

УДК 541.182.022:532.135

*Е. А. Кирсанов, Ю. Н. Тимошин*

**НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ.  
XIII. ТИКСОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА**

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

*Тиксотропные свойства текучих систем связаны с изменением структуры образца. В рамках структурной реологической модели изменение структуры системы выражается в разрушении и формировании агрегатов частиц. Предложены уравнения для описания квазиравновесного течения и для описания изменения напряжения сдвига с течением времени при постоянной скорости сдвига. Гистерезис кривых течения описывается в рамках структурной реологической модели. Объясняется антибатность коэффициентов обобщенного уравнения течения. Описывается зависимость напряжения сдвига от времени. Представленная модель тиксотропного поведения используется для описания течения суспензий, эмульсий и других коллоидных систем.*

**Ключевые слова:** структурная реологическая модель, тиксотропные свойства.

*Е. А. Kirsanov, Yu. N. Timoshin*

**NON-NEWTONIAN FLOW OF STRUCTURED SYSTEMS.  
XIII. THIXOTROPIC PROPERTIES**

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

*Thixotropic properties of fluids are associated with sample structure change. In terms of structural rheological model the structure changes are expressed in destruction and formation of particle aggregates. The equations to describe the quasi-equilibrium flow and the changes in shear stress with time at constant shear rate are proposed. Hysteresis of flow curves is described in the framework of structural rheological model. Antibate coefficients of generalized flow equation are explained. The dependence of shear stress on time is determined. The presented model of thixotropic behavior is used in order to describe the flow of suspensions, emulsions and other colloidal systems.*

**Key words:** structural rheological model, thixotropic properties.

Тиксотропные явления связаны с изменением дисперсной системы во времени. Поэтому любая структурированная система в принципе тиксотропна, поскольку изменения структуры происходят за конечное время. С другой стороны, установление равновесия может происходить быстро, и такие системы в момент измерения можно считать равновесными. Ясно, что теория тиксотропных систем должна являться расширением реологической модели, предварительно полученной для равновесного течения. В представленной статье обобщенная модель течения используется для описания тиксотропных свойств различных текучих систем.

### 1. Тиксотропные свойства в структурной реологической модели

Будем называть тиксотропным такое поведение системы, при котором значение вязкости изменяется с течением времени при постоянной скорости сдвига (или постоянном напряжении сдвига) и различаются кривые течения, полученные при увеличении скорости сдвига (напряжения сдвига) и при уменьшении скорости сдвига (напряжения сдвига). Уменьшение вязкости со временем и гистерезис кривых течения связывают с неравновесным состоянием течения (отклонением системы от равновесного состояния течения).

Чтобы ввести тиксотропные свойства в реологические уравнения, необходимо установить характер зависимости реологических параметров от времени. Ранее были рассмотрены тиксотропные свойства высокопарафинистой нефти [1] и некоторых других систем [2], а обобщенная модель течения расширена [3] для описания неравновесного течения.

В рамках гидродинамического подхода [3] можно описать коэффициент отклонения от равновесия в виде

$$\xi = \frac{\tau_{\dot{\gamma}}^{1/2}}{\tau_{\dot{\gamma}}^{*1/2}}, \quad (1)$$

где звездочкой отмечено равновесное состояние течения. Тогда уравнение Кэссона для неравновесного состояния течения принимает вид:

$$\tau^{1/2} = \xi \tau_{\dot{\gamma}}^{*1/2} + \eta_{\dot{\gamma}}^{1/2} \cdot \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (2)$$

Коэффициент  $\xi$  примерно равен отношению линейных размеров агрегатов при неравно-

весном и при равновесном течении. С его помощью можно описать изменение кривых течения в сериях последовательных опытов (увеличение или уменьшение скорости сдвига): серию опытов  $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow$  или  $\uparrow\uparrow\uparrow$ , начальную кривую течения и установившуюся (равновесную) кривую течения.

Для пошагового изменения (увеличения) скорости сдвига было получено уравнение [3], описывающее коэффициент отклонения от равновесия:

$$\xi(t) = [\xi_0 - 1]e^{-\lambda t} + 1. \quad (3)$$

Предполагая, что коэффициент вязкости  $\eta_c$  незначительно изменяется с течением времени, получим выражение

$$\left[ \frac{\tau_{\dot{\gamma}}^{1/2}}{\tau_{\dot{\gamma}}^{*1/2}} - 1 \right] = \left[ \left( \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1} \right)^{1/2} - 1 \right] e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

В рамках кинетического подхода можно предположить, что в равновесном состоянии течения  $\xi = 1$ , для состояния с преобладанием крупных агрегатов  $\xi > 1$ , для состояния с преобладанием малых агрегатов и отдельных частиц  $\xi < 1$ .

