

УДК 541. 182. 022: 532. 135

*Е. А. Кирсанов, Ю. Н. Тимошин*

## НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ. IX. УПРУГОСТЬ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ

Московский государственный областной социально-гуманитарный институт,  
Коломна, Московская область. E-mail: Kirsanov47@mail.ru

*Предложена структурная реологическая модель для описания упругих свойств растворов полимеров при стационарном течении. Используется новое уравнение для первой разности нормальных напряжений  $N_1$ . Это уравнение упругости аналогично обобщенному уравнению течения и описывает экспериментальную зависимость  $N_1(\dot{\gamma})$  в области высоких скоростей сдвига. Первое слагаемое представляет собой структурную часть упругости, обусловленную ассоциатами макромолекул. Вторая часть описывает собственную упругость отдельных макромолекул. Структурная реологическая модель предсказывает линейную зависимость  $N_1$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  в области низких скоростей сдвига. Экспериментальные результаты демонстрируют зависимость  $N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1$ , причём величина  $\Delta N_1$  может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Появление в этом уравнении величины  $\Delta N_1$  может быть обусловлено систематической ошибкой при измерении упругой силы. Известные реологические модели предсказывают другое поведение величины  $N_1$ , а именно, квадратичную зависимость.*

**Ключевые слова:** вязкоупругие системы, растворы полимеров, структурная реологическая модель, первая разность нормальных напряжений, уравнение упругости.

*Е. А. Kirsanov, Yu. N. Timoshin*

## NON-NEWTONIAN FLOW OF STRUCTURED SYSTEMS. IX. THE ELASTICITY OF POLYMER SOLUTIONS

Moscow State Region Socio-Humanitarian Institute  
Kolomna, Moscow Oblast. E-mail: Kirsanov47@mail.ru

*The structural rheological model to describe the elastic properties of polymer solutions under steady state flow is proposed. The new equation is used for the first normal stress difference  $N_1$ . This equation of elasticity similar to generalized flow equation and describes experimental dependence  $N_1(\dot{\gamma})$  at high shear rates. The first term is a structural part of the elasticity due to associates of macromolecules. The second part describes the own elasticity of individual macromolecules. Structural rheological model predicts a linear dependence  $N_1$  of the shear rate  $\dot{\gamma}$  at low shear rates. Experimental results demonstrate the dependence  $N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1$ , and the magnitude  $\Delta N_1$  can have both positive and negative. Appearance in this equation values  $\Delta N_1$  may be due to a systematic error in the measurement of the elastic forces. Popular rheological models predict different behavior of  $N_1$ , namely, the quadratic dependence.*

**Key words:** viscoelastic systems, polymer solutions, structural rheological model, first normal stress difference, equation of elasticity.

### Введение

Известно [1], что структурные теории вязкости развивались начиная с первых работ, где описывался эффект понижения эффективной вязкости с увеличением скорости сдвига. Еще В. Оствальд называл нелинейную часть кривой течения «структурной ветвью», а эффективную вязкость, зависящую от скорости сдвига, – «структурной вязкостью». В растворах и расплавах полимеров пространственная структура обусловлена зацеплениями макромолекул и их различной взаимной ориентацией. Разрушение структуры под действием сдвигового течения приводит к уменьшению вязкости системы.

В то же время упругие свойства объясняются преимущественно в рамках теоретической реологии [2–4], т. е. на основе механики сплошных сред. Для описания реологического поведения материалов используют механические модели, для которых составляют дифференциальные уравнения, куда входят различные комбинации упругих и вязких характеристик. В стационарном сдвиговом течении упругие свойства проявляются в виде нормальных напряжений.

Обычно рассматривают [3] три материальные функции: вязкость  $\eta(\dot{\gamma})$ ; первый и второй коэффициенты нормальных напряжений  $\Psi_1(\dot{\gamma})$  и  $\Psi_2(\dot{\gamma})$ . Напряжение сдвига и разности нормальных напряжений связаны со скоростью сдвига следующими уравнениями:  $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$ ;  $N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} = \Psi_1(\dot{\gamma})\dot{\gamma}^2$ ;  $N_2 = \tau_{22} - \tau_{33} = \Psi_2(\dot{\gamma})\dot{\gamma}^2$ . Различные теории приводят к разнообразным конститутивным уравнениям неньютоновского течения, начиная с классической механической модели Максвелла вплоть до моделей Олдройда, Гиекса и многих их модификаций. В качестве примера приведем выражения материальных функций, полученные в теории Берда и Карро:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\eta_p}{1 + (\lambda_{1p}\dot{\gamma})^2};$$

$$\Psi_1(\dot{\gamma}) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{2\eta_p\lambda_{2p}}{1 + (\lambda_{1p}\dot{\gamma})^2};$$

$$\Psi_2(\dot{\gamma}) = -\varepsilon \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\eta_p\lambda_{2p}}{1 + (\lambda_{1p}\dot{\gamma})^2}.$$

Выбирая достаточное число слагаемых, в этих суммах можно получить достаточно хорошее сходство теории с экспериментом.

