

УДК 541.182.022:532.135

Е. А. Кирсанов, Ю. Н. Тимошин

**НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ.
XXIII. ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ**

Государственный социально-гуманитарный университет,
ул. Зеленая, д. 30, 140411 Коломна, Московская область, Россия.
E-mail: Kirsanov47@mail.ru

Полимерные растворы рассматриваются как структурированные текучие среды. Структурная реологическая модель использована для описания реологических свойств следующих полимерных растворов: водные растворы ксантана, полиакриламида, карбоксиметилцеллюлозы, натрий карбоксиметилцеллюлозы, полиакриловая кислота в этиленгликоле, водный раствор полиакриламида до и после длительного интенсивного сдвига. Определены участки реологических кривых ($\tau(\dot{\gamma})$, $G''(\omega)$, $G'(\omega)$), соответствующие различным состояниям структуры исследованных образцов. Проведена аппроксимация этих реологических кривых с помощью реологических уравнений структурной модели. Уравнения структурной модели, полученные для описания сдвиговой вязкости, модуля потерь и модуля накопления, хорошо аппроксимируют экспериментальные данные вплоть до трех порядков величины скорости сдвига или циклической частоты. На интервале низких скоростей сдвига иногда наблюдается прямолинейная зависимость корневых значений напряжения сдвига, модуля потерь и модуля накопления. Участки низких скоростей сдвига (или циклических частот осцилляций) соответствуют «ньютоновскому» состоянию течения, где состояние структуры практически не изменяется. По мере дальнейшего увеличения скорости сдвига (или циклической частоты) начинается постепенное разрушение структуры (уменьшение количества зацеплений макромолекул). В некоторых образцах полимерных растворов рассчитанные значения предельной вязкости (при бесконечной скорости сдвига и бесконечной циклической частоте) имеют практически одинаковую величину, что является свидетельством сходного характера разрушения структуры при стационарном течении и при сдвиговых осцилляциях.

Ключевые слова: полимерные растворы, структурная реологическая модель, стационарное сдвиговое течение, вязкоупругие свойства.

DOI: 10.18083/LCAppl.2017.3.70

Е. А. Kirsanov, Yu. N. Timoshin

**NON-NEWTONIAN FLOW OF STRUCTURED SYSTEMS.
XXIII. VISCOELASTIC PROPERTIES OF POLYMER SOLUTIONS**

State University of Humanities and Social Studies,
30 Zelyonaya St., Kolomna, 140411, Moscow Region, Russia.
E-mail: Kirsanov47@mail.ru

Polymer solutions are considered as structured fluids. The structural rheological model is used to describe rheological properties of the following polymer solutions: aqueous solutions of xanthan gum, polyacrylamide, carboxymethylcellulose, sodium carboxymethylcellulose, polyacrylic acid in ethylene glycol, an aqueous solution of polyacrylamide before and after prolonged intensive shear. The sections of rheological curves ($\tau(\dot{\gamma})$, $G''(\omega)$, $G'(\omega)$), corresponding to different states of the structure of the investigated samples, are determined. Approximation of these rheological curves is carried out using the rheological equations of the structural model. The structural model equations, obtained for the description of shear viscosity, loss modulus

and storage modulus, approximate well the experimental data up to three orders of magnitude of the shear rate or cyclic frequency. At the range of the low shear rates or cyclic frequency, the linear dependence of the root values of shear stress, loss modulus and storage modulus observed sometimes. Intervals of the low shear rates (or cyclic oscillation frequencies) correspond to the "Newtonian" flow state, where the state of the structure practically does not change. As the shear rate (or the cyclic frequency) increases further, the structure gradually begins to degrade (a decrease in the number of macromolecules engagements). In some samples of polymer solutions, the calculated limiting viscosity values (at an infinite shear rate and infinite cyclic frequency) have practically the same value, which is the evidence of the similar nature of the structure destruction under steady flow and with shear oscillations.

Key words: polymer solutions, structural rheological model, steady shear flow, viscoelastic properties.

Реологические уравнения структурной модели

Реологические кривые, полученные при осциллирующем течении, во многом сходны с кривыми стационарного сдвигового течения. На графиках можно выделить участки с различным характером течения. При изучении вязких свойств (сдвиговой или динамической вязкости) наиболее просто разделить режим «неньютоновского» течения и режим «псевдоэластичного» течения, а также участок перехода к «срыву течения», где напряжение сдвига (или модуль вязкости) уменьшается или становится постоянной величиной. Более трудно разделить два соседних участка с «псевдопластичным» течением, где напряжение сдвига (или модуль вязкости) увеличивается, а сдвиговая вязкость (или динамическая вязкость) уменьшается с ростом скорости сдвига (или циклической частоты колебаний). В этих случаях используются обобщенное уравнение течения (ОУТ) и уравнение для модуля вязкости [1]:

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

$$G''^{1/2} = \frac{g' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi'} + \eta_\infty'^{1/2} \omega^{1/2}. \quad (2)$$

В общем, чем больше интервал измерений, тем труднее описать реологическую кривую одним реологическим уравнением с тремя коэффициентами, поскольку в интервал аппроксимации попадают разные режимы сдвигового течения или сдвиговых осцилляций. Малый интервал скоростей (или частот) в растворе или расплаве полимера, напротив, можно легко описать эмпирическим степенным законом с двумя подгоночными параметрами.

Аналогичная ситуация наблюдается при анализе упругих свойств, где кривая первой

разности нормальных напряжений $N_1(\dot{\gamma})$ может быть описана в интервале высоких скоростей сдвига уравнением упругости

$$N_1^{1/2} = \frac{n_{ST}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi_{ST}} \dot{\gamma}^{1/2} + n_\infty \dot{\gamma}^{1/2}, \text{ при более низких}$$

скоростях уравнением $N_1^{1/2} = n_0 \dot{\gamma}^{1/2} - \Delta N_1$, при очень низких скоростях (и достаточно редко) появляется степенная зависимость $N_1 \approx n_0 \dot{\gamma}^n$, где $n \approx 2$.

Сходная картина наблюдается при изучении модуля упругости $G'(\omega)$. В области высоких частот можно использовать уравнение для модуля упругости [1]

$$G'^{1/2} = \frac{g'' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi''} + \eta_\infty''^{1/2} \omega^{1/2}. \quad (3)$$

В области низких частот может наблюдаться участок, описываемый уравнением

$$G'^{1/2} = g_0'' \omega^{1/2} - \Delta G'^{1/2}, \quad (4)$$

при дальнейшем уменьшении частоты иногда появляется кривая $G' = g_2 \omega^n$, где $n \approx 2$.