Скорость агрегации была определена через значение коэффициента отклонения от равновесного состояния  $\xi$ :

$$\frac{dN_2}{dt} = N\tilde{k}_2(1 - \xi). \quad (5)$$

Здесь  $N_2$  – число агрегированных частиц,  $N$  – полное число частиц в системе,  $\tilde{k}_2$  – константа скорости агрегации. Квазиравновесное состояние течения при  $\xi = \text{const}$  соответствует, таким образом, некоторой постоянной скорости агрегации дисперсной системы, которая имеет одну и ту же величину при каждом новом измерении в процессе определения кривой течения. Поэтому квазиравновесное состояние течения тиксотропных систем также можно описывать некоторым реологическим уравнением в частности, обобщенным уравнением течения или его частным случаем – уравнением Кэссона.

Запишем обобщенное уравнение течения в виде

$$\tau^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2}}{1 + \chi/\dot{\gamma}^{1/2}} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (6)$$

Тогда для фиксированной скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , считая, что коэффициенты  $\eta_c$ ,  $\chi$  слабо изменяются при разрушении структуры со временем, запишем зависимость  $\tau^{1/2}(t)$ :

$$\tau^{1/2}(t) = A_1 e^{-\lambda t} + A_2, \quad (7)$$

$$\text{где } A_1 = \tau_c^{*1/2} \left[ \frac{\dot{\gamma}_2^{1/2}}{\dot{\gamma}_1^{1/2}} - 1 \right] / (1 + \chi / \dot{\gamma}^{1/2}), \quad (8)$$

$$A_2 = \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} + \tau_c^{*1/2} / (1 + \chi / \dot{\gamma}^{1/2}). \quad (9)$$

Строго говоря, эти выражения справедливы для пошагового увеличения скорости сдвига от  $\dot{\gamma}_1$  до  $\dot{\gamma}_2$ . Однако можно проверить уравнение (7) для

описания уменьшения напряжения сдвига со временем при произвольном начальном состоянии образца.

## 2. Гистерезис кривых течения

Типичным тиксотропным веществом является суспензия пигментов в воде или масле, т. е. краска. Рассмотрим кривые течения для некоторых водных дисперсий пигмента при 25 °С [4]. На рисунке 1 представлены различные кривые, полученные при увеличении и при уменьшении скорости сдвига. К сожалению, неизвестны такие условия измерения, как начальное состояние образца и время измерения каждой точки.

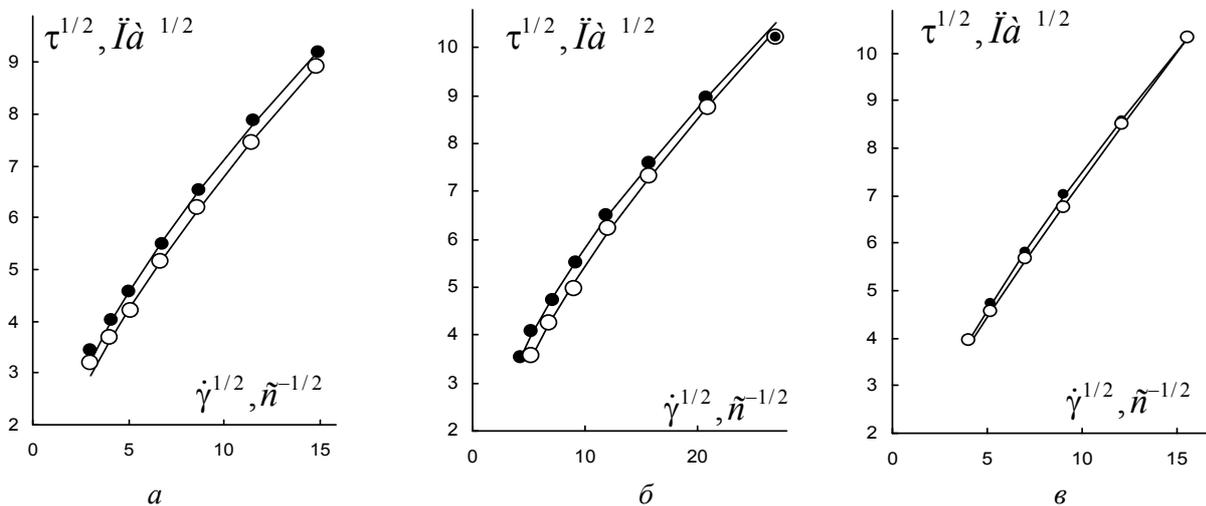


Рис. 1. Кривые течения водной дисперсии различных пигментов при увеличении скорости сдвига  $\uparrow$  (точки) и уменьшении скорости сдвига  $\downarrow$  (круги), построенные в корневых координатах:  $a$  – Casicolor Eco-Yellow Medium, стабильная дисперсия,  $b$  – Casicolor Ochre, стабильная;  $v$  – Casicolor Eco-Cherry Red, с выраженным оседанием.