Тем не менее упругое поведение свойственно растворам и расплавам полимеров, мицеллярным растворам с «червеобразными мицеллами», эмульсиям, т. е. системам, где единицы течения сами способны к упругим деформациям.

Измерение первой разности нормальных напряжений  $N_1 = \tau_{11} - \tau_{22}$  производят обычно в ротационном вискозиметре с системой «конус–плоскость».

В вязкоупругих жидкостях возникает сила, действующая вдоль оси вращения и стремящаяся увеличить зазор между конусом и плоскостью [2]:

$$F = \frac{\pi a^2}{2} \left[ N_1 - \frac{\rho(a\omega)^2}{6} \right],$$

откуда рассчитывают величину  $N_1$ , учитывая инерционные силы, связанные с угловой скоростью вращения  $\omega$ .

Было отмечено [5], что при малых значениях скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  измерения затруднены, однако теория предполагает для очень малых значений  $\dot{\gamma}$  существование квадратичной зависимости  $N_1 = \Psi_1(0)\dot{\gamma}^2$ , где  $\Psi_1(0)$  – постоянная положительная величина.

Сравнение [6] упругих свойств растворов полимеров с жесткими и гибкими макромолекулами привело к неожиданному результату: при практически одинаковой вязкости резко различаются упругие свойства. Автор статьи [6] выразил это следующими словами: тем из нас, кто воспитан на диете механики сплошных сред, можно простить убеждение, что упругая жидкость есть упругая жидкость, как бы отделенная от микроструктуры. Убежденность может поколебаться, только когда фактические реологические эксперименты выполнены на системах, имеющих разную микроструктуру.

Успешное применение обобщенного уравнения течения [7, 8] для описания неньютоновской вязкости растворов полимеров [9] стимулирует попытку интерпретировать упругие свойства с помощью структурной реологической модели.

### 1. Структурная модель упругости при стационарном течении

Структурная реологическая модель [7] позволила получить обобщенное уравнение течения

$$\tau^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} \dot{\gamma}^{1/2} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}, \quad (1)$$

где коэффициент  $\tau_c^{1/2}$  характеризует степень агрегации системы, коэффициент  $\eta_c^{1/2}$  описывает вязкость при обтекании отдельных частиц вязкой дисперсионной средой, коэффициент  $\chi$  выражает соотношение между скоростью спонтанного разрушения агрегата и скоростью разрушения агрегата в сдвиговом течении под действием растягивающих гидродинамических сил. В то же время коэффициент  $\chi$  связан с характером упаковки частиц в отдельном агрегате и стремится к нулю, если возникает сплошная сетка частиц.

Введем уравнение для параметра упругости, а именно для первой разности нормальных напряжений  $N_1 = \tau_{11} - \tau_{22}$ , предполагая аналогию между  $N_1$  и напряжением сдвига  $\tau$ . Поскольку уравнение для вязкости [7] можно представить в виде

$$\tau^{1/2} = \eta_\infty^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} + BN_2 \dot{\gamma}^{1/2}, \quad (2)$$

то, соответственно, для нормальных напряжений запишем

$$N_1^{1/2} = n_1^{1/2}(\infty) \dot{\gamma}^{1/2} + DN_2 \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь  $D$  и  $B$  – постоянные величины, не зависящие от скорости сдвига,  $N_2$  – количество макромолекул, объединенных в ассоциаты. Относительное число ассоциированных макромолекул определяется уравнением [7]:

$$\frac{N_2}{N} = \frac{\tilde{k}_2}{\tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2} + \tilde{k}_0}, \quad (4)$$

где  $N$  – полное число макромолекул в единице объема,  $\tilde{k}_2$  – константа скорости формирования ассоциатов,  $\tilde{k}_0$  – константа скорости спонтанного разрушения ассоциатов,  $\tilde{k}_1$  – константа скорости разрушения ассоциатов (разрыва зацеплений) под действием растягивающих гидродинамических сил. После подстановки (4) в (3) получим уравнение

$$N_1^{1/2} - n_1^{1/2}(\infty) \dot{\gamma}^{1/2} = DN_2 \dot{\gamma}^{1/2} = \frac{DN\tilde{k}_2}{\tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2} + \tilde{k}_0} \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (5)$$

Учитывая [7], что  $\tau_c^{1/2} = BN(\tilde{k}_2 / \tilde{k}_1)$ , а  $\chi = \tilde{k}_0 / \tilde{k}_1$ , можно получить уравнение для первой разности нормальных напряжений

$$N_1^{1/2} = \frac{(D/B)\tau_c^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} \dot{\gamma}^{1/2} + n_1^{1/2}(\infty) \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (6)$$

Первое слагаемое представляет собой структурную часть упругости, обусловленную ассоциатами макромолекул; вторая часть описывает собственную упругость отдельных макромолекул. Величина коэффициента  $\chi$  указывает на компактность или рыхлость ассоциатов макромолекул и в общем должна быть близка к аналогичному коэффициенту в обобщенном уравнении течения [7, 8].