Аппроксимация реологических данных для растворов полимеров

В некоторых полимерных системах отдельные режимы течения могут занимать большие интервалы скоростей сдвига или частот, как, например, в растворах ксантана и полиакриламида (рис. 1), экспериментально описанных в работе [2]. Эти полимеры с высокой молярной массой длительное время размешивались, затем отстаивались 24 ч и снова размешивались 30 мин перед измерениями в реометре с геометрией «конус-плоскость». Поэтому исходное состояние образца можно считать гомогенным и близким к равновесному.

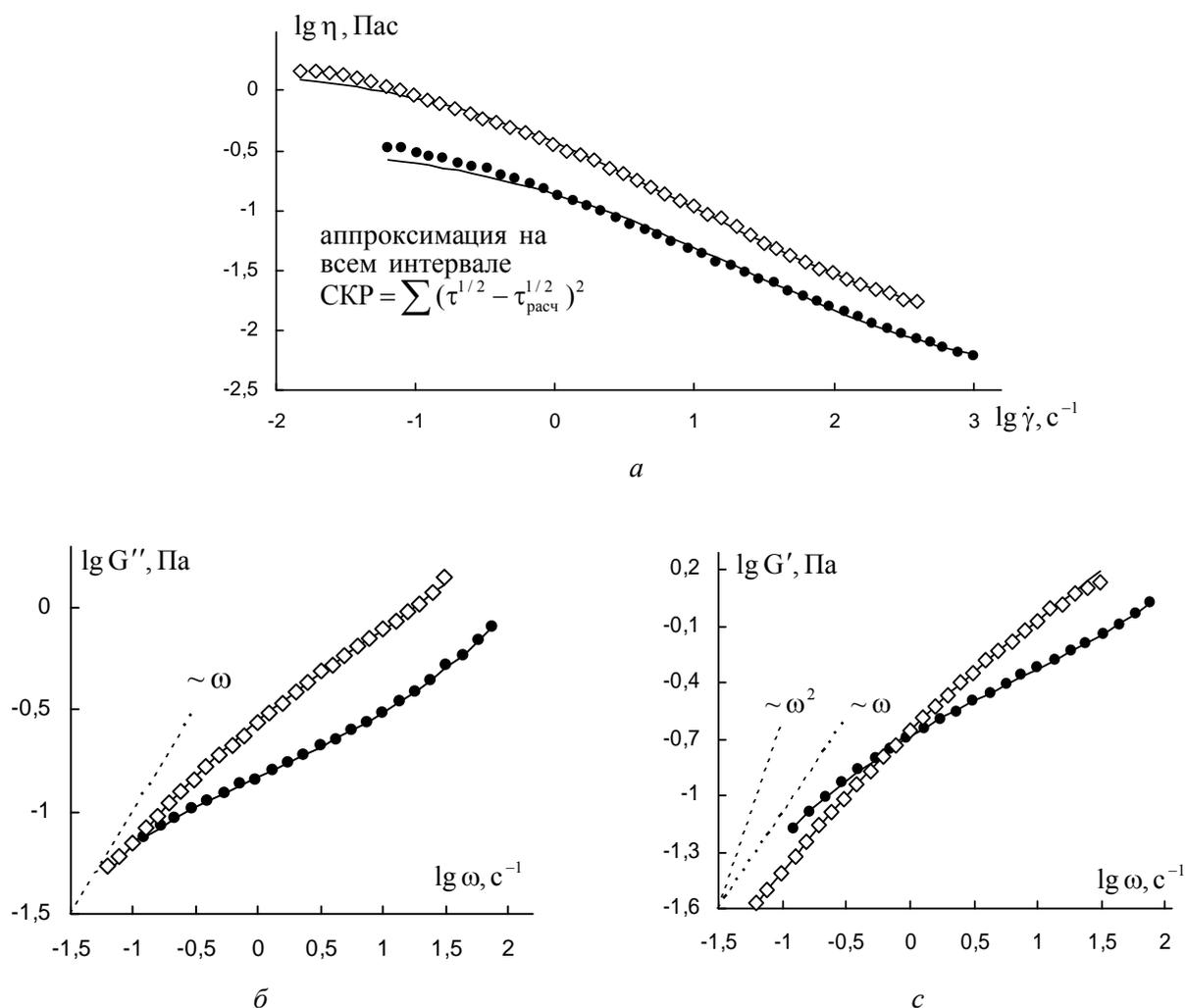


Рис. 1. Реологические кривые водных растворов 0,2 % ксантана (ромб) и 0,125 % полиакриламида (точка), представленные в двойных логарифмических координатах: кривые сдвиговой вязкости (а); кривые модуля вязкости (б); кривые модуля упругости (с). Данные из работы [2]

Fig. 1. The rheological curves of aqueous solutions of 0.2 % xanthan (diamond) and 0.125 % poly-acrylamide (dot) presented in double logarithmic coordinates: curves of shear viscosity (a); the curves of the loss modulus (b); curves of the storage modulus (c). Data from [2]

Рассчитанные коэффициенты приведены в табл. 1, пунктирные линии показывают возможные степенные зависимости. Аппроксимация проведена на всем интервале измерений.

При стационарном течении обобщенное уравнение течения справедливо на интервале высоких скоростей примерно от 1 до 10^3 c^{-1} (три порядка величины скорости). При более низких скоростях экспериментальные точки располагаются выше и можно предположить наличие другого

режима псевдопластичного течения или небольшое отклонение от равновесного состояния течения. Целиком весь интервал можно описать эмпирическим уравнением Карро – Яшида с пятью подгонными коэффициентами, который по математической форме близок к обобщенному уравнению течения. Кривые, полученные в динамических измерениях, описываются уравнением модуля вязкости и уравнением модуля упругости на всем интервале частот трех порядков величины.

Таблица 1. Коэффициенты уравнений для напряжения сдвига, модуля вязкости и модуля упругости водных полимерных растворов при 25 °С

Table 1. The coefficients of the equations for shear stress, storage modulus and elastic modulus of aqueous polymer solutions at 25 °C

Сдвиговая вязкость τ, η			Динамическая вязкость G'', η'			Упругость G', η''		
$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	χ	g'	$\eta_\infty'^{1/2}$	χ'	g''	$\eta_\infty''^{1/2}$	χ''
Ксантан (Kelco Division of Merck) 0,2 %								
0,935	0,086	0,792	0,731	0,088	0,659	0,851	0,101	1,29
Полиакриламид (Separan AN-934 SH) 0,125 %								
0,744	0,056	1,37	0,389	0,059	0,189	0,614	0,051	0,529

Отметим, что наиболее близки между собой значения коэффициентов предельной вязкости $\eta_c^{1/2}$ и $\eta_\infty'^{1/2}$ (табл. 1), соответствующие расчетной вязкости полимерных растворов без зацеплений между макромолекулами.

