

**Научная статья**

УДК 541.64:532.783

**НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ.  
XXXIII. МОДЕЛЬ СДВИГОВОГО ЗАТВЕРДЕВАНИЯ**

Михаил Петрович Вековищев\*, Евгений Александрович Кирсанов

*Государственный социально-гуманитарный университет, Коломна, Московская область, Россия*

---

**И Н Ф О Р М А Ц И Я**

**История статьи:**

Поступила 19.01.2022

Одобрена 20.02.2022

Принята 25.02.2022

---

**Ключевые слова:**

реология,  
сдвиговое затвердевание,  
структурная реологическая  
модель,  
раствор полимера,  
высококонцентрированная  
сuspензия

**А Н Н О Т А Ц И Я**

Предложена структурная реологическая модель для описания сдвигового затвердевания в структурированных системах, а именно, в концентрированных суспензиях, мицеллярных растворах и в растворах ассоциированных полимеров. Причиной сдвигового затвердевания является возникновение структуры под действием сдвига в результате столкновения частиц или макромолекул. При этом увеличивается сила сцепления между частицами или макромолекулами. Интегральной характеристикой структуры является суммарное количество агрегированных частиц. Кинетическое уравнение, описывающее процесс формирования/разрушения агрегатов на участке сдвигового затвердевания, содержит четыре константы скорости и приводит к реологическому уравнению с двумя коэффициентами. Аппроксимация уравнениями структурной реологической модели выполнена для раствора ассоциированного полимера и для суспензии частиц, между которыми могут образовываться водородные связи.

---

**DOI:**

**10.18083/LCAppl.2022.2.53**

---

**Для цитирования:**

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. XXXIII. Модель сдвигового затвердевания // Жидк. крист. и их практич. использ. 2022. Т. 22, № 2. С. 53–63.

---

\* Автор для переписки: [mpv.71@mail.ru](mailto:mpv.71@mail.ru)

© Вековищев М. П., Кирсанов Е. А., 2022

**Research Article**

**NON-NEWTONIAN FLOW OF STRUCTURED SYSTEMS.  
XXXIII. SHEAR THICKENING MODEL**

Mikhail P. Vekovishchev\*, Evgeniy A. Kirsanov

*State University of Humanities and Social Studies, Kolomna, Moscow Region, Russia*

---

**ARTICLE INFO:**

**Article history:**

Received 19 January 2022

Approved 20 February 2022

Accepted 25 February 2022

---

**Key words:**

rheology,  
shear thickening,  
structural rheological model,  
polymer solution,  
highly concentrated  
suspension

---

**A B S T R A C T**

A structural rheological model for describing shear thickening in structured systems, namely, in concentrated suspensions, micellar solutions, and in solutions of associated polymers has been proposed. The cause of shear thickening is the appearance of a structure under the action of shear due to collision of particles or macromolecules. This increases the strength of adhesion between particles or macromolecules. An integral characteristic of the structure is the total number of aggregated particles. The kinetic equation describing the process of formation/destruction of aggregates during the shear thickening contains four rate constants and leads to the rheological equation with two coefficients. The approximation by the equations of the structural rheological model for associated polymer solution and for suspension of particles, between which hydrogen bonds can form, is performed.

---

**DOI:**

**10.18083/LCAppl.2022.2.53**

---

**For citation:**

Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A. Non-newtonian flow of structured systems. XXXIII. Shear thickening model. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (2), 53–63 (in Russ.).

---

\* Corresponding author: mpv.71@mail.ru

© Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A., 2022

## Введение

Явление сдвигового затвердевания (С-З) было обнаружено в концентрированных суспензиях твердых частиц, диспергированных в ньютоновской жидкости. Явление С-З представляет собой увеличение сдвиговой вязкости  $\eta$  при увеличении скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . Сдвиговое затвердевание (С-З) начинается при превышении некоторого критического значения скорости сдвига  $\dot{\gamma}_s$ . Предполагалось, что частицы суспензии не способны к агрегации в отсутствии течения (стабилизированные суспензии). Явление С-З обычно происходит на конечном и довольно малом участке средних скоростей сдвига, ниже которого наблюдается сдвиговое разжижение (С-Р) или участок ньютоновского течения с постоянной вязкостью. После завершения явления С-З при более высоких скоростях появляется новый участок С-Р. Увеличение вязкости  $\eta$  со скоростью сдвига  $\dot{\gamma}$  может происходить как постепенно, так и скачкообразно при достижении определенной скорости сдвига [1].