Для краткости обозначим «структурный» коэффициент упругости как  $n_{ST} = (D/B)\tau_c^{1/2}$  и «молекулярный» коэффициент упругости как  $n_\infty = n_1^{1/2}(\infty)$ .

Таким образом, уравнение для нормальных напряжений приобретает вид, сходный с обобщенным уравнением течения:

$$N_1^{1/2} = \frac{n_{ST}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} \dot{\gamma}^{1/2} + n_\infty \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (7)$$

Будем называть это уравнение обобщенным уравнением упругости. Рассмотрим возможность применения этого уравнения для описания неньютонского течения растворов полимеров.

### 2. Течение растворов полимеров

Рассмотрим вязкое и упругое поведение при стационарном сдвиговом течении водного раствора полиакриламида [6]. Кривая течения  $\tau(\dot{\gamma})$  и кривая упругости  $N_1(\dot{\gamma})$ , показанные на рис. 1, а, явно не подчиняются степенному закону, хотя для описания реологического поведения вязкости и упругости на интервале высоких скоростей сдвига обычно используют степенной закон [10].

Аппроксимация с помощью уравнений (1) и (7) представлена на рис. 1, б.

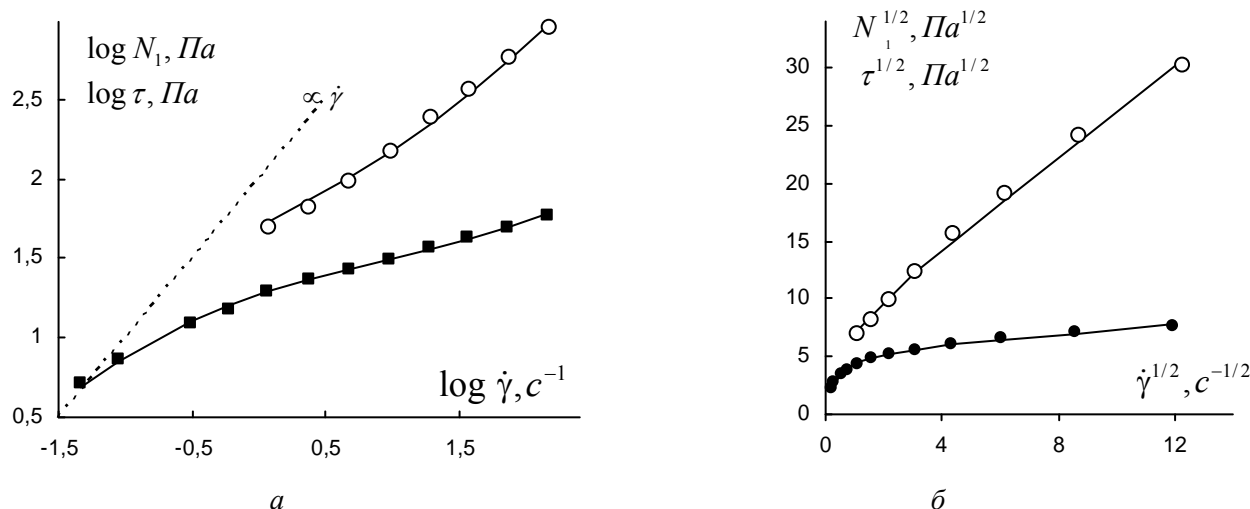


Рис. 1. Реологическое поведение 2 %-го водного раствора полиакриламида:

$a$  – зависимость напряжения сдвига (квадраты) и первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах;  $b$  – кривая течения и кривая упругости в корневых координатах. Пунктирная линия соответствует линейной зависимости измеренной величины от скорости сдвига. Данные из работы [6]

Выражения суммы квадратов разностей:  $СКР = \sum (\tau^{1/2} - \tau_{расч}^{1/2})^2$  и  $СКР = \sum (N_1^{1/2} - N_{1расч}^{1/2})^2$  обеспечивают наибольшее сходство теоретических и экспериментальных величин в области высоких скоростей сдвига (рис. 1,  $a$ ,  $b$ , сплошная линия). Коэффициенты уравнений вязкости и упругости представлены в таблице. При этом значение коэффициента  $\chi$ , полученное из данных по вязкости, использовано при расчете упругих свойств.

Нужно отметить, что само существование уравнений (1) и (7) предполагает постепенное разрушение агрегатов частиц (или ассоциатов мак-

ромолекул) по мере увеличения скорости сдвига.

При низких скоростях сдвига растворы полимеров демонстрируют ньютоновское течение при неизменной структуре, в которой размеры агрегатов или ассоциатов слишком малы для разрушения гидродинамическими силами. В общем аналогичное поведение можно предположить для упругих свойств, тогда нормальные напряжения будут описываться линейной зависимостью от скорости сдвига:  $N_1 = n_0 \dot{\gamma}$ , где  $n_0$  – постоянный коэффициент, аналогичный ньютоновской вязкости  $\eta_N$ .