Рассмотрим вязкоупругие свойства водных растворов ксантана и карбоксиметилцеллюлозы, исследованных в работе [3] с помощью реометра с

контролируемым напряжением сдвига и устройством конус-плоскость. Все измерения проводились на интервале частот от 0,01 до 100 рад/с при постоянной амплитуде напряжения сдвига 0,1 Па. Экспериментальные данные и результаты аппроксимации показаны на рис. 2 и 3 и представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты уравнений для модуля вязкости и модуля упругости водных полимерных растворов при 20 °С

Table 2. The coefficients of the equations for storage modulus and loss modulus of aqueous polymer solutions at 20 °C

Динамическая вязкость G'', η'			Упругость G', η''		
g'	$\eta_\infty'^{1/2}$	χ'	g''	$\eta_\infty''^{1/2}$	χ''
Ксантан (LPXF) 0,25 %					
0,877	0,078	0,346	1,08	0,121	0,617
Карбоксиметилцеллюлоза (LPCF) 0,4 %					
2,70	0,054	6,01	недостаточно точек		

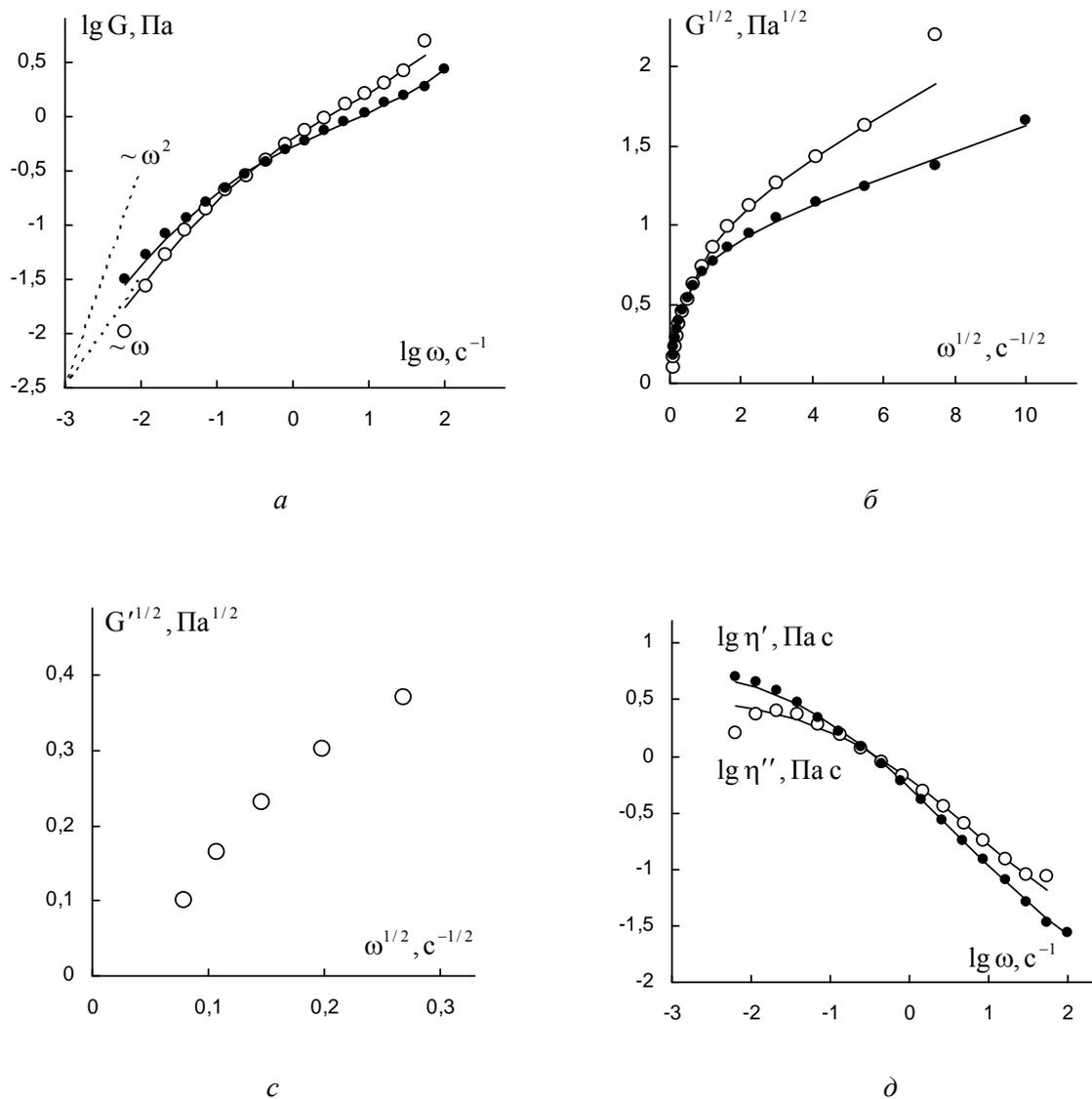


Рис. 2. Реологическое поведение 0,25 % водного раствора ксантана (LPXF) при 20 °С: модули вязкости (точки) и упругости (кружки) в логарифмических координатах (а); в корневых координатах (б); в корневых координатах в области низких частот (с); зависимости динамической вязкости (точки) и динамической упругости (кружки) (д). Данные из [3]

Fig. 2. Rheological behavior of a 0.25 % aqueous xanthan solution (LPXF) at 20 °C: loss modulus (dots) and storage modulus (circles) in logarithmic coordinates (a); in root coordinates (b); in the root coordinates in the low frequency region (c); dependence of dynamic viscosity (dots) and dynamic elasticity (circles) (d). Data from [3]