Были предложены два основных механизма сдвигового затвердевания. Они связаны с наблюдаемым изменением структуры суспензии при начале С-З. Хоффман [2] предположил, что при низких скоростях сдвига существуют упорядоченные слои частиц с гексагональным порядком внутри слоев. При достаточно высокой скорости происходит деформация слоев. В результате происходит переход от упорядоченного состояния к беспорядочному состоянию, что проявляется в увеличении вязкости.

Другой механизм объясняет явление С-З формированием гидродинамического кластера [3]. Такой кластер представляет собой группировку частиц, которые сближаются в результате действия особых гидродинамических сил, величина которых пропорциональна скорости сдвига. Этому сближению препятствуют электростатические отталкивающие силы и броуновское движение частиц.

В работе [4] было показано, что интервал сдвигового затвердевания в суспензиях твердых частиц соответствует переходу от одного режима течения (при низких скоростях сдвига) к другому режиму течения (при высоких скоростях). Коэффициенты реологического уравнения (обобщенного уравнения течения) изменяются в результате изменения условий на контактах между частицами, возможно, вследствие увеличения скорости

столкновения частиц. Коэффициенты обобщенного уравнения течения изменяются при переходе от режима низких скоростей к режиму высоких скоростей следующим образом: коэффициент агрегации  $\tau_c^{1/2}$  существенно увеличивается; коэффициент вязкости Кессона  $\eta_c^{1/2}$  незначительно увеличивается или остается постоянным. В рамках структурной реологической модели [5] подобное изменение коэффициентов означает увеличение силы сцепления между частицами.

Судя по литературным данным, явление С-З наблюдается практически в любых суспензиях (дисперсиях) независимо от ее характера: в коллоидных системах частиц малых размеров с броуновским движением; в неколлоидных системах с частицами большого размера, где броуновское движение отсутствует; в системах, где электростатическое отталкивание или адсорбированные макромолекулы препятствуют прямому контакту частиц; в агрегированных системах, где возможны коагуляционные или прямые контакты (во втором или первом минимумах энергии взаимодействия частиц); в дисперсных системах, где имеется или отсутствует тиксотропное поведение. Явление С-З наблюдается на промежуточном интервале скоростей сдвига между районом сдвигового разжижения или ньютоновского течения и районом высоких скоростей, где наблюдается сдвиговое разжижение или иногда «срыв течения». На интервале С-З возможно монотонное увеличение вязкости до некоторой предельной величины и/или скачкообразное увеличение вязкости.

В представленной статье мы рассматриваем явление сдвигового затвердевания в некоторых системах и предлагаем его интерпретацию с точки зрения структурной реологической модели [5].

## Структурно-кинетическая модель сдвигового затвердевания

В рамках структурной реологической модели [5] явление сдвигового затвердевания представляет собой переходное состояние от одного режима сдвигового течения к другому. При этом постепенно изменяются коэффициенты обобщенного уравнения течения (ОУТ) в результате изменения условий на контактах частиц суспензии. В итоге образуются агрегаты большого размера, возможно, за счет увеличения прочности контакта частиц при

более интенсивных столкновениях в случае высоких скоростей сдвига. Это подтверждается увеличением коэффициента агрегации  $\tau_c^{1/2}$ , пропорционального силе сцепления и некоторым увеличением предельной вязкости (коэффициента вязкости Кэссона)  $\eta_c^{1/2}$ , поскольку ее величина увеличивается при увеличении размеров первичных единиц течения.