#### Реологические характеристики растворов полимеров, вязкость и первая разность нормальных напряжений (система СИ)

Раствор полимера	$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	$\chi$	$\eta^{1/2}(0)$	$n_{ST}$	$n_\infty$	$\chi$
2% полиакриламид	5,53	0,20	0,337	16,6	6,74	1,97	0,337*
1,2% полиакриламид (Separan)	4,60	0,154	1,69	2,88	6,80	0,209	4,66
2% полиакриламид (Separan AP-30)	5,00	0,250	0,566	9,08	6,24	1,39	0,566*
3% полистирол в толуоле	-	-	-	-	11,5	0,123	1,87
3% полиэтиленоксид	6,26	1,06	0,203	31,9	14,4	2,79	0,626
3% полиэтиленоксид (с поправкой)	6,26	1,06	0,203	31,9	13,3	3,01	0,469

Звездочкой отмечено значение коэффициента  $\chi$ , которое взято из расчета вязкости и использовано при расчете разности нормальных напряжений.

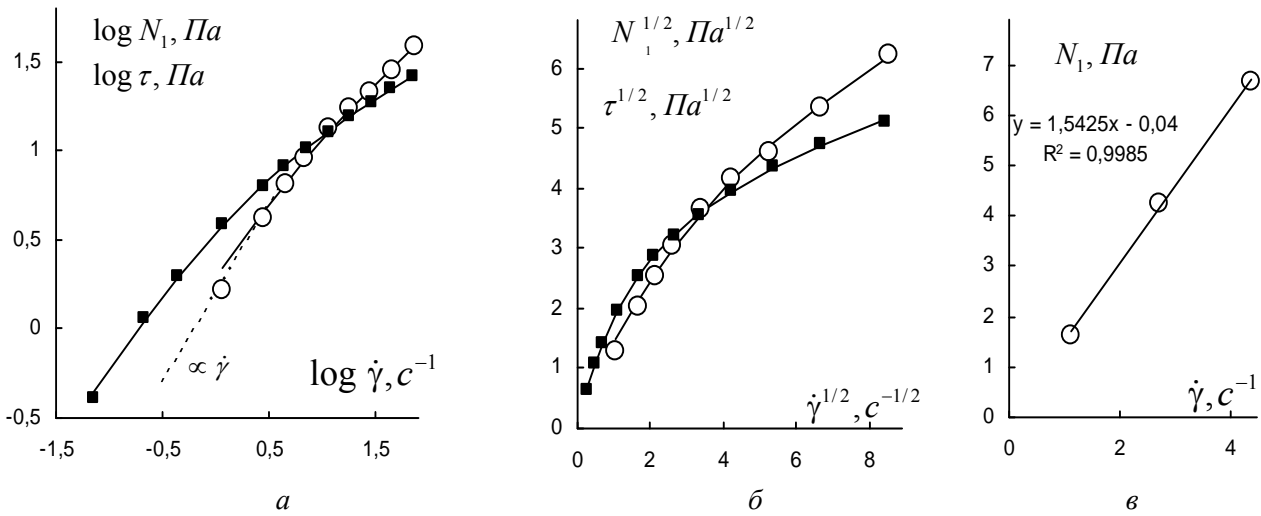


Рис. 2. Реологическое поведение 1,2 %-го водного раствора полиакриламида (Separan): *a* – зависимость напряжения сдвига (квадраты) и первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая течения и кривая упругости в корневых координатах, *в* – кривая упругости в линейных координатах при низких скоростях сдвига. Пунктирная линия соответствует линейной зависимости измеренной величины от скорости сдвига. Данные из работы [11]

Рассмотрим вязкое и упругое поведение другого образца водного раствора 1,2 %-го полиакриламида (Separan) при 30 °С [11]. Расчет показал, что в данном случае коэффициенты  $\chi$  для вязкого и упругого поведения должны быть различны, хотя и имеют один порядок величины (табл.). Более важно то, что экспериментальные значения в районе низких скоростей «уходят» с теоретической кривой упругости (рис. 2, *a, б*), но с хорошей точностью описываются прямой в линейных координатах (рис. 2, *в*). Таким образом, при низких скоростях уравнение для нормальных напряжений принимает вид

$$N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1. \quad (8)$$

Здесь величина  $\Delta N_1 = -0,04 Pa$ , что можно считать систематической ошибкой эксперимента, связанной с ошибкой при установке нуля в измерениях упругой силы.

Образец водного раствора полиакриламида (Separan AP-30) с концентрацией 2 % использован в книге [12] как пример типичного реологического поведения раствора полимера. На рис. 3, *a* представлена кривая течения и кривая упругости, открытые кружки отмечают данные, не включенные в аппроксимацию уравнением (7).

Эти данные показаны отдельно в линейных координатах на рис. 3, *б*. Видна хорошая линейная

зависимость вида (8), где  $\Delta N_1 = +0,2209 Pa$ . В корневых координатах (рис. 3, *в*) показана аппроксимация участка высоких скоростей сдвига уравнением (7). В таблице даны значения коэффициентов для уравнений, описывающих вязкость и упругость. В приведенных координатах (рис. 3, *з*) уравнение тренда позволяет непосредственно получить значения  $n_{ST} = 6,11 (Pa)^{1/2}$  и  $n_\infty = 1,43 (Pa \cdot c)^{1/2}$ , близкие к значениям в таблице.