Коэффициенты обобщенного уравнения течения указаны в табл. 1. Экспериментальные данные из [4]

Таблица 1. Коэффициенты обобщенного уравнения течения водной суспензии пигментов при увеличении ( $\uparrow$ ) и уменьшении ( $\downarrow$ ) скорости сдвига

Система	Eco-Yellow Medium		Ochre		Eco-Cherry Red	
$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	$\uparrow$ 5,49	$\downarrow$ 4,08	$\uparrow$ 5,02	$\downarrow$ 5,30	$\uparrow$ 5,09	$\downarrow$ 2,9
$\eta_c^{1/2}$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	$\uparrow$ 0,34	$\downarrow$ 0,39	$\uparrow$ 0,23	$\downarrow$ 0,23	$\uparrow$ 0,42	$\downarrow$ 0,5
$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	$\uparrow$ 4,51	$\downarrow$ 3,80	$\uparrow$ 4,21	$\downarrow$ 6,62	$\uparrow$ 5,12	$\downarrow$ 2,42
СКР	0,007	0,014	0,011	0,022	0,004	0,002
$\eta_c^{1/2}(0)$	1,55	1,46	1,42	1,03	1,41	1,70
$\tau_c^{1/2} / \chi$	1,22	1,07	1,19	0,80	0,99	1,19

Обсуждение результатов расчета приводит к следующим выводам.

**Casicolor Eco-Yellow Medium.** Аппроксимация проводилась при исключении первых точек при низкой скорости сдвига, чтобы учесть возможные неравновесные условия в начале эксперимента. Кривая  $\uparrow$  и кривая  $\downarrow$  достаточно хорошо описываются обобщенным уравнением течения. В оригинальной статье [4] все кривые течения аппроксимируются степенным законом (уравнением Оствальда), но расчетные кривые на рисунках не приведены.

Петля гистерезиса кривых течения не замкнута сверху но нижняя точка на кривой  $\downarrow$  попадает на расчётную кривую  $\uparrow$ . Таким образом, система возвращается в исходное состояние, близкое к равновесному состоянию, а течение, описываемое расчетной кривой  $\downarrow$ , можно считать квазиравновесным течением со значением  $\xi < 1$ .

Из таблицы 1 следует антибатность коэффициентов реологического уравнения, которая была ранее установлена для высокопарафинистой нефти, описываемой уравнением Кэссона [1]:

$$\tau_{\dot{\gamma}}^{1/2} \uparrow > \tau_c^{1/2} \downarrow, \eta_c^{1/2} \downarrow > \eta_c^{1/2} \uparrow. \quad (10)$$

Отсюда следует, что в опыте  $\uparrow$  преобладают большие агрегаты и выше структурная часть вязкости  $\tau_c^{1/2} / \chi$ . В опыте  $\downarrow$  преобладают малые агрегаты, структурная вязкость низкая. Сумма квадратов разностей  $\hat{NED} = \sum (\tau^{1/2} - \tau_{\dot{\gamma}}^{1/2})^2$  указана в табл. 1.

**Casicolor Ochre.** Аппроксимация проводилась при исключении последней точки при высокой скорости сдвига. Кривая  $\uparrow$  и кривая  $\downarrow$  достаточно хорошо описываются обобщенным уравнением течения. Петля гистерезиса кривых течения не замкнута снизу, но верхняя точка на кривой  $\uparrow$  попадает на расчетную кривую  $\downarrow$ . Таким образом, петля гистерезиса замыкается сверху. В отличие от системы Eco-Yellow Medium, здесь отсутствует антибатное соотношение коэффициентов, что, по-видимому, связано с большой величиной коэффициента  $\chi \downarrow$ ,

т. е. с большей компактностью агрегатов частиц в опыте  $\downarrow$ . Однако структурная часть вязкости  $\tau_c^{1/2} / \chi$  все же меньше в опыте  $\downarrow$ .

**Casicolor Eco-Cherry Red.** Аппроксимация проводилась при исключении первой точки при низкой скорости сдвига, чтобы учесть возможные неравновесные условия в начале эксперимента. Гистерезис выражен очень слабо. Из таблицы 1 следует антибатность двух коэффициентов реологического уравнения. Но значительное уменьшение коэффициента  $\chi \downarrow$ , связанное с «разрыхлением» агрегата частиц, приводит к увеличению структурной части вязкости  $\tau_c^{1/2} / \chi$ .

Можно видеть, что эти похожие суспензии пигментов имеют несколько отличающиеся характеристики течения, связанные в основном с изменением компактности агрегатов, т. е. с величиной коэффициента  $\chi$ .

Гистерезис течения проявляется в водных дисперсиях крахмала [5], как показано на рис. 2. Диапазон скоростей от 0 до 200 с<sup>-1</sup> сканировался 15 минут с увеличением и уменьшением скорости сдвига. Данные трех последовательных циклов использовались для оценки характера течения с помощью степенного закона, хотя на оригинальных графиках расчетные кривые не приведены. Такие условия измерения позволяют предположить, что кривая  $\uparrow$  представляет собой равновесное состояние течения, а кривая  $\downarrow$  соответствует квазиравновесному состоянию течения, где количество агрегированных частиц и размеры агрегатов меньше, чем в равновесном состоянии. Нами проведена аппроксимация по обобщенному уравнению течения. Для всех концентраций крахмала наблюдаются неравенства  $(\tau_c^{1/2} / \chi) \uparrow > (\tau_c^{1/2} / \chi) \downarrow$  и  $\eta_c^{1/2} \downarrow > \eta_c^{1/2} \uparrow$ . Это означает, что структурная вязкость уменьшается, а вязкость, обусловленная отдельными частицами, увеличивается при переходе от опыта  $\uparrow$  к опыту  $\downarrow$ .