Сдвиговое разжижение (C-P) описывается обобщенным уравнением течения (ОУТ), полученным в рамках структурной реологической модели [5]:

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

Физический смысл коэффициентов реологического уравнения описан в рамках структурной реологической модели.

При изучении реологических кривых в корневых координатах можно выделить характерные особенности кривых течения. На участках высоких и низких скоростей сдвига хорошая аппроксимация достигается с помощью ОУТ. На участке средних скоростей сдвига можно выделить прямолинейный участок зависимости  $\tau^{1/2}$  ( $\dot{\gamma}^{1/2}$ ), для которого можно предложить эмпирическое уравнение вида

$$\tau^{1/2} = \eta_{cv}^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} - \tau_{cv}^{1/2}. \quad (2)$$

Чтобы описать сдвиговое затвердевание, необходимо использовать в реологической модели кинетическое уравнение, включающее процесс агрегирования частиц под действием сдвига.

Для этого введем в кинетическое уравнение, описанное ранее [5], новую константу  $\tilde{k}_3$  скорости объединения частиц в агрегаты в результате столкновений частиц при сдвиговом течении. Тогда скорость формирования агрегатов под действием сдвига равна  $\tilde{k}_3 \dot{\gamma}^{1/2} N_1$ .

Кинетическое уравнение формирования/разрушения агрегатов запишем в виде

$$\frac{dN_2}{dt} = \tilde{k}_2 N - \tilde{k}_0 N_2 - \tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2} N_2 + \tilde{k}_3 \dot{\gamma}^{1/2} N_1, \quad (3)$$

где  $N_2$  – количество агрегированных частиц,  $N_1$  – индивидуальных частиц,  $N$  – полное число частиц в единице объема,  $\tilde{k}_2$  – константа скорости формирования агрегатов,  $\tilde{k}_0$  – константа скорости разрушения агрегатов,  $\tilde{k}_1$  – константа скорости разрушения агрегатов под действием растягивающих гидродинамических сил. Скорость разрушения агрегатов под действием сдвига равна ( $\tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2} N_2$ ).

Подставляя  $N_2 = N - N_1$ , при условии равновесия  $dN_2 / dt = 0$  получим уравнение равновесного состояния

$$\frac{N_1}{N} = \frac{\tilde{k}_0 - \tilde{k}_2 + \tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2}}{\tilde{k}_3 \omega^{1/2} + \tilde{k}_0 + \tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2}}. \quad (4)$$

Используем уравнение для сдвиговой вязкости в виде

$$\eta^{1/2} = \eta_\infty^{1/2} + BN_2 = \eta_\infty^{1/2} + BN - BN_1, \quad (5)$$

где  $B$  – некоторая положительна постоянная.

После подстановки  $N_1$  из (4) получим

$$\eta^{1/2} = \eta_\infty^{1/2} + BN - BN \frac{\tilde{k}_0 - \tilde{k}_2 + \tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2}}{\tilde{k}_0 + \tilde{k}_3 \dot{\gamma}^{1/2} + \tilde{k}_1 \dot{\gamma}^{1/2}}. \quad (6)$$

При условии  $\dot{\gamma}^{1/2} (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1) / \tilde{k}_0 \gg 1$  получим уравнение вида

$$\eta^{1/2} \approx (\eta_\infty^{1/2} + BN \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1}) - BN \frac{(\tilde{k}_0 - \tilde{k}_2)}{(\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1) \dot{\gamma}^{1/2}}. \quad (7)$$

Это уравнение справедливо при скорости сдвига

$$\dot{\gamma} \gg \left( \frac{\tilde{k}_0}{\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1} \right)^2.$$

Перепишем уравнение (7), вводя напряжение сдвига, в виде

$$\tau^{1/2} \approx (\eta_\infty^{1/2} + BN \frac{\tilde{k}_3}{\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1}) \dot{\gamma}^{1/2} - BN \frac{(\tilde{k}_0 - \tilde{k}_2)}{(\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1)}. \quad (8)$$

