2}}. \quad (1)$$

Параметры модели Carreau, для выбранных марок HDPE и PP, приведены в [3], но для охвата всего диапазона скоростей сдвига ($\dot{\gamma}$ от 10^{-2} до 10^6) и повышения точности аппроксимации, параметры модели Carreau скорректированы, вычисления проведены с применением пакета поиска решения Excel.

Модель Levanicheva:

В модели предусматривается «пробковое» течение, но для наглядности аппроксимации двумя моделями вместо скорости течения V_t [м/с] применяется скорость сдвига $\dot{\gamma}$ [1/с] и обычное понимание вязкости как сопротивление сдвиговому течению:

$$\mu = \frac{H}{\sin \alpha} - \frac{H}{\frac{\dot{\gamma}_r}{\dot{\gamma}^* \operatorname{tg} \alpha} + 1}. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет рассчитать константы вязкости и точки перехода между областями течения:

$$\text{– при низких скоростях сдвига } \mu_0 = \frac{H}{\sin \alpha}; \quad \dot{\gamma}_{t1} = \frac{\dot{\gamma}_r}{\operatorname{tg} \alpha};$$

$$\text{– при высоких скоростях сдвига } \mu_{\infty} = \frac{H}{\sin \alpha} - H;$$

$$\dot{\gamma}_{t2} = \frac{\dot{\gamma}_r}{\operatorname{tg} \alpha^* \left[\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right]}.$$

Для определения параметров модели, задаваясь значениями μ_0 и μ_{∞} , находим угол α по уравнению:

$$\sin(\alpha) = 1 - \frac{\mu_{\infty}}{\mu_0}. \quad (3)$$

Далее задаваясь значением $\dot{\gamma}_{t1}$, рассчитываем скорость релаксации $\dot{\gamma}_r$.

5. Результаты моделирования течения с помощью уравнения полной реологической кривой

Итоговые значения параметров моделей приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены расчетные значения в каждой анализируемой точке реологической кривой. Также приведено среднеквадратичное отклонение σ прогнозирования вязкости с применением двух рассматриваемых моделей (количество точек $n=6$).

Отметим следующую взаимосвязь двух моделей. Во-первых, близкие значения предельных значений вязкостей μ_0 и μ_{∞} . Во-вторых, скорости релаксации $\dot{\gamma}_r$ в модели Levanicheva обратно пропорциональны време-

ни релаксации λ в модели Carreau, причем отношение скоростей $\dot{\gamma}_r$ для двух полимеров имеет одинаковый порядок с отношением времен релаксации λ .

Таблица 1

Параметры моделей течения

Параметр		Материал		Описание
		HDPE	PP	
Угол взаимодействия	α , град	82,1	85,6	Model Leva- va – пара- метры
Скорость релаксации	$\dot{\gamma}_r$, 1/с	2732	102	
Высота взаимодействующих элементов (константа вязкости)	H, Па*с	1040	5035	Model Leva- va – расчет- ные значе- ния
Скорость течения, переход при низких скоростях	$\dot{\gamma}_{t1}$, 1/с	380	8	
Скорость течения, переход при высоких скоростях	$\dot{\gamma}_{t2}$, 1/с	39520	2679	
Вязкость при нулевой скорости течения	μ_0 , Па*с	1050	5050	
Вязкость при бесконечной скорости течения	μ_{∞} , Па*с	10	15	Model Carreau – параметры
Вязкость при нулевой скорости течения	μ_0 , Па*с	1100	4700	
Вязкость при бесконечной скорости течения	μ_{∞} , Па*с	10	1	
Индекс течения	n	0,3	0,39	
Время релаксации	λ , с	0,01	0,51	

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения вязкости по анализируемым моделям

Ско- рость сдвига	Вязкость, эксперимен- тальные и расчетные значения для PP			Вязкость, эксперименталь- ные и расчетные значения для HDPE		
	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹	$\mu_{\text{эксп}}$	Leva- nichev $\mu_{\text{расч}}$	Carreau $\mu_{\text{расч}}$	$\mu_{\text{эксп}}$	Leva- nichev $\mu_{\text{расч}}$
1,0E-02	–	5044	4700	–	1050	1100
1,0E-01	5000	4988	4696	1000	1050	1100
1,0E+00	4000	4489	4380	1000	1047	1100
1,0E+01	2000	2250	1720	950	1023	1096
1,0E+02	500	387	428	900	833	865
1,0E+03	100	55	106	400	296	227
1,0E+04	21,6	19	27	50	48	53
1,0E+05	–	15	7	–	14	19
1,0E+06	–	15	3	–	10	12
Среднеквад- ратичное откло- нение σ , Па*с		230	231	–	65	110

Модель Levanicheva имеет следующие преимущества:

- разработана на основе физической модели течения;
- дает меньшую погрешность;
- имеет меньше параметров;
- позволяет рассчитать точки перехода между областями течения и предельные значения вязкости;
- модель имеет универсальный характер, при угле $\alpha \approx 0$, моделируется ньютоновское течение, то есть сдвиг без релаксации;

– получаемая форма графика ближе к типичной S-образной форме кривой течения неньютоновской аномальной вязкой жидкости, которая приведена в [2, 11].