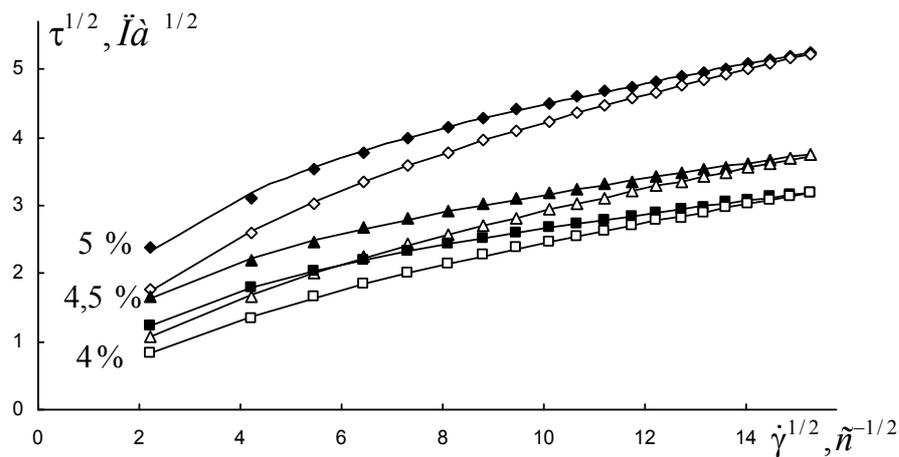


Рис. 2. Кривые течения водной дисперсии крахмала при 37 °С при увеличении скорости сдвига ↑ (закрытые символы) и уменьшении скорости сдвига ↓ (открытые символы), построенные в корневых координатах. Концентрация крахмала указана на графике. Коэффициенты обобщенного уравнения течения указаны в табл. 2. Данные из [5]

Таблица 2. Коэффициенты обобщенного уравнения течения водной суспензии крахмала при увеличении и уменьшении скорости сдвига

Концентрация	5 %		4,5 %		4 %	
$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	↑ 4,19	↓ 4,01	↑ 2,79	↓ 2,82	↑ 2,58	↓ 2,56
$\eta_c^{1/2}$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	↑ 0,10	↓ 0,13	↑ 0,085	↓ 0,108	↑ 0,068	↓ 0,092
$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	↑ 2,21	↓ 3,98	↑ 2,08	↓ 5,37	↑ 3,05	↓ 6,81
СКР	0,012	0,004	0,003	0,002	0,0009	0,0024
$\eta_c^{1/2}(0)$	2,0	1,14	1,42	0,632	0,91	0,469
$\tau_c^{1/2}/\chi$	1,9	1,01	1,34	0,524	0,85	0,38

### 3. Временная зависимость напряжения сдвига

В книге [6] приведены кривые  $\tau(t)$  для суспензии красного шлама (*red mud*) при концентрации 59 мас. % и различных фиксированных

скоростях сдвига. Предыстория образца неизвестна, но вероятно, что скорость сдвига последовательно увеличивалась с 3,5 с<sup>-1</sup> до 56 с<sup>-1</sup>. Кривые, показывающие зависимости  $\tau^{1/2}(t)$ , представлены на рис. 3.

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (7) для тиксотропной суспензии красного шлама

Коэффициенты	56 с <sup>-1</sup>	28 с <sup>-1</sup>	14 с <sup>-1</sup>		3,5 с <sup>-1</sup>	
$A_1$	0,487	0,868	1,174	0,604*	1,90	1,128*
$A_2$	5,46	5,01	4,47	4,25*	3,53	3,23*
$\lambda$	0,00212	0,00205	0,00436	0,000927*	0,00389	0,00130*
СКР	0,00040	0,00123	0,00655	0,000403*	0,00364	0,00179*
$A_2$ расщ.	5,48	4,93	4,39	4,39	3,27	3,27

Звездочкой обозначены значения, полученные отдельно для большого времени измерения (пунктирная линия на графиках). В нижней строке показаны значения коэффициента  $A_2$ , рассчитанные с помощью уравнения (9).