Таким образом, получим значения коэффициентов эмпирического уравнения (2)

$$\eta_{cv}^{1/2} = \eta_\infty^{1/2} + BN \tilde{k}_3 / (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1);$$

$$\tau_{cv}^{1/2} = BN (\tilde{k}_0 - \tilde{k}_2) / (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1).$$

Коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  является положительным, если  $\tilde{k}_0 > \tilde{k}_2$ , и отрицательным, если  $\tilde{k}_0 < \tilde{k}_2$ . Величина  $\tau_{cv}^{1/2}$  меньше или сравнима с величиной коэффициента  $\eta_{cv}^{1/2}$ .

### Аппроксимация реологических кривых

Рассмотрим реологическое поведение ассоциированных водорастворимых полимеров, а именно, полиакриловой кислоты (PAA) с «привитыми» гидрофобными группами [6]. Гидрофобно модифицированная полиакриловая кислота обозначается как НМРАА. Обозначение НМРАА3%250kC18 означает, например, что в полиакриловой кислоте с молекулярной массой 250000 г/моль 3 % карбоксильных групп замещены *n*-октадециламином на боковых группах основной цепи. Молекулярные клубки полимера в водном

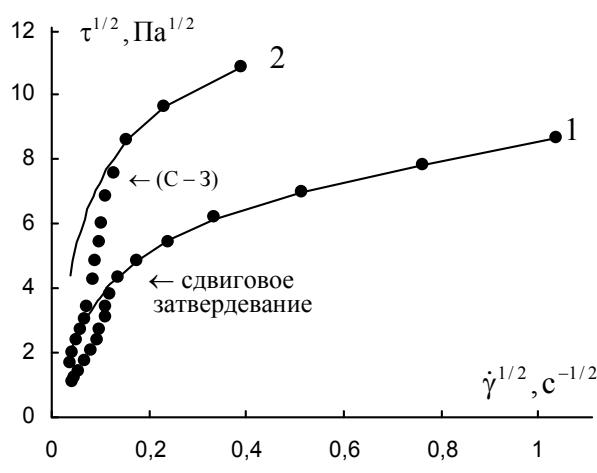
растворе перекрываются при увеличении концентрации. Предполагается, что гидрофобное взаимодействие существует, в основном, внутри молекулярного клубка и в небольшой степени между соседними макромолекулами при перекрывании клубков. Таким образом, в водном растворе ассоциированного полимера существуют два вида контактов между макромолекулами: обычные топологические зацепления и взаимодействующие гидрофобные группы. Образование «гидрофобных» кластеров макромолекул приводит к увеличению сдвиговой вязкости раствора.

В работе [6] вязкость измерена вискозиметром с ячейкой «конус-плоскость» и контролируемым напряжением сдвига при 25 °C. Эксперимен-

тальные данные показаны на рис. 1.

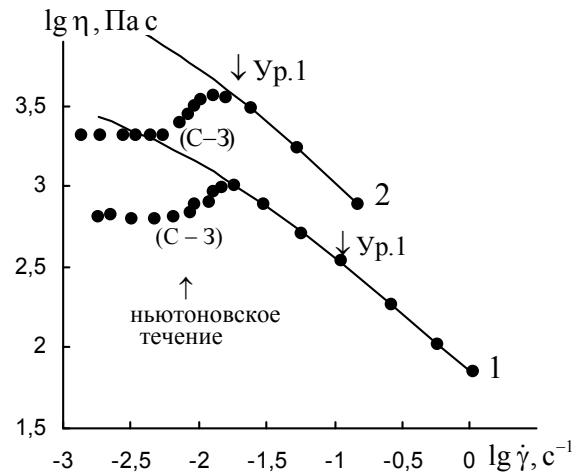
Добавление в раствор НМРАА поверхно-стно-активного вещества додецилсульфата натрия (SDS) приводит к увеличению вязкости. При этом сохраняется характер реологических кривых, где наблюдаются три