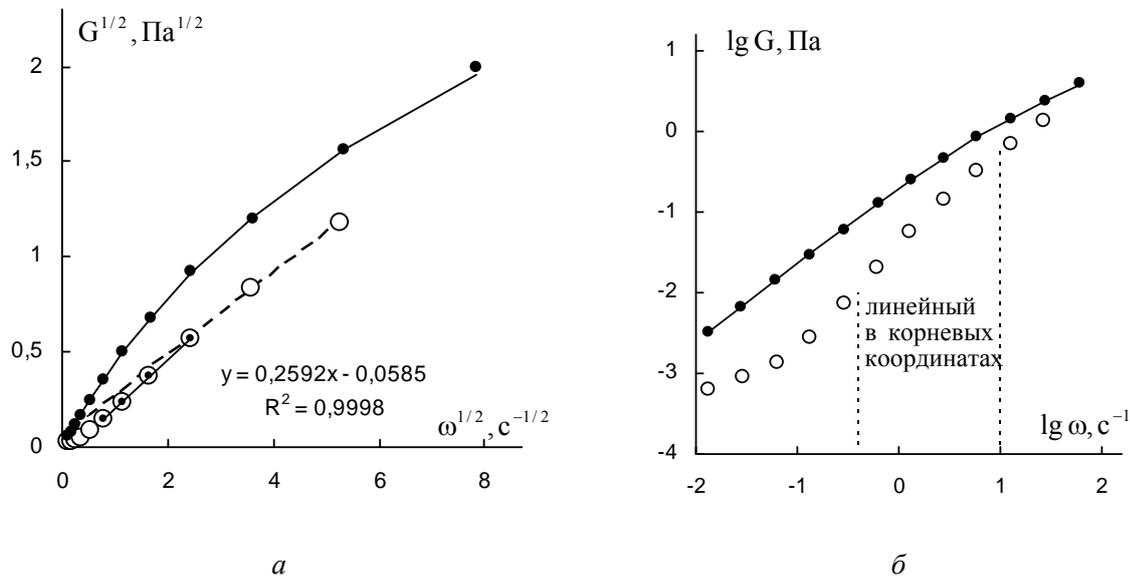


Рис. 3. Реологическое поведение 0,4 % водного раствора карбоксиметилцеллюлозы (LPCF) при 20 °С: модули вязкости (точки) и упругости (кружки) в корневых координатах, прямолинейный тренд на участке низких частот на кривой модуля упругости (а); модули вязкости и упругости в двойных логарифмических координатах (б).
Данные из [3]

Fig. 3. The rheological behavior of 0.4 % aqueous solution of carboxymethyl cellulose (LPCF) at 20 °C: loss modulus (dots) and elastic (circles) in root coordinates, straight-line trend on a plot of the storage modulus in the low frequency region (a); the loss modulus and storage modulus in a double-logarithmic coordinates (b). Data from [3]

В работе [4] исследованы реологические свойства водных растворов полисахаридов (ксантан и натрий карбоксиметилцеллюлоза): стационарное сдвиговое течение с помощью реометра с контролируемым напряжением сдвига и системы конус-плоскость; динамические измерения проводились при постоянной амплитуде деформации 3 %. Экспериментальные данные и результаты аппроксимации показаны на

рис. 4 и 5, значения коэффициентов реологических уравнений – в табл. 3, 4.

Реологические кривые (рис. 4) разделяются на два участка, соответствующие разным состояниям структуры полимерного раствора. Участок низких частот (или скоростей сдвига) описывается уравнениями с коэффициентами компактности $\chi = 0$.

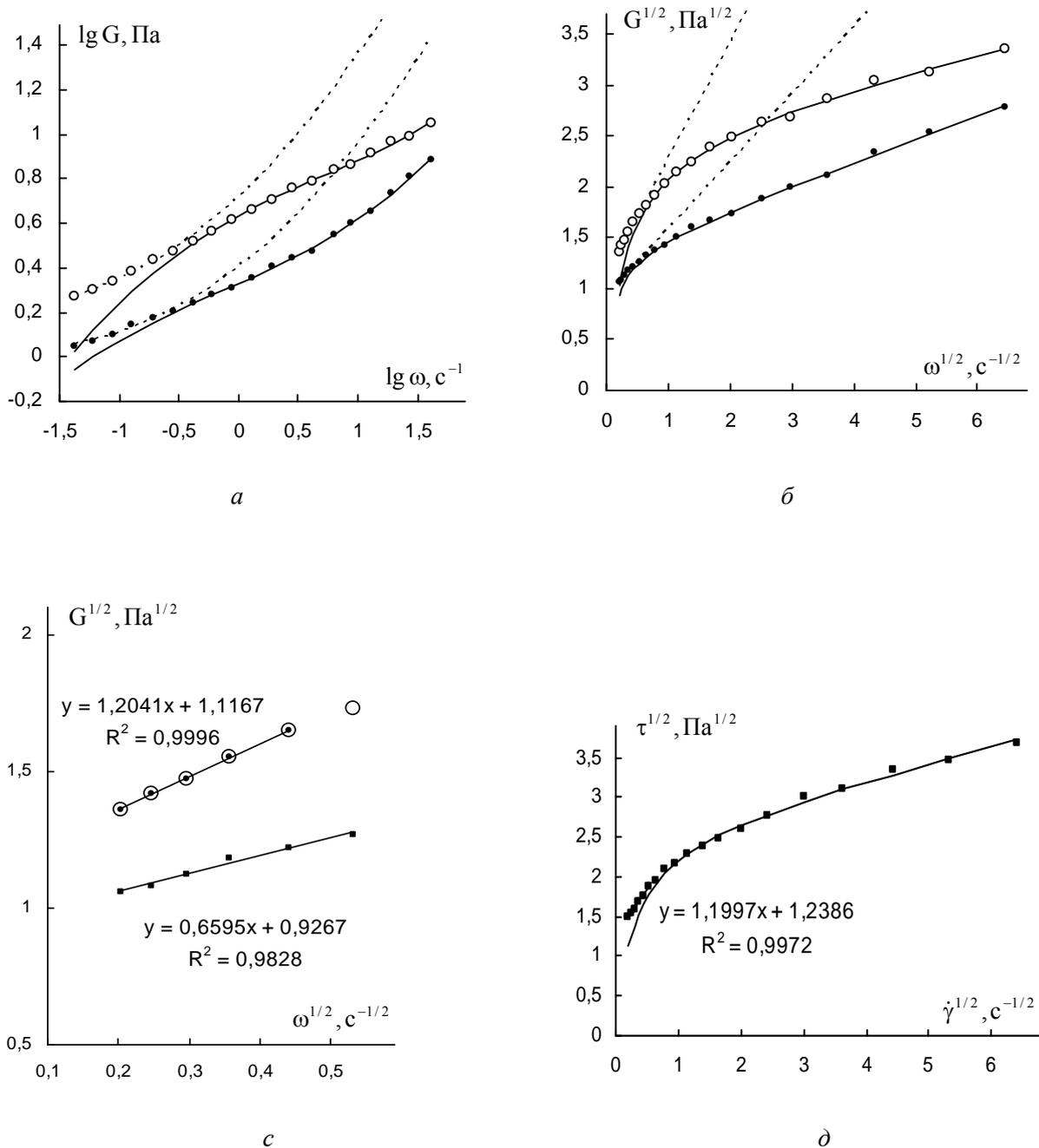


Рис. 4. Реологическое поведение 1 % водного раствора биополимера ксантан при 20 °C: *a* – модули вязкости (точки) и упругости (кружки) в двойных логарифмических координатах; *b* – в корневых координатах; *c* – в корневых координатах в области низких частот; *d* – кривая течения в корневых координатах с прямолинейным трендом при низких скоростях. Данные из [4]

Fig. 4. The rheological behavior of 1 % aqueous solution of the biopolymer xanthan at 20 °C: *a* – loss modulus (dots) and storage modulus (circles) in double logarithmic coordinates; *b* – in the root coordinates; *c* – in the root coordinates in the low frequency region; *d* – the flow curve in root coordinates with a linear trend at low shear rates. Data from [4]