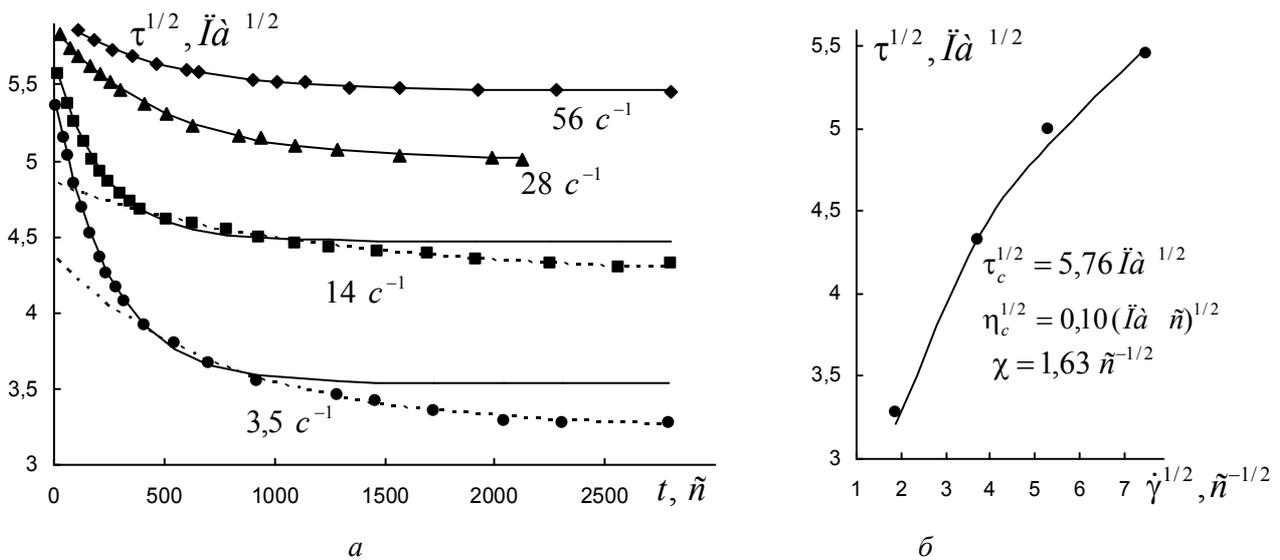


Рис. 3. Реологическое поведение тиксотропной суспензии красного шлама (*red mud*) при концентрации 59 мас. % и различных фиксированных скоростях сдвига: *a* – зависимость корня напряжения сдвига от времени; *б* – равновесная кривая течения суспензии, построенная в корневых координатах по установившимся значениям напряжения сдвига. Коэффициенты обобщенного уравнения течения указаны на графике. Коэффициенты уравнения (7) – в табл. 3. Экспериментальные данные из [6]

В статье [7] приведены экспериментальные кривые  $\tau(t)$  и  $\eta^{1/2}(\dot{\gamma}^{-1/2})$  для расплава металлсодержащего координационного полимера при 30 °С.

Вещество представляет собой нейтрализованные алифатические полиэфиры с карбоксилатами цинка (поли(DEG-SA) комплекс с  $\frac{1}{4} \text{Zn}^{2+}$ ).

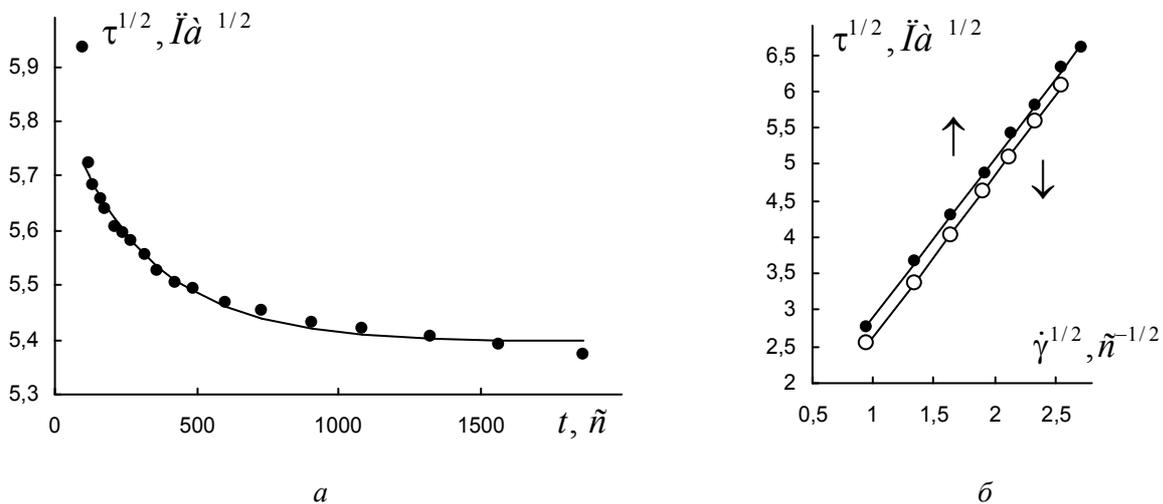


Рис. 4. Реологическое поведение тиксотропного расплава полимера – нейтрализованный поли(DEG-SA) комплекс с  $\frac{1}{4} \text{Zn}^{2+}$  при 30 °С: *a* – зависимость корня напряжения сдвига от времени при фиксированной скорости сдвига 5,5 с<sup>-1</sup>; *б* – кривые течения расплава полимера, построенные в корневых координатах. Обозначены точки, полученные при увеличении скорости сдвига ↑ (закрытые символы) и уменьшении скорости сдвига ↓ (открытые символы). Коэффициенты обобщенного уравнения течения и коэффициенты уравнения (7) приведены в табл. 4. Экспериментальные данные из [7]

Таблица 4. Коэффициенты обобщенного уравнения течения (6) для тиксотропного расплава металлосодержащего координационного полимера при увеличении и уменьшении скорости сдвига и коэффициенты уравнения (7)

Коэффициенты	$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	$\eta_c^{1/2}$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	СКР	$A_2$ , расч.
Кривая ↑	0,72	2,17	0	0,0074	5,81
Кривая ↓	0,42	2,20	0	0,0029	5,59
Кривая $\tau^{1/2}(t)$	$A_1$	$A_2$	$\lambda$	СКР	–
	0,446	5,40	0,00324	0,00221	–

Величина коэффициента  $A_2$ , расч. была рассчитана по уравнению (9) для опытов ↑ и ↓. Эти значения весьма близки к величине, полученной из уравнения (7).