В книге [12] представлены графики  $N_1(\dot{\gamma})$  для растворов полистирола в толуоле. Они должны показать, что при очень низких скоростях сдвига экспериментальные точки «выходят» на квадратичную зависимость. Действительно, две точки могут быть связаны такой зависимостью (рис. 4, *a*). Однако в линейных координатах (рис. 4, *б*) видна линейная зависимость  $N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1$ , где  $\Delta N_1 = +0,906 Pa$ . Если предположить, что существует систематическая ошибка измерения, то можно ввести поправку на эту величину. После уменьшения значений  $N_1$  на  $\Delta N_1$  получим значения, которые практически совпадают с исходными значениями в области высоких скоростей сдвига, но ложатся на прямую при низких скоростях сдвига (за исключением первой экспериментальной точки).

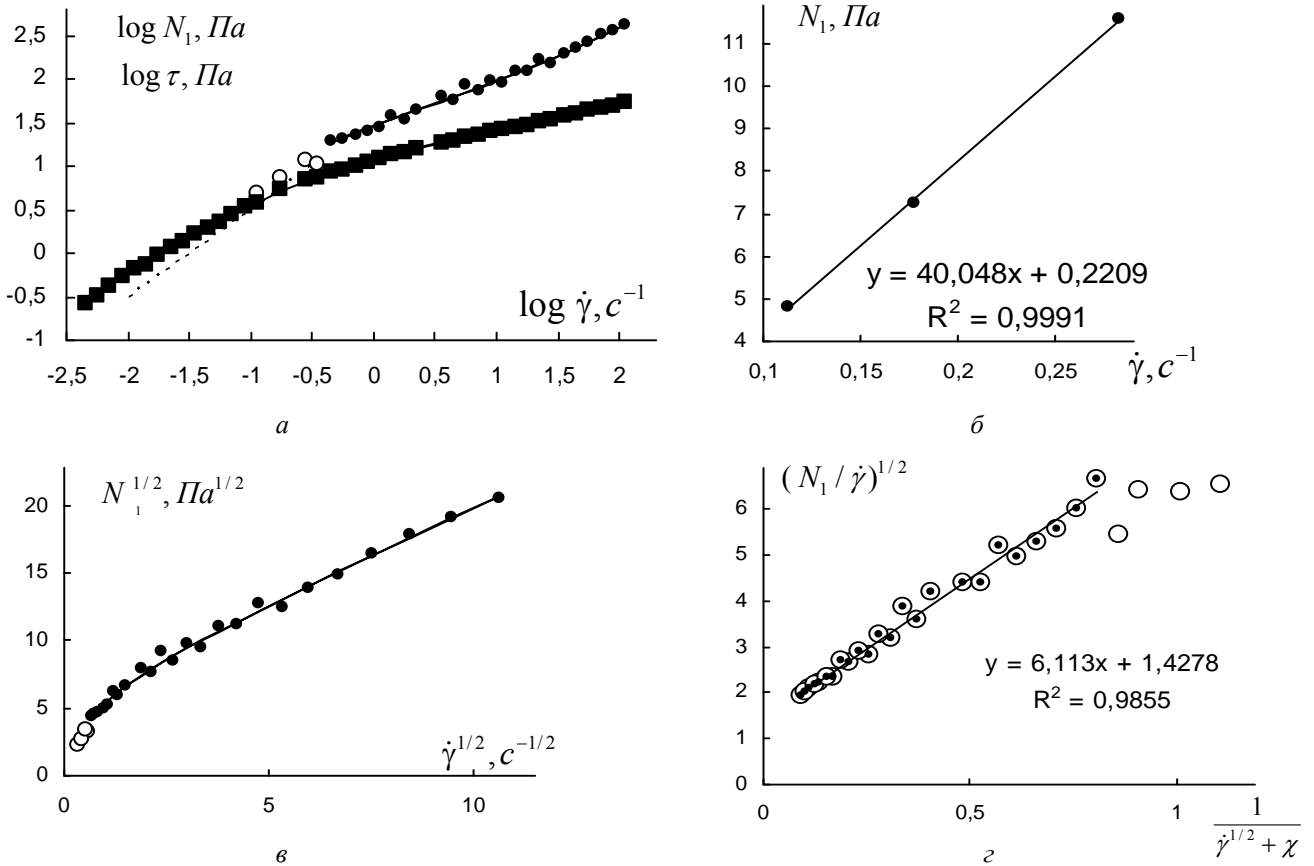


Рис. 3. Реологическое поведение 2 %-го водного раствора полиакриламида (Seragan AP-30 при 289,5 К): *a* – зависимость напряжения сдвига (квадраты) и первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая течения в линейных координатах при низких скоростях сдвига, *в* – кривая упругости в корневых координатах, *з* – линейризация кривой упругости в приведенных координатах. Данные из работы [12]