Таблица 3. Коэффициенты уравнений для напряжения сдвига, модуля вязкости и модуля упругости 1 % водного раствора ксантана (KELTROL®) при 20 °С

Table 3. The coefficients of the equations for shear stress, loss modulus and storage modulus of 1 % aqueous solution of xanthan gum (KELTROL®) at 20 °С

Сдвиговая вязкость τ, η			Динамическая вязкость G'', η'			Упругость G', η''		
$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	χ	g'	$\eta_\infty'^{1/2}$	χ'	g''	$\eta_\infty''^{1/2}$	χ''
Участок низких частот или скоростей сдвига								
1,24	1,20	0	0,927	0,659	0	1,13	1,14	0
Участок высоких частот или скоростей сдвига								
2,56	0,197	0,278	1,37	0,224	0,112	2,53	0,147	0,312

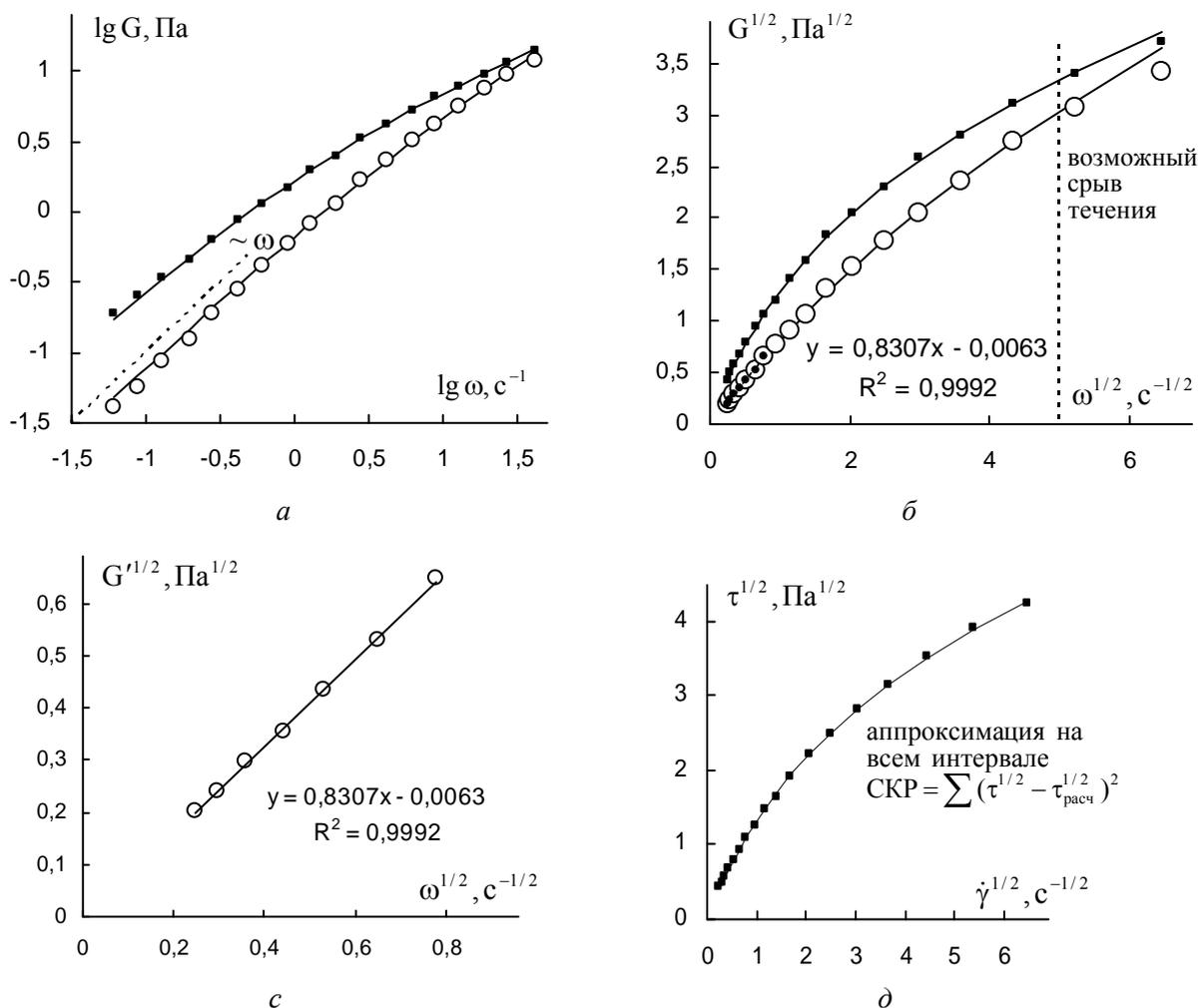


Рис. 5. Реологическое поведение 1 % водного раствора натрий карбоксиметилцеллюлозы при 20 °С: а – модули вязкости (точки) и упругости (кружки) в двойных логарифмических координатах; б – модули вязкости и упругости в корневых координатах; с – модули упругости в корневых координатах в области низких частот сдвиговых колебаний; д – кривая течения в корневых координатах. Данные из [4]

Fig. 5. The rheological behavior of 1 % aqueous solution of sodium carboxymethylcellulose at 20 °С: а – loss modulus (dots) and storage modulus (circles) in double logarithmic coordinates; б – the loss modulus and storage modulus in the root coordinate; с – storage modulus in the root coordinates in the low-frequency region of shear oscillations; д – flow curve in the root coordinates. Data from [4]

Таблица 4. Коэффициенты уравнений для напряжения сдвига, модуля вязкости и модуля упругости 1 % водного раствора натрий карбоксиметилцеллюлозы (BLANOSE® 7HF)

Table 4. The coefficients of the equations for shear stress, loss modulus, and storage modulus of a 1 % aqueous solution of sodium carboxymethylcellulose (BLANOSE® 7HF)

Сдвиговая вязкость τ, η			Динамическая вязкость G'', η'			Упругость G', η''		
$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	χ	g'	$\eta_\infty^{1/2}$	χ'	g''	$\eta_\infty''^{1/2}$	χ''
4,21	0,205	2,78	3,07	0,221	1,87	4,21	0,233	6,23

Реологические данные [5] 1 % раствора полимера Карбопол (полиакриловая кислота в этилен-гликоле) представлены на рис. 6 и 7.

Молекулярная масса полиакриловой кислоты равна $M_w = 1250000$, растворителем является этиленгликоль.