Петля гистерезиса в принципе всегда замыкается сверху, если последняя точка в опыте ↑ одновременно является первой точкой в опыте ↓. Петля гистерезиса замыкается снизу, если точки кривой ↓ при низких значениях скорости сдвига приближаются к расчетной кривой ↑, которую тогда можно считать равновесной. Если структура системы в этих двух опытах не изменяется коренным образом, то петля гистерезиса может повторяться многократно с небольшими изменениями в серии опытов ↑↓↑↓.

Тиксотропные свойства наблюдаются в желеобразных углеводородных топливах. К ним относится система JP-8 с наполнителем в виде оксида кремния, размеры частиц 0,2–0,3 мкм. Реологические свойства подобных систем описаны в [8]. Изменение напряжения сдвига со временем показано на рис. 5. Коэффициенты уравнения (7) представлены в табл. 5. Тиксотропное поведение объясняется авторами оригинальной статьи разрушением сетки частиц SiO<sub>2</sub>, образованной водородными связями.

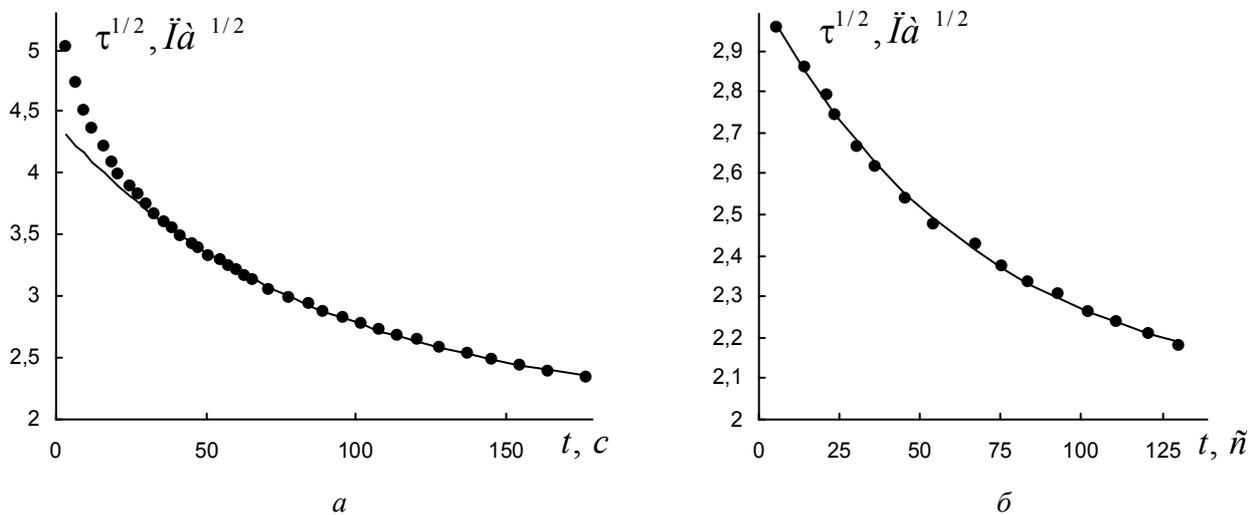


Рис. 5. Реологическое поведение тиксотропного геля (оксид кремния в углеводородном топливе JP-8) при концентрации 4 мас. % SiO<sub>2</sub> при фиксированной скорости сдвига 1000 с<sup>-1</sup> и температуре 25 °С: а – зависимость корня напряжения сдвига от времени для исходного образца; б – зависимость корня напряжения сдвига от времени после периода покоя 8 минут (б). Коэффициенты уравнения (7) в табл. 5. Экспериментальные данные из [8]

Таблица 5. Коэффициенты уравнения (7) для тиксотропного геля 4 мас. % SiO<sub>2</sub>

Коэффициенты	$A_1$	$A_2$	$\lambda$	СКР
Исходный образец	2,34	2,07	0,012	0,0042
Образец после состояния покоя 8 мин	0,99	2,05	0,015	0,0015

Уравнение (7) не способно аппроксимировать весь временной интервал, но оно хорошо описывает экспериментальные данные при значениях выше 30 сек. В общем, напряжение сдвига снижается до 5,25 Па (0,02 Па с).

В период покоя структура восстанавливается, что приводит к увеличению вязкости до значе- ний около 0,025 Па с. Новое ступенчатое прило- жение скорости сдвига 1000 с<sup>-1</sup> приводит к даль- нейшему уменьшению напряжения сдвига, харак- тер которого полностью описывается уравнением (7).