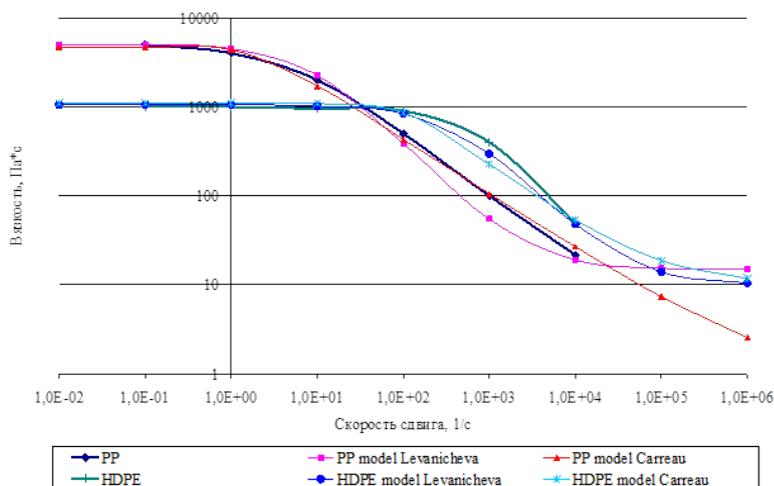


Рис. 3. Реологические характеристики HDPE и PP при различных температурах и аппроксимация уравнениями (1 и 2) с параметрами согласно табл. 1

6. Метод расчета каналов формующего оборудования

Понимание вязкости неньютоновской жидкости в модели «пробкового» течения отличается от общепринятого:

- высокая вязкость наблюдается по причине большой площади взаимодействия;
- наблюдаемое снижение вязкости – это уменьшение;
- сглаживание выступов, уплотнение расплава и уменьшение эффективной площади контакта.

Модель предполагает, что вязкость неразрывно связана с эффективной площадью взаимодействия.

В табл. 3 даны сравнительные параметры модели с общепринятым подходом, приведены формулы для пересчета параметров течения в трубном канале.

Уравнение (2) можно представить с применением параметров пристенной вязкости η и скорости V_t .

$$\eta = H_c \left[\frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\frac{V_t}{V_t * \text{tg} \alpha} + 1} \right]. \tag{4}$$

В этом случае упрощается анализ течения неньютоновской жидкости в полном диапазоне скоростей течения.

Скорость «пробкового» течения определяется производительностью и сечением канала:

$$V_t = \frac{Q}{S_c} = \frac{Q}{\pi R^2}. \tag{5}$$

Противодавление определяется силой вязкого трения F_t которая развивается в межфазном слое W2:

$$\Delta P = \frac{F_t}{S_c} = \frac{V_t \eta S_p}{S_c} = \frac{V_t \eta 2\pi R L}{\pi R^2} = \frac{V_t \eta 2L}{R} = \frac{Q \eta 2L}{\pi R^3}, \tag{6}$$

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.

Проведем анализ размерности пристенной вязкости:

$$\left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right] = \left[\frac{\text{давление}}{\text{скорость}} \right] = \left[\frac{\text{сила}}{\text{производительность}} \right]. \tag{7}$$

В таком понимании вязкость, как величина показывающая сопротивление течению, имеет выраженный физический смысл.

В табл. 4 приведены параметры модели «пробкового» течения для исследуемых реологических кривых. Расчет константы вязкости H_c и скорости релаксации V_r проведен для стандартного капилляра ($D=2,1$ мм, $L=8$ мм) по уравнениям: $\eta=3810 \cdot \mu$; $V_t = \gamma/3810$.

Таблица 3

Уравнения течения жидкости для капилляра (трубный канал) длиной L и радиусом R

Общепринятый подход, ньютоновская жидкость		Модель «пробкового» течения неньютоновской жидкости Levanicheva		Взаимосвязь параметров для капилляра (трубный канал)
Вязкость (эффективная вязкость для полимеров)	$\mu, [\text{Па} \cdot \text{с}]$	Пристенная вязкость	$\eta, \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right]$	$\eta = \frac{4\mu}{R}$
Скорость сдвига (кажущаяся или эффективная или средняя скорость сдвига для полимеров)	$\gamma, \left[\frac{1}{\text{с}} \right]$ $\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3}$	Скорость течения «пробки» расплава	$V_t, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$ $V_t = \frac{Q}{\pi R^2}$	$V_t = \frac{\gamma \cdot R}{4}$
Противодавление из за сдвигового течения жидкости	$\Delta P_n, [\text{Па}]$ $\Delta P_n = \frac{Q \mu 8L}{\pi R^4}$	Противодавление из-за прилипания (адгезии) «пробки» расплава к стенкам канала	$\Delta P_c, [\text{Па}]$ $\Delta P_c = \frac{Q \eta 2L}{\pi R^3}$	$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_c} = \frac{4\mu}{R\eta} = 1$ $\Delta P_n = \Delta P_c$
Напряжение сдвига	$\tau_n, [\text{Па}]$ $\tau_n = \frac{\Delta P_n R}{2L}$ $\tau_n = \mu \gamma$	Напряжение сдвига	$\tau_c, [\text{Па}]$ $\tau_c = \frac{\Delta P_c R}{2L}$ $\tau_c = \eta V_t$	$\tau_n = \tau_c$

Таблица 4

Параметры модели «пробкового» течения

Параметр		Model Levnicheva	
		HDPE	PP
Угол взаимодействия	α , град	82,1	85,6
Скорость релаксации	V_r , м/с	0,719	0,027
Высота взаимодействующих элементов (константа пристенной вязкости)	H_c , Па*с/м	3,97E+06	1,92E+07
Вязкость при нулевой скорости течения	η_0 , Па*с/м	4,01E+06	1,93E+07
Вязкость при бесконечной скорости течения	η_∞ , Па*с/м	3,82E+04	5,73E+04
Скорость течения, переход при низких скоростях	V_{t1} , м/с	0,1	0,0021
Скорость течения, переход при высоких скоростях	V_{t2} , м/с	10,4	0,705

7. Анализ процессов переработки, эффектов и технологических приемов экструзии

Многие проблемные явления в экструзии связаны с пристенным течением [1, 12]. Модель показывает, что в результате периодической релаксации макронеровностей расплава возникают колебания, причем их частота растет с повышением скорости течения. Можно предположить, что при их совпадении с частотой внутренних (температурных) колебаний возникает резонанс и наблюдается явление дробления поверхности экструдата или как его называют «акулья кожа» (“sharkskin”). То есть макронеровности резко увеличиваются в размере из-за резонанса. Таким образом объясняется почему снижение или повышение температур расплава устраняет эффект «акульей кожи», также режим супер-экструзии – работа при очень высоких скоростях сдвига, когда граница резонанса пройдена. Критическое напряжение сдвига $\tau_{кр}$, при котором наблюдается искажение поверхности, составляет $0,1 \div 0,4$ МПа [2], период пристенных колебаний расплава для рассматриваемых полимеров при достижении диапазона $\tau_{кр}$ составляет $10^{-5} - 10^{-8}$ с.

Предложенный метод расчета каналов и модель течения и позволяют изучать взаимодействие пристенного и центрального слоев. Характер образования пристенного слоя также интересен. Понятно, что существует его зависимость от коэффициента трения расплава по металлу и термостойкости полимера. Температура головки влияет двояко, с одной стороны увеличение температуры снижает вязкость на стенке канала и пристенный слой становится тоньше и ускоряется, с другой растет деструкция расплава и растут отложения на стенках. При уменьшении температуры процесс обратный, происходит увеличение вязкости, пристенный слой нарастает, но разложение расплава уменьшается, это улучшает стабильность пристенного слоя W3.

Проведем качественный анализ воздействия на пристенный слой W3. Согласно расчетной схемы

рис. 2, анализируется релаксация макронеровностей расплава которые в сечении представлены в виде треугольников, то есть рассчитывается изменение длины линии контакта при изменении скорости течения $\eta=f(V_t)$. Но если рассматривать поверхность канала и соответственно объемное течение, то необходимо вместо длины анализировать изменение площади поверхности соприкосновения сгустков макромолекул. В этом случае сила, воздействующая на пристенный слой W3, будет пропорциональна квадрату вязкости: $F_{W3} \propto \eta^2 * V_t$ или $F_{W3} \propto \mu^2 * \gamma$. Такая функция имеет экстремум (выпуклость) в первой точке перехода в области низких скоростей сдвига – V_{t1} (или γ_{t1}) [10]. То есть для каждого сечения канала и каждой реологической кривой существует оптимальная производительность, при которой воздействие на пристенный слой максимально эффективно. Такое изменение силы F_{W3} (то есть наличие экстремумов), объясняет, почему эффективная промывка экструзионных головок обеспечивается переменной скоростью течения расплава в головке (периодическим изменением производительности и/или давления экструдера в диапазоне min-max) [13].

Метод расчета требует дальнейшего развития, необходимо провести анализ течения для характерных каналов экструзионных головок. Параметры H , α , V_r характеризуют силу взаимодействия между слоями и зависят от молекулярного взаимодействия, температуры, разветвленности полимера, молекулярной массы, поэтому требуется дальнейшая привязка модели к молекулярным характеристикам полимера.

Также представляет интерес исследовать силу, действующую на пристенный слой, и рассчитать скорость движения слоев W3, W2, на основании опытных данных, их скорость в несколько раз меньше скорости центрального слоя W1 и сильно зависит от качества покрытия формирующего канала (тип материала, твердость, шероховатость).

8. Выводы

1. Современные процессы переработки пластмасс требуют применения моделей описывающих полную реологическую кривую.

2. Модель «пробкового» течения Levnicheva разработана на основе физической модели и более точно, по сравнению с эмпирическими моделями, аппроксимирует реологическую кривую в полном диапазоне скоростей течения расплава.

3. Разработан метод расчета основных параметров течения неньютоновской жидкости в полном диапазоне скоростей, который основан на анализе прилипания (адгезии) расплава к поверхности формирующего канала, предложена новая размерность для вязкости, как отношение давления к линейной скорости, и формулы пересчета слоистого течения в «пробковое».

4. Проведен анализ и дано качественное объяснение: эффекту неустойчивого течения расплава полимера “sharkskin” как области резонанса из-за совпадения частоты релаксационных колебаний в

пристенной области и внутренних (температурных) колебаний макромолекул; технологическому приему переменной скорости течения при промывках экструзионного оборудования, эффективность пере-

менной скорости промывки объясняется наличием оптимальной скорости течения, когда сила воздействующая на пристенный слой максимальна в области низких скоростей сдвига.

Литература

1. Раувендааль, К. Выявление и устранение проблем в экструзии [Текст] / К. Раувендааль; под ред. В. П. Володина; пер с англ. – СПб.: Профессия, 2008. – 328 с.
2. Раувендааль, К. Экструзия полимеров [Текст] / К. Раувендааль; под ред. А.Я. Малкина; пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
3. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / З. Тадмор, К. Гогос; пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
4. Hammarström, D. A Model for Simulation of Fiber Suspension Flows [Text] / D. Hammarström // KTH Mechanics, Royal Institute of Technology SE-10044 Stockholm, Sweden, 2004. – 125 p.
5. Виноградов, Г. В. Реология полимеров [Текст] / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М. Химия, 1977. – 434 с.
6. Дядичев, В. В. Методика описания реологии расплава полимера в широком диапазоне скоростей сдвига [Текст]: зб. наук. пр. ч. 2/ В. В. Дядичев, В. В. Леваничев, Т. М. Терещенко// Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: вид-во СХУ ім. В. Даля, 2003. – С. 68–72.
7. Weio, C. Effect of micro-viscosity and wall slip on polymer melt rheology inside micro-channel [Electronic resource] / C. Weio, S.Yaqlang, L. Chunqian, L. Qian, S.Changyu / Материалы конференции ANTEC, 2011. – Режим доступа: <http://www.plasticsengineering.org/polymeric/node/4897/>. – Загл. с экрана.
8. Hatzikiriakos, S. G. Wall slip of molten high density polyethylene [Electronic resource] / S. G. Hatzikiriakos, J. M. Dealy // Department of Chemical Engineering, McGill University, 1991. – Available at: http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/cm4655/Hatzikiriakos_Dealy.pdf/. – Title from the screen.
9. 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/eejet/article/view/16685/14175>
10. Levanichev, V. Study of multi-layer flow in coextrusion processes [Text] / V. Levanichev // ТЕКА Commission of motorization and power industry in agriculture. – 2014. – Vol. 14, Issue 1. – P. 144–153. – Available at: http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot14_1/Teka_14_1.pdf
11. Тарер, А. А. Физико-химия полимеров [Текст] / А. А. Тарер; изд. 4-е. – М.: Научный мир. 2007. – 576 с.
12. Brian Black, W. Wall slip and boundary effects in polymer shear flows [Electronic resource] / W. Brian Black. – A dissertation at the University of Wisconsin – Madison, 2000. – Available at: http://grahamgroup.che.wisc.edu/pub/black_dissert.pdf
13. Disco purge procedure for extrusion coaters [Electronic resource] / Official site of company Du Pont, 2010. – Available at: http://www2.dupont.com/Nucrel/en_US/assets/downloads/disco_purge.pdf