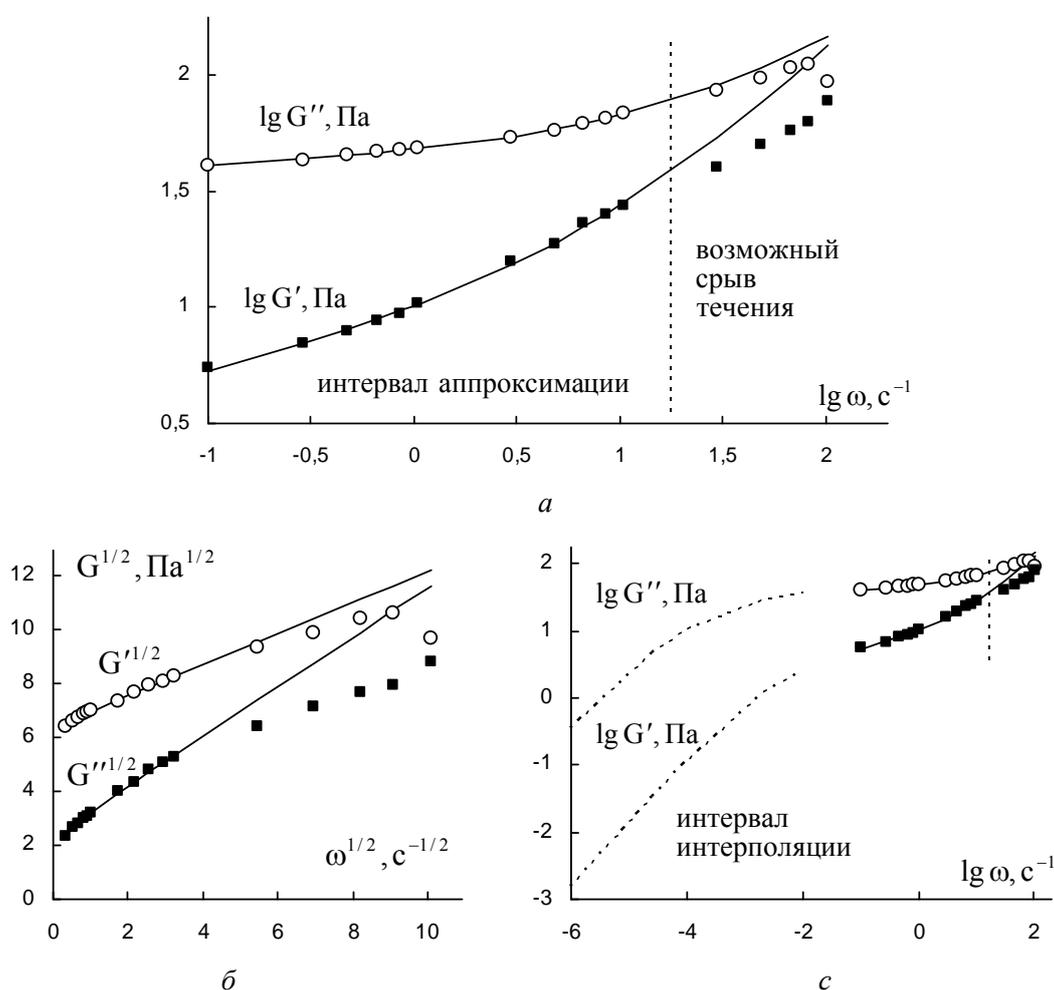


Рис. 6. Реологическое поведение 1 % раствора Карбопол:

a – модули вязкости (квадраты) и упругости (кружки) в двойных логарифмических координатах; b – в корневых координатах; c – в логарифмических координатах с экстраполяцией в область низких скоростей сдвига.

Пунктирные линии получены экстраполяцией по уравнениям (2) и (3). Данные из работы [5]

Fig. 6. Rheological behavior of a 1 % solution Carbopol:

a – loss modulus viscosity (squares) and storage modulus (circles) in double logarithmic coordinates; b – in root coordinates; c – in a logarithmic coordinates with extrapolation to low frequency region. The dotted lines are obtained by extrapolation according to equations (2) and (3). Data from [5]

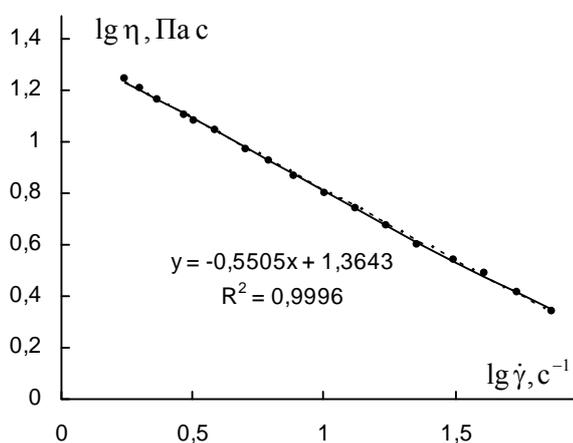
Измерения были выполнены с помощью ротационного вискозиметра *Haake RS 100 Rheostress* с устройством конус-плоскость. Экспериментальные данные и результаты аппроксимации показаны на рис. 6, 7 и представлены в табл. 5.

На интервале циклических частот от 0,1 до 10 справедлива аппроксимация уравнениями вязкости (2) и упругости (3). При более высоких частотах экспериментальные точки демонстрируют падение, возможно, связанное с явлением срыва течения.

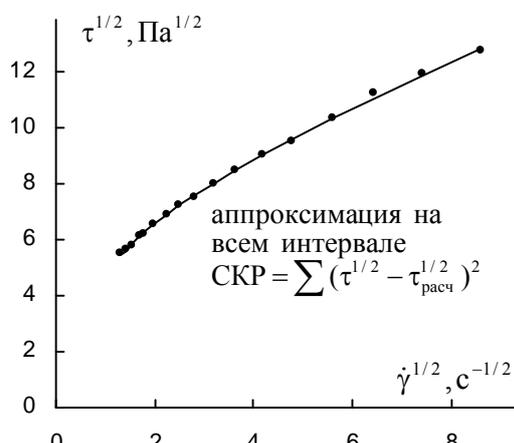
Таблица 5. Коэффициенты уравнений для напряжения сдвига, модуля вязкости и модуля упругости для 1 % полимерного раствора Карбопол

Table 5. The coefficients of the equations for shear stress, loss modulus and storage modulus for the 1 % polymer solution Carbopol

Сдвиговая вязкость τ, η			Динамическая вязкость G'', η'			Упругость G', η''		
$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	χ	g'	$\eta_\infty^{1/2}$	χ'	g''	$\eta_\infty''^{1/2}$	χ''
6,98	0,751	0,745	2,42	0,911	0,063	6,42	0,570	0,010



а



б

Рис. 7. Кривая вязкости в двойных логарифмических координатах (а) и кривая течения в корневых координатах (б), полученная для 1 % раствора Карбопол. Данные из работы [5]

Fig. 7. Viscosity curve in double logarithmic coordinates (a) and flow curve in root coordinates (b) obtained for the 1 % solution Carbopol. Data from [5]

Стационарное течение исследовано на небольшом интервале скоростей сдвига (менее двух порядков величины). Обобщенное уравнение течения описывает экспериментальные данные практически с той же точностью, что степенной закон Оствальда (рис. 7, а).