#### 4. Незамкнутая петля гистерезиса кривых течения

На рисунке 6 показано реологическое пове- дение [9] тройной системы алкилдиметиллоксид / спирт / вода при увеличении и уменьшении скоро- сти сдвига. Эта коллоидная система включает в се- бя везикулярные структуры.

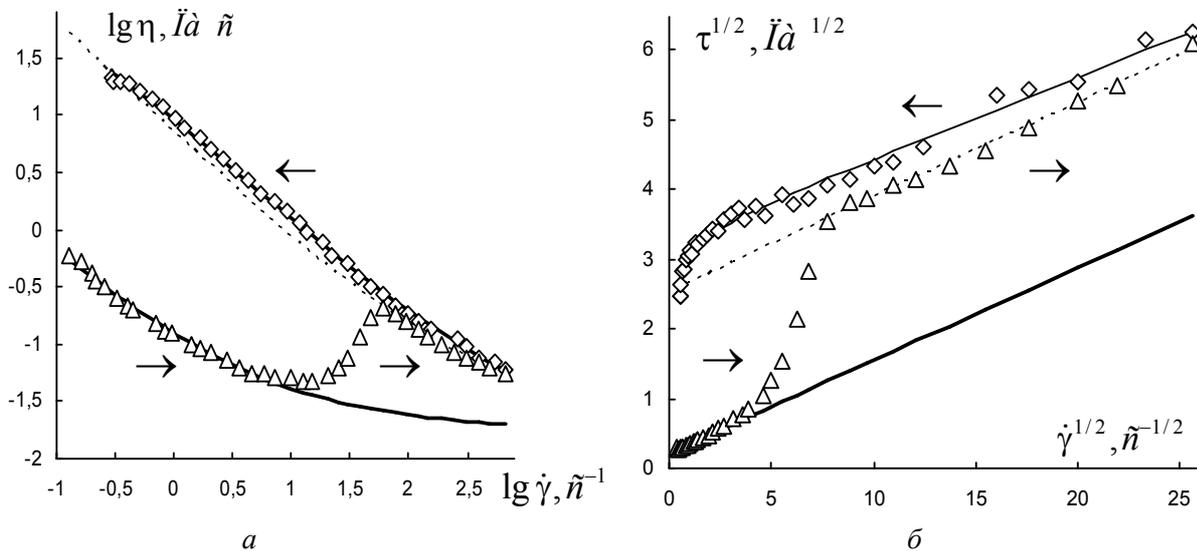


Рис. 6. Реологическое поведение тиксотропной системы алкилдиметиллоксид /спирт/ вода: а – зависимость вязкости от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах; б – кривые течения в корневых координатах. Коэффициенты обобщенного уравнения течения указаны в табл. 6. Экспериментальные данные из [9, рис. 3. 41]

Таблица 6. Коэффициенты обобщенного уравнения течения (6) для тройной системы алкилдиметиллоксид/спирт/вода при увеличении и уменьшении скорости сдвига. Период сканирования по скорости сдвига 20 мин. T = 25 °C

Коэффициенты	$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	$\eta_c^{1/2}$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	СКР
Кривая ↑, низкие скорости	0,220	0,133	0	0,0013
Кривая ↑, высокие скорости	2,524	0,136	0	0,0347
Кривая ↓	3,326	0,115	0,152	0,4484

Петля гистерезиса не замкнута снизу, поскольку происходит переход от одного режима течения к другому через переходный участок сдвигового затвердевания.

Реологическое поведение высококонцентрированной эмульсии «вода в масле» описано в [10] и представлено на рис. 7. Петля гистерезиса не замкнута снизу, поскольку изменяется структура

системы. На полном интервале скоростей сдвига присутствуют несколько режимов течения. На кривой ↑ наблюдается ньютоновское течение при низких скоростях. Имеются два отдельных режима при более высоких скоростях сдвига, каждый из которых описывается обобщенным уравнением течения с разными значениями коэффициентов (сплошная и пунктирная линии на рис. 7).