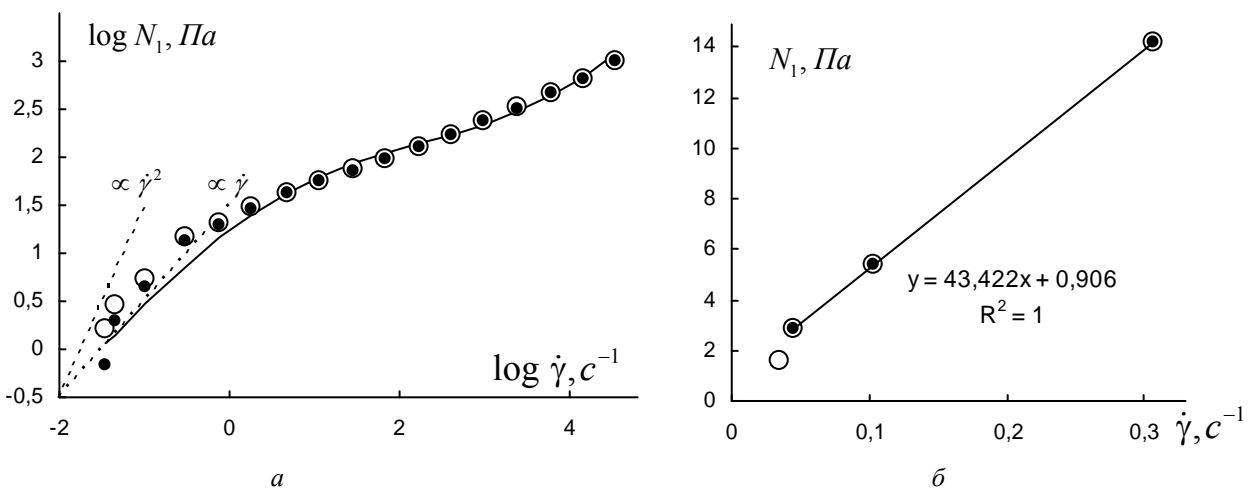


Рис. 4. Реологическое поведение 3 %-го раствора полистирола в толуоле при 298 К: *a* – зависимость первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая упругости в линейных координатах при низких скоростях сдвига. Пунктирные линии соответствуют линейной зависимости и квадратичной зависимости от скорости сдвига. Точки соответствуют реологическим данным с поправкой на  $\Delta N_1 = 0,906$ . Данные из работы [12]

Рассмотрим реологическое поведение водного раствора полиэтиленоксида (РЕО) по данным из диссертационной работы [13]. На рис. 5, а показан типичный график зависимости первого коэффициента нормальных напряжений  $\Psi_1(\dot{\gamma})$ . При высоких скоростях сдвига зависимость близка к степенному закону, при низких скоростях имеется тенденция к выходу на «плато» в соответствии с уравнением  $N_1 = \Psi_1(0)\dot{\gamma}^2$ .

Однако в области низких скоростей сдвига в

линейных координатах (рис. 5, б) нет и намека на квадратичную зависимость, а первые четыре точки хорошо описываются прямой вида  $N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1$ , где  $\Delta N_1 = -10,17$  Па. Коррекция экспериментальных данных на эту величину показана точками на рис. 5, в, г и отражена в табл. 1. В области высоких скоростей сдвига кривая течения и кривая упругости описываются уравнениями (1) и (7) соответственно. Квадратичная зависимость вида  $N_1 = \Psi_1(0)\dot{\gamma}^2$  является в данном случае артефактом.