Представляют интерес реологические характеристики 0,1 % водного раствора полиакриламида [6], которые были получены сразу после приготовления раствора («свежий» образец) и после долговременного процесса перекачки раствора по

трубам с интенсивным сдвиговым течением (образец после «механической деградации»). Сдвиговая вязкость η измерена с помощью реометра с контролируемым напряжением сдвига, модули вязкости и упругости измерены при осцилляции напряжения сдвига с амплитудой 0,05 Па. Молекулярная масса полимера равна $1,94 \times 10^6$ г/моль, показатель полидисперсности 1,05. Экспериментальные данные и результаты аппроксимации показаны на рис. 8–10 и представлены в табл. 6.

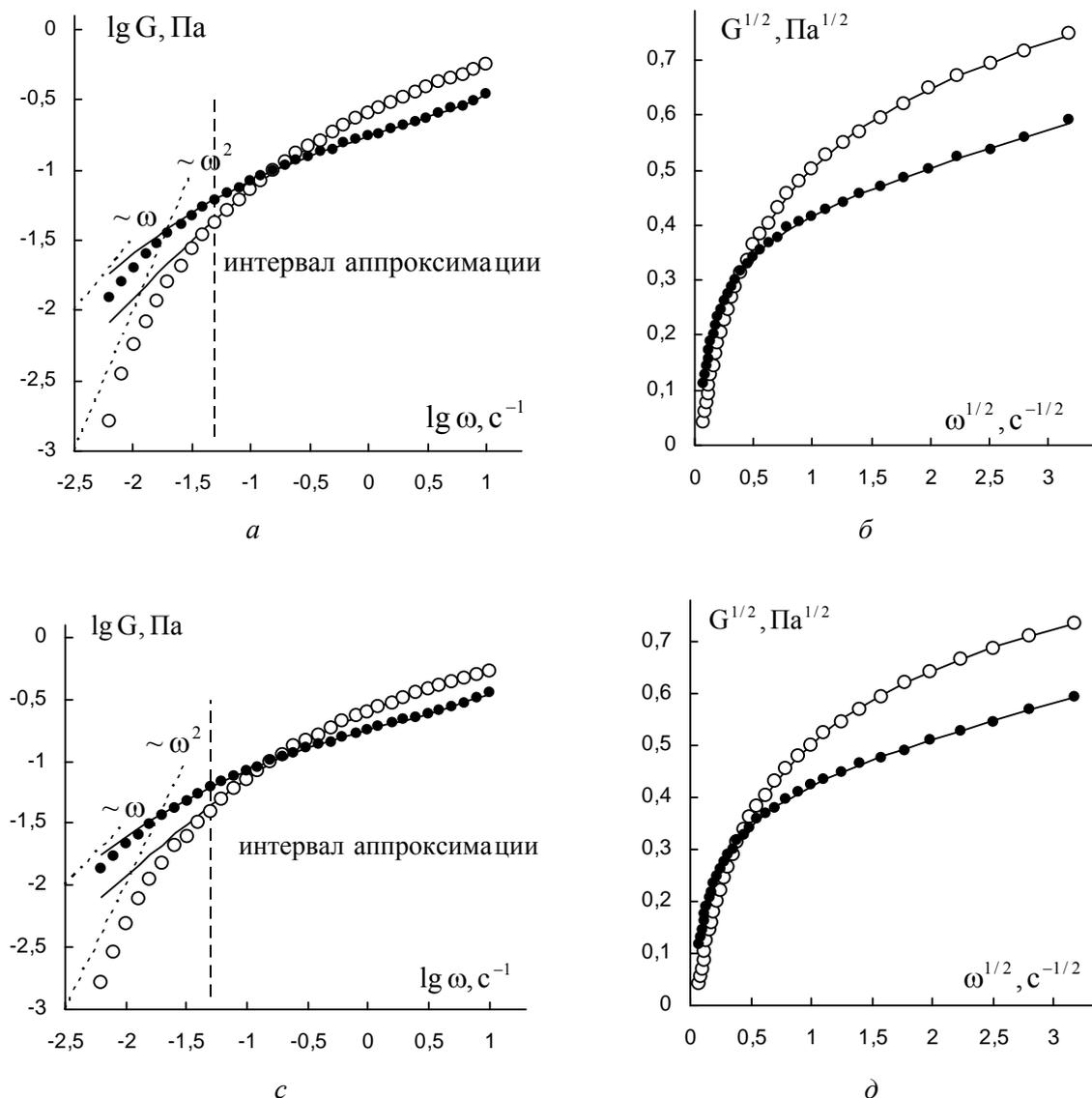


Рис. 8. Реологическое поведение 0,1 % водного раствора полиакриламида при 20 °С:
 а – модули вязкости (точки) и упругости (кружки) в двойных логарифмических координатах для «свежего» образца;
 б – в корневых координатах; с – модули вязкости и упругости в двойных логарифмических координатах для образца
 после «механической деградации»; д – модули вязкости и упругости в корневых координатах. Данные из [6]

Fig. 8. Rheological behavior of 0,1 % aqueous solution of polyacrylamide at 20 °C:
 а – loss modulus (dots) and storage modulus (circles) in double logarithmic coordinates for «fresh» sample; б – in root
 coordinates; с – the loss modulus and storage modulus in a double-logarithmic coordinates for sample after «mechanical
 degradation»; д – in the root coordinates. Data from [6]

Отклонение экспериментальной величины $G''(\omega)$ при низких частотах от рассчитанной по уравнению (2) связано с переходом к «неньютоновскому течению» с постоянной

динамической вязкостью η' . Отклонение экспериментальной величины $G'(\omega)$ при низких частотах от рассчитанной по уравнению (3) связано с переходом к линейной зависимости уравнения (4).