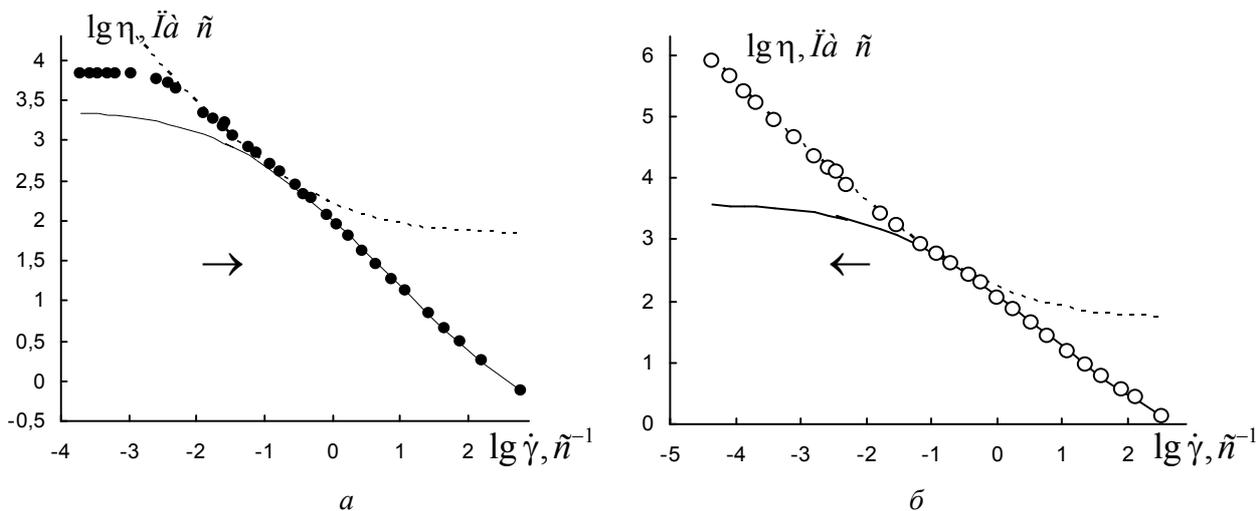


Рис. 7. Реологическое поведение высококонцентрированной 95 мас. % эмульсии «вода в масле»: зависимость вязкости от скорости сдвига при увеличении скорости ↑ (точки) и уменьшении скорости ↓ (кружки). Коэффициенты обобщенного уравнения течения указаны в табл. 7. Экспериментальные данные из [10]

Таблица 7. Коэффициенты обобщенного уравнения течения (6) для высококонцентрированной эмульсии «вода в масле» при увеличении и уменьшении скорости сдвига

Коэффициенты	$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	$\eta_c^{1/2}$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	СКР
Кривая ↑, низкие скорости	4,63	8,13	0	2,04
Кривая ↑, высокие скорости	12,09	0,38	0,245	0,871
Кривая ↓, низкие скорости	5,85	7,15	0	0,062
Кривая ↓, высокие скорости	12,76	0,487	0,208	1,28

#### Список литературы / References

1. Kirsanov E. A., Remizov S. V. Application of the Casson model to thixotropic waxy crude oil // Rheol. Acta. 1999. Vol. 38. P. 172–176.
2. Кирсанов Е. А., Бобров В. И. Реологические характеристики углеводородных пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2005. Вып. 1–2. С. 23–30. [Kirsanov E. A., Bobrov V. I. Reologicheskie kharakteristiki uglevodorodnykh plastichnykh smazok (Rheological properties of hydrocarbon plastic oils) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie. (Liq. Cryst & Appl.). 2005. Iss. 1–2. P.23–30 (in Russian)].
3. Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. I. Теория равновесного и неравновесного состояния течения // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2012. Вып. 3. С. 79–89. [Kirsanov E. A. Nen'yutonovskoe techenie strukturirovannykh sistem. I. Teoriya ravnovesnogo i neravnesnogo sostoyaniya techeniya (Non-Newtonian flow of structured systems. I. Theory of equilibrium state flow and non-equilibrium state flow) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie. (Liq. Cryst & Appl.). 2012. Iss. 3. P. 79–89 (in Russian)].

- 
- 
4. *Niculescu O., Lega M.* Prediction of performances of some aqueous pigment dispersions leather finishing // *Rev. Chim. (Bucureti)*. 2007. Vol. 58, № 4. P. 276–282.
  5. *Meng Y., Rao M. A.* Rheological and structural properties of colwater-swelling and heated cross-linked waxy maize starch dispersions prepared in apple juice and water // *Carbohydrate Polymers*. 2005. Vol. 60. P. 291–300.
  6. *Chhabra R. P., Richardson J. F.* Non-Newtonian Flow in the Process Industries. *Fundamentals and Engineering Applications*. Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 1999. 436 p.
  7. *Liu G., White B., Vancso-Szmercsanyi I., Vancso G. J.* Thixotropic behavior of metal-containing coordination polymers: melt viscosity of neutral aliphatic polyesters with Zn carboxylates // *J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Physics*. 1996. Vol. 34. P. 277–282.
  8. *Santos P. H. S., Carignano M. A., Campanella O. H.* Qualitative study of thixotropy in gelled hydrocarbon fuels // *Engineer. Lett.* Vol. 19, № 1. P. 1–7.
  9. *Малкин А. Я., Исаев А. И.* Реология : концепции, методы, приложения / пер. с англ. СПб. : Профессия, 2007. 560 с. [*Malkin A. Ya., Isayev Av. I.* Rheology: conceptions, methods, applications. ChemTec Publishing, Toronto, Canada, 2006. 474 p.]
  10. *Masalova I., Малкин А. Я.* Высококонцентрированные эмульсии. Особенности реологических свойств и течения – роль концентрации и размера капель // *Коллоидный журнал*. 2007. Т. 69, № 2. С. 206–219. [*Masalova I., Malkin A. Y.* Peculiarities of rheological properties and flow of highly concentrated emulsions: The role of concentration and drop-let size // *Colloid Journal*. 2007. Vol. 69. № 2. P. 185–197].

Поступила в редакцию 24.06.2014 г.