

УДК 532.135

**Анализ соотношений нелинейной вязкоупругости  
полимерных материалов  
при их больших периодических деформациях**

*Н.А. Чернакова  
АлтГТУ, г. Барнаул*

Анализ вязкоупругих свойств различных материалов при наложении больших периодических деформаций относится к важнейшим и наиболее распространенным способам характеристики этих веществ.

На основе модифицированной реологической модели Виноградова-Покровского, были выполнены численные расчёты, наложения периодических деформаций с большой амплитудой на течения полимерных жидкостей. Особенностью этой модели является учет тензорного характера коэффициента трения бусинок, который определен наведенной анизотропией сдвигового потока. Данная модель имеет вид [1–2]:

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + 2\eta_1\gamma_{ik} + 3\frac{\eta_0}{\tau_0}a_{ik};$$

$$\frac{d}{dt}a_{ik} - v_{ij}a_{jk} - v_{kj}a_{ji} + \frac{1+(\kappa-\beta)I}{\tau_0}a_{ik} = \frac{2}{3}\gamma_{ik} - 3\frac{\beta}{\tau_0}a_{ij}a_{jk}.$$

Здесь  $\sigma_{ik}$  – тензор напряжений;  $p$  – гидростатическое давление;  $\eta_0$  и  $\tau_0$  – начальные значения сдвиговой вязкости и времени релаксации для полимерной составляющей;  $\eta_1$  – остаточная сдвиговая вязкость, учитывающая наличие растворителя;  $v_{ik}$  – тензор градиентов скорости;  $a_{ik}$  – симметричный тензор анизотропии второго ранга;  $I = a_{jj}$  – первый инвариант тензора анизотропии;  $\gamma_{ik} = (v_{ik} + v_{ki})/2$  – симметризованный тензор градиентов скорости;  $\kappa, \beta$  – феноменологические параметры модели, учитывающие в уравнениях динамики макромолекулы размеры и форму молекулярного клубка [1]. Отметим, что значения параметров  $\kappa$  и  $\beta$  не являются независимыми  $\kappa = 1,2\beta$ , что соответствует условию независимости асимптотического поведения стационарной сдвиговой вязкости от молекулярного веса полимера.

С помощью модифицированной реологической модели Виноградова-Покровского было проведено моделирование колебаний как с большой, так и с малой амплитудой. При исследовании предполагалось, что образец подвергался деформациям с частотой  $\omega$  по гармоническому закону с заданной большой амплитудой  $\gamma_0$ :  $\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t)$ . Отклик материала представляет собой зависимость напряжения от

времени. При малой амплитуде возникающие в материале напряжения прямо пропорциональны деформации. Отклик при периодическом деформировании материала с большой амплитудой уже не является правильной гармоникой. Это подтверждается как результатами моделирования (рисунок 1), а также экспериментами.

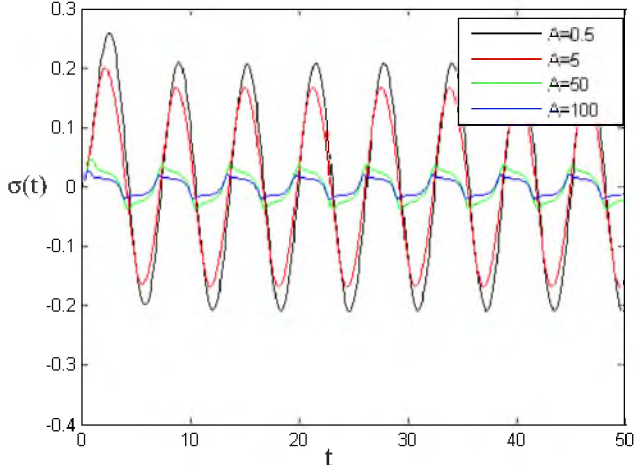


Рисунок 1 – Изменение отклика материала при увеличении амплитуды деформирования материала

При исследовании поведения материала при больших деформациях, была получена нелинейность вязкоупругих свойств, которую можно интерпретировать, с помощью построения фигур Лиссажу. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод об увеличении нелинейности отклика образца при увеличении амплитуды колебаний.

Для линейного вязкоупругого поведения фигуры Лиссажу являются эллипсами, а при нелинейном отклике образца преобразуются в фигуры различной формы [3].

На рисунке 2 представлены фигуры Лиссажу, при различных амплитуде и частоте. Нелинейность механического поведения при больших деформациях отражается в неэллиптичности фигур Лиссажу.

В ходе сравнительного анализа полученных результатов с известными ранее экспериментальными и теоретическими данными [4], можно сделать вывод, что модель позволяет достаточно точно описать поведение полимерных материалов при наложении больших периодических деформаций.

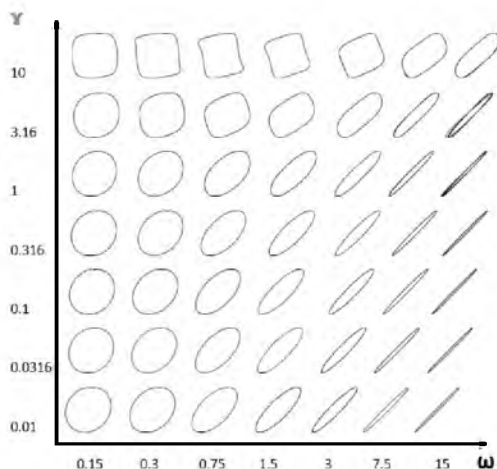


Рисунок 2 – Изменение фигур Лиссажу при увеличении амплитуды, при различной частоте колебаний

### Библиографический список

1. Головичева И.Э., Зинович С.А., Пышнограй Г.В. Влияние молекулярной массы на сдвиговую и продольную вязкость линейных полимеров // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, №2 (240). – С. 154–160.
2. Гусев А.С., Пышнограй Г.В. Частотные зависимости динамических характеристик линейных полимеров при простом сдвиге // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 236–245.
3. Ильин С.О., Малкин А.Я., Куличихин В.Г. Применение метода высокоамплитудных гармонических воздействий для анализа свойств полимерных материалов в нелинейной области механического поведения // Высокомолекулярные соединения. Серия А, 2014. – Т. 56, №1. – С. 99–112.
4. Randy H. Ewoldt, A.E. Hosoi, and Gareth H. McKinley New measures for characterizing nonlinear viscoelasticity in large amplitude oscillatory shear (LAOS) // Hatsopoulos Microfluids Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139.