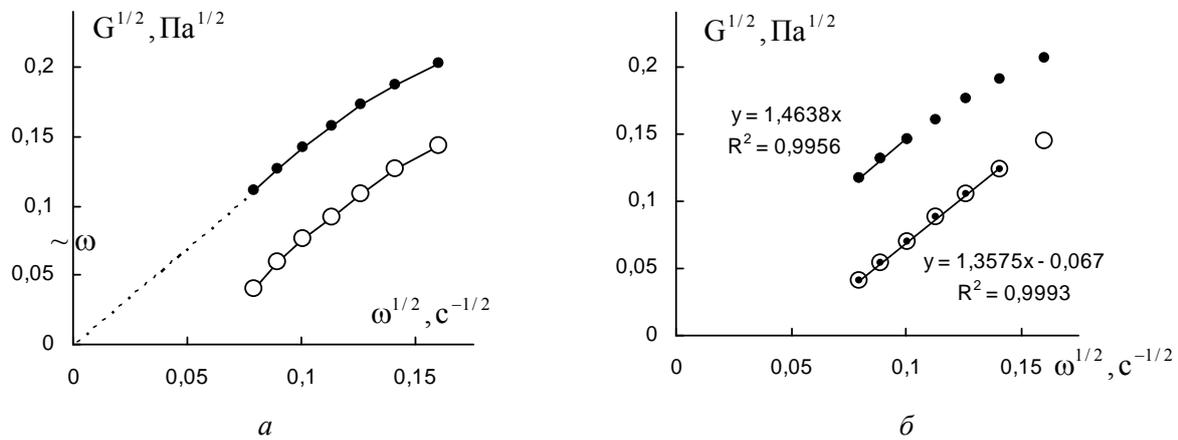


Рис. 9. Реологическое поведение 0,1 % водного раствора полиакриламида (*Separan AP273 E*) на участке низких частот в корневых координатах: *a* – модули вязкости (точки) и упругости (кружки) для «свежего» образца; *б* – для образца после «механической деградации». Данные из [6]

Fig. 9. Rheological behavior of 0.1 % aqueous solution of polyacrylamide (*Separan AP273 E*) on a plot of low frequency in root coordinates: *a* – loss modulus (dots) and storage modulus (circles) for a «fresh» sample; *b* – sample after «mechanical degradation». Data from [6]

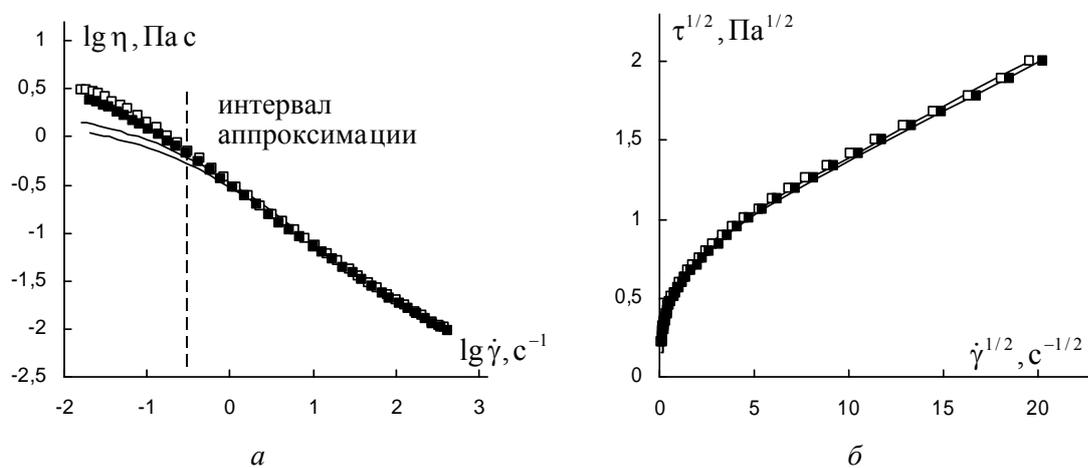


Рис. 10. Кривые вязкости в логарифмических координатах (*a*) и кривые течения в корневых координатах (*б*), полученные для 0,1 % раствора полиакриламида для «свежего» образца (квадраты); для образца после «механической деградации» (заполненные квадраты). Данные из [6]

Fig. 10. The curves of viscosity in a logarithmic coordinates (*a*) and flow curves in the root coordinates (*b*), obtained for the 0,1 % solution of polyacrylamide for «fresh» sample (squares); for the sample after «mechanical degradation» (filled squares). Data from [6]

Таблица 6. Коэффициенты уравнений для напряжения сдвига, модуля вязкости и модуля упругости 0,1 % водного раствора полиакриламида (*Separan AP273 E*) при 20 °C для «свежего» образца и для образца после «механической деградации»

Table 6. The coefficients of the equations for shear stress, loss modulus and storage modulus of 0.1 % aqueous solution of polyacrylamide (*Separan AP273 E*) at 20 °C for a «fresh» sample and sample after «mechanical degradation»

Сдвиговая вязкость τ, η			Динамическая вязкость G'', η'			Упругость G', η''		
$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	χ	g'	$\eta_\infty'^{1/2}$	χ'	g''	$\eta_\infty''^{1/2}$	χ''
«свежий» образец								
0,831	0,061	0,605	0,420	0,059	0,174	0,746	0,037	0,597
образец после «механической деградации»								
0,824	0,060	0,690	0,431	0,059	0,187	0,777	0,027	0,632

Заключение

Закономерности стационарного сдвигового течения и сдвиговых осцилляций вязкоупругих растворов полимеров описываются в рамках структурной реологической модели. Кривая зависимости $G''(\omega)$ практически всегда подчиняется уравнению вязкости (2). Зависимость $G'(\omega)$ описывается уравнением упругости (3) на интервале высоких частот и уравнением (4) при достаточно низких частотах. Такое поведение соответствует представлениям о различном состоянии структуры полимерных растворов на этих участках реологических кривых.

Список литературы / References

1. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М.: Техносфера, 2016. 384 с. [Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Non-Newtonian flow of dispersed, polymer and liquid crystal systems. Structural approach. Moscow: Technosphere, 2016, 384 p. (in Russ.)].
2. Cavadas A.S., Pinho F.T., Campos J.B.L.M. Flow field of non-Newtonian fluids in impinging jets confined by slopping plane walls. *14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 07–10 July, 2008. P. 1–12.
3. Escudier M.P., Gouldson I.W., Pereira A.S., Pinho F.T., Poole R.J. On the reproducibility of the rheology of shear-thinning liquids. *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, 2001, **97**, 99–124.
4. Florjancic U., Zupancic A., Zumer M. Rheological Characterization of Aqueous Polysaccharide Mixtures Undergoing Shear. *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 2002, **16** (3), 105–118.
5. Nase J. Debonding of Viscoelastic Materials: From a Viscous Liquid to a Soft Elastic Solid. *Dissertation zur Erlangung des Grades der Doktorin der Naturwissenschaften der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II-Physik und Mechatronik – der Universität des Saarlandes und der Université Pierre et Marie Curie, Saarbrücken, Paris*, 2009, 184 p.
6. Dales C., Escudier M.P., Poole R.J. Asymmetry in the turbulent flow of a viscoelastic liquid through an axisymmetric sudden expansion. *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, 2005, **125**, 61–70. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2004.10.001.

Поступила в редакцию 15.05.2017 г.
Received 15 May 2017