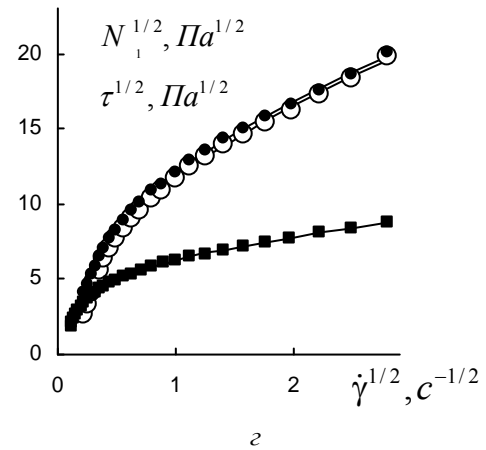
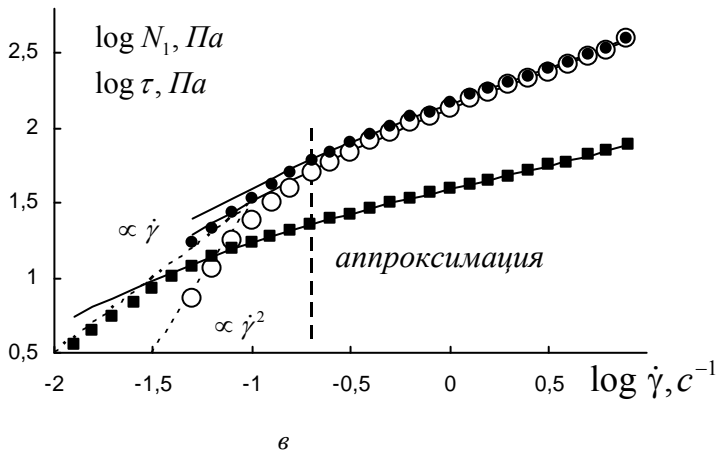
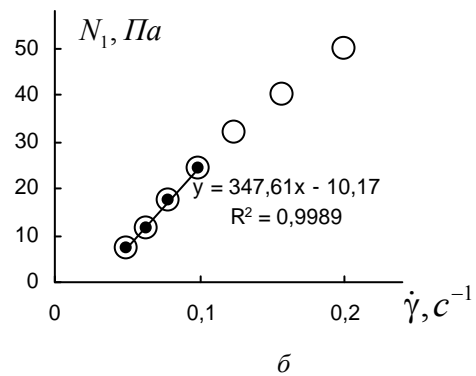
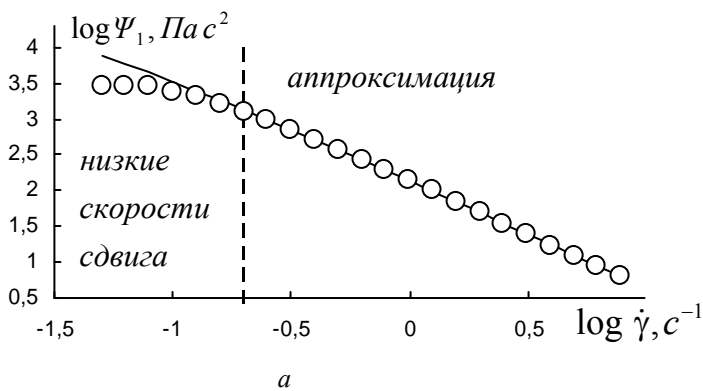
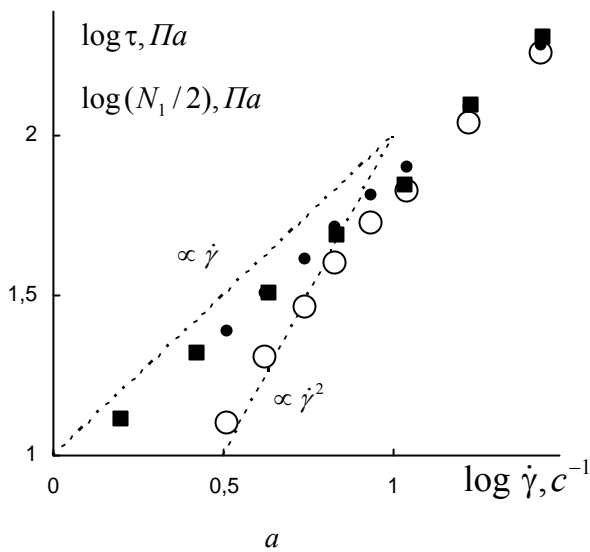


Рис. 5. Реологическое поведение 3 %-го водного раствора полиэтиленоксида (молярная масса  $4 \cdot 10^6$  дальтон) при  $20^\circ\text{C}$ : а – зависимость коэффициента первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах, б – кривая упругости в линейных координатах при низких скоростях сдвига, в – зависимость напряжения сдвига (квадраты) и первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах, г – кривая течения и кривая упругости в корневых координатах. Пунктирные линии соответствуют линейной зависимости и квадратичной зависимости от скорости сдвига. Точки соответствуют реологическим данным с поправкой на  $\Delta N_1 = -10,17$ . Данные из работы [13]

Рассмотрим реологическое поведение «жидкости Боджера» [14]. Так названы жидкости с очень высокой вязкостью, демонстрирующие ньютоновское течение с постоянной вязкостью, но одновременно показывающие упругие свойства в виде нормальных напряжений.

На рис. 6, *a* показаны экспериментальные данные для кукурузного сиропа с небольшим количеством полиакриламида (0,02 % Separan AP-30; 4 % воды; 95,98 % кукурузного сиропа). Хорошо видно,



что в логарифмических координатах две экспериментальные точки ложатся на прямую, демонстрирующую квадратичную зависимость.

Однако в линейных координатах (рис. 6, *б*) хорошо видна линейная зависимость пяти точек при низких скоростях сдвига в соответствии с уравнением  $N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1$ , где  $\Delta N_1 = -11,925 \text{ Па}$ . Коррекция экспериментальных данных на эту величину показана точками на рис. 6, *a*.

