

Библиографический список

1. Официальный сайт ООО «Алтайский геофизический завод» [электронный ресурс] URL: <https://www.agfz.ru/>
2. Документация MAX30003 [электронный ресурс] URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30003.pdf>
3. Документация ADS1293 [электронный ресурс] URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/ads1293>
4. Документация ADS1298 [электронный ресурс] URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1298.pdf>
5. Пользовательский гайд по архитектуре SPI [электронный ресурс] URL: <https://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf>
6. Документация MCP2210 [электронный ресурс] URL: <https://ru.mouser.com/datasheet/2/268/22288A-79829.pdf>
7. Документация по STM32F103C8 [электронный ресурс] URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>
8. Документация по ATmega328 [электронный ресурс] URL: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328>
9. Репозиторий библиотеки usb-serial-for-android [электронный ресурс] URL: <https://github.com/mik3y/usb-serial-for-android>
10. Medical electrical equipment - Part 2-25: Particular requirements for the basic safety and essential performance of electrocardiographs, IEC 60601-2-25:2011 [электронный ресурс] URL: <https://webstore.iec.ch/publication/2636>

УДК 579.64

**Структурно-феноменологическая реологическая
модель для инженерных расчетов течений полимерных
сред**

А.А. Лаас¹, Г.О. Рудаков²

¹*Алтайский государственный университет, Барнаул,
проспект Ленина, 61*

²*Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, Барнаул, проспект Ленина, 46*

Широкое внедрение полимеров и продуктов на их основе в повседневной практике приводит к увеличению внимания к их производству и переработке. Спрос на полимерные материалы объясняется легкостью их переработки, а также уникальными

свойствами, такими как эластичность, прочность, гибкость и хорошие электроизоляционные свойства. Более того, эти свойства нельзя объяснить только химическим составом сырья. Определяющим фактором является цепная структура молекулы полимера. Как известно, одной из важных проблем, стоящих перед учеными, является вопрос снижения затрат при производстве и переработке. Эффективным решением этой проблемы является возможность оптимизации технологических процессов, которую невозможно выполнить без математической модели поведения полимерных сред в различных условиях деформации. Работа с такими моделями значительно усложняется необходимостью учета нелинейных эффектов при рассмотрении течений полимерных расплавов и жидкостей. Таким образом, формулировка реологического определяющего соотношения, которое устанавливает связь между кинематическими характеристиками потока и внутренними термодинамическими параметрами играет важную роль при описании течений растворов и расплавов линейных полимеров.

В силу особенностей строения полимерные материалы обладают уникальными свойствами: способностью к большим необратимым деформациям в состоянии высокоэластичности; твердостью и текучестью в зависимости от времени (частоты) деформирования.

Ранее была сформулирована модель mVP (модифицированная модель Виноградова-Покровского) [1], которая хорошо описывает вискозиметрические функции. Она имеет вид:

$$\sigma = -p \cdot I + \frac{3\eta_0}{\tau_0} \left(a - \frac{1}{3} tr a \cdot I \right) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} a - \nabla v \cdot a - a(\nabla v)^T + \frac{1+(\kappa-\beta)tr a}{\tau_0} a = \frac{2}{3} \gamma - 3 \frac{\beta}{\tau_0} a \cdot a \quad (2)$$

Тензор a зависят от ∇v и t . Представим a в виде, выделив стационарную часть:

$$a(\nabla v; t) = s(\nabla v) + \varepsilon(\nabla v; t), \quad (3)$$

где a меняя на s получаем:

$$\frac{1+(\kappa-\beta)tr s}{\tau_0} s = \frac{2}{3} \gamma + \nabla v \cdot s + s(\nabla v)^T - 3 \frac{\beta}{\tau_0} s \cdot s \quad (4)$$

и, следовательно, получим:

$$\frac{d}{dt} \varepsilon - \nabla v \cdot \varepsilon - \varepsilon(\nabla v)^T + \frac{1+(\kappa-\beta)tr s}{\tau_0} \varepsilon = -3 \frac{\beta}{\tau_0} (a \cdot \varepsilon + \varepsilon \cdot a) \quad (5)$$

В (5) опущены слагаемые пропорциональные $\varepsilon \cdot \varepsilon$, так как считаем ε малой величиной. Перепишем (4) в виде аналога:

$$\frac{1+(\kappa_0 D)^{n_0}}{\tau_0} s = \frac{2}{3} \gamma + \tau_0 \cdot \sigma_1(D) (\omega \cdot \gamma + \gamma \cdot \omega^T) + \tau_0 \cdot \sigma_2(D) \gamma \cdot \gamma, \quad (6)$$

где $D = (\tau_0)^2 tr (\gamma \cdot \gamma)$. Тогда (1), (3), (5), (6) – новая реологическая модель. Назовем ее структурно-феноменологической реологической

моделью (SPRM). Эта модель удовлетворяет принципу материальной объективности Олдройда [2]. Если продолжить уравнение, то можно записать:

$$\frac{d}{dt} a + \frac{1+(\kappa_0 \cdot D)^{n_0}}{\tau_0} a = \frac{2}{3} \gamma + \tau_0 \cdot \sigma_1(D)(\omega \cdot \gamma + \gamma \cdot \omega^T) + \tau_0 \cdot \sigma_2(D) \gamma \cdot \gamma \quad (7)$$

Система уравнений (1)-(7) – аналог SPRM, который назовем SPAR моделью. Следует ожидать, что SPAR модель будет успешно использована при проведении инженерных расчетов течений полимерных жидкостей.

Таким образом, на основе SPAR модели были рассчитаны стационарные вискозиметрические функции и исследовано влияние параметров модели на вид этих зависимостей: стационарная сдвиговая вязкость, коэффициент первой разности нормальных напряжений и стационарная вязкость при одноосном растяжении, имеющие вид:

$$\eta(s) = \frac{\eta_0}{1+(\kappa_0 \cdot s^2/2)^{n_0}} \quad (8)$$

$$\psi_1(s) = \frac{2\eta_0 \tau_0}{1+(\kappa_1 \cdot s^2/2)^{n_1}} \quad (9)$$

$$\lambda(s) = \frac{3\eta_0}{1+(\kappa_0 \frac{3}{2} s^2)^{n_0}} \left(1 + \frac{(1-\beta) \cdot s}{1+(\kappa_2 \frac{3}{2} s^2)^{n_2}}\right), \quad (10)$$

где $s = \tau_0 \nu_{12}$ – безразмерная скорость сдвига.

Из выражений (8)–(10) видно, что реологическое поведение системы характеризуется параметрами κ_0 , n_0 , κ_1 , n_1 , κ_2 , n_2 , подбор которых легко осуществить путем сопоставления расчетных зависимостей сдвиговой вязкости, коэффициента первой разности нормальных напряжений и элонгационной вязкости с экспериментальными данными. Причем параметры κ_0 , n_0 определяются при сравнении сдвиговой вязкости. Параметры κ_1 и n_1 при сравнении с коэффициентом первой разности нормальных напряжений, а параметры κ_2 , n_2 и β при сравнении с элонгационной вязкостью. Также из (8)–(10) можно сделать вывод, что $\eta(s)$ и $\psi_1(s)$ – убывающие функции скорости сдвига, $\lambda(s)$ демонстрирует немонотонную зависимость, сначала вязкость при растяжении является возрастающей функцией скорости растяжения, а затем, после перехода через максимум, убывает.

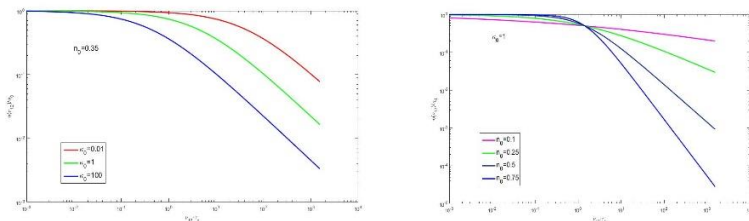


Рис. 1. Влияние параметра модели κ_0 на сдвиговую вязкость

Рис. 2. Влияние параметра модели n_0 на сдвиговую вязкость

Влияние параметров модели κ_1 и n_1 на коэффициент первой разности нормальных напряжений согласно формулам аналогично влиянию параметров модели κ_0 и n_0 на сдвиговую вязкость.

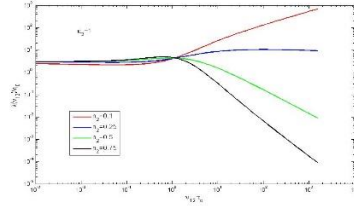
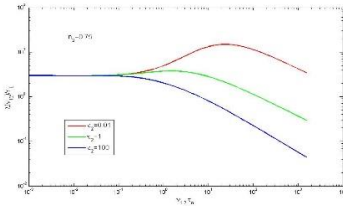


Рис. 3. Влияние параметра модели κ_2 на разность при растяжении

Рис. 4. Влияние параметра модели n_2 на разность при растяжении

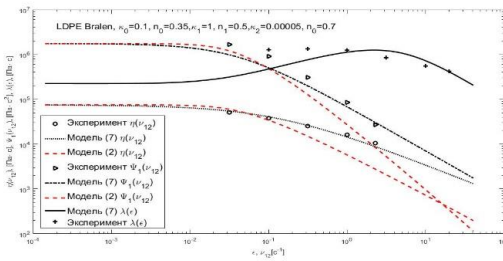


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей сдвиговой вязкости, вязкости при растяжении и коэффициента первой разности нормальных напряжений

Из рисунков видно, что модель (1)–(7) с достаточной точностью описывает аномалию сдвиговой вязкости и немонотонную зависимость элонгационной вязкости. На последнем рисунке приведено сравнение экспериментальных зависимостей для промышленного образца полиэтилена Bralen [3] с теоретическими, выявлено хорошее согласование между ними. На этом рисунке точками обозначены экспериментальные данные, черными кривыми обозначены результаты расчета по новой модели (7), (8), красные кривые относятся к расчетам по mVP модели. В итоге, за счет подборов коэффициентов κ_0 , κ_1 , κ_2 и n_0 , n_1 , n_2 можно достаточно хорошо описывать вискозиметрические функции.

Таким образом, продемонстрирована возможность проведения инженерных расчетов течений полимерных сред на основе аналога структурно-феноменологической модели (1), (2). Полученная модель позволяет достаточно точно описывать стационарные и

нестационарные характеристики расплавов разветвленных полимеров. При этом следует ожидать, что полученная здесь модель окажется пригодной и для концентрированных растворов и расплавов линейных полимеров. В дальнейшем предполагается использовать эту SPAR модель для проведения более сложных расчетов.

Библиографический список

1. Макарова М.А., Малыгина А.С., Пышнограй Г.В., Рудаков Г.О. Моделирование реологических свойств расплавов полиэтиленов при их одноосном растяжении// Вычислительная механика сплошных сред, 2020, Т. 13, №1, С. 73-82.

2. J.G. Oldroyd, On the formulation of rheological equations of state, Proc R Soc. A 200 (1950) С. 523-541.

3. Pivokonsky R., Filip P., Zelenkova J. (2017). Two Ways to Examine Differential Constitutive Equations: Initiated on Steady or Initiated on Unsteady (LAOS) Shear Characteristics, Polymers № 9. С. 205.

УДК 004

Разработка модуля «Матричный калькулятор» для автоматизации решения математических задач

Д.В. Паршин¹, Л.С. Паришина²

¹АО «Почта России», г. Москва; ²РИ (филиал) АлтГУ, г. Рубцовск

В статье рассматривается разработка на языке C# с использованием библиотеки MathNet.Numerics модуля «Матричный калькулятор», который используется для расчёта характеристик матрицы. Описаны объект, предмет, цель и задачи исследования. Данный модуль может быть использован в учебном процессе студентами и преподавателями.

Ключевые слова: *матричный калькулятор, разработка, математическое моделирование, модель.*

В Рубцовском институте (филиале) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного университета» матрицы используются для решения задач во многих дисциплинах: «Численные методы», «Методы оптимизации», «Линейная алгебра». Практические и лабораторные занятия в ВУЗе занимают большой объём часов, поэтому необходимо предоставить учащимся разностороннее изучение процесса. Для обеспечения эффективности образовательного процесса необходимо