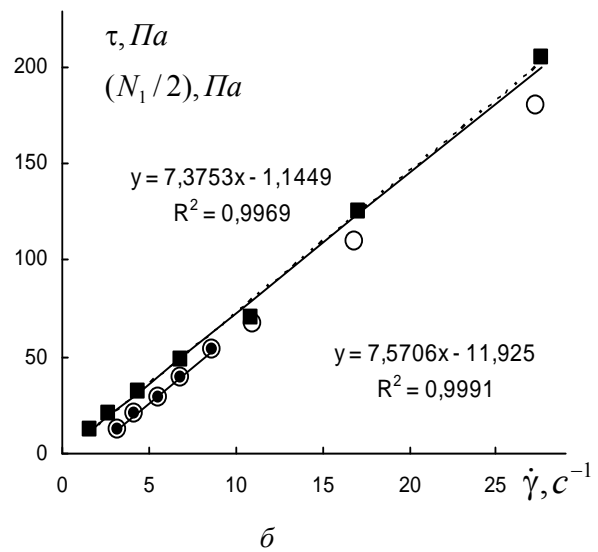


Рис. 6. Реологическое поведение «жидкости Боджера»:

*a* – зависимость напряжения сдвига (квадраты) и первой разности нормальных напряжений (кружки) от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая течения и кривая упругости в линейных координатах. Пунктирные линии соответствуют линейной зависимости и квадратичной зависимости измеренных величин от скорости сдвига. Точки соответствуют реологическим данным с поправкой на  $\Delta N_1 = -11,925$ . Данные из работы [14]

Примечательно, что после поправки на возможную систематическую ошибку значения величины  $(N_1/2)$  и  $\tau$  лежат практически на одной прямой, т. е.  $N_1 \approx 2\tau$  в интервале от  $1 \text{ с}^{-1}$  до  $30 \text{ с}^{-1}$ . Квадратичная зависимость вида  $N_1 = \Psi_1(0)\dot{\gamma}^2$  является в данном случае артефактом. На других графиках, приведенных в работе [14], также имеются прямолинейные зависимости в линейных координатах, и только для одной системы (полиизобутилен-полибутан-керосин) указанная линейная зависимость при дальнейшем понижении ско-

рости сдвига переходит в квадратичную зависимость.

### Заключение

В рамках структурной реологической модели упругое свойство растворов полимеров, а именно первая разность нормальных напряжений, объясняется упругими свойствами отдельных макромолекул и упругими свойствами ассоциатов макромолекул. Нелинейное поведение функции  $N_1(\dot{\gamma})$  при высоких скоростях сдвига объясняется разрушением ассоциатов макромолекул.



Линейная зависимость при низких скоростях сдвига вида  $N_1 = n_0 \dot{\gamma} + \Delta N_1$  обусловлена тем, что в этих условиях упругие ассоциаты макромолекул не изменяются, т. е. структура системы, связанная с упругостью, не изменяется с изменением скорости сдвига. Появление величины  $\Delta N_1$  скорее всего является следствием систематической ошибки при измерении осевой упругой силы. Квадратичная зависимость вида  $N_1 = \Psi_1(0) \dot{\gamma}^2$  появляется при переходе от линейных координат к двойным логарифмическим координатам, т. е. является артефактом.

#### Список литературы / References

1. *Виноградов Г. В., Малкин А. Я.* Реология полимеров. М. : Химия, 1977. 440 с.
2. *Barnes H. A.* A Handbook of Elementary Rheology. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales, Aberystwyth, 2000.
3. *Хан Ч. Д.* Реология в процессах переработки полимеров : пер. с англ. / под ред. Г. В. Виноградова, М. Л. Фридмана. М. : Химия, 1979. 368 с.
4. *Малкин А. Я., Исаев А. И.* Реология: концепции, методы, приложения : пер. с англ. СПб. : Профессия, 2007. 560 с.
5. *Joseph D. D., Reavers G. S., Cers A., Dewald C., Hoger A., Than P. T.* // J. Rheol. 1984. Vol. 28, № 4. P. 325–345.
6. *Walters K.* // Theoretical and Applied Rheology / ed. P. Moldenaers, R. Keynings. 1992. Vol. 1. P. 16–23.
7. *Курсанов Е. А.* Течение дисперсных и жидкокристаллических систем / под ред. Н. В. Усольцевой. Иваново : Иван. гос. ун-т, 2006. 232 с.
8. *Матвеев В. Н., Курсанов Е. А.* // Вест. Моск. ун-та. Сер. 2 : Химия. 2011. Т. 52, № 4. С. 243–276.
9. *Курсанов Е. А.* // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2007. Вып. 1 (19). С. 12–21.
10. *Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K.* An introduction to rheology. Elsevier (Rheology series, 3), 1989.
11. *Lem K. W., Han Ch. D.* // J. Rheology. 1983. Vol. 27, № 3. P. 263–288.
12. *Chhabra R. P., Richardson J. F.* Non-Newtonian Flow in the Process Industries. Fundamentals and Engineering Applications. Butterworth-Heinemann Linacre House, Oxford, 1999.
13. *Pasquino R.* Rheology of viscoelastic suspensions: Thesis in Chemical Engineer, 2008.
14. *Binnington R. J., Boger D. V.* // J. Rheol. 1985. Vol. 29, № 6. P. 887–904.

Поступила в редакцию 6.06.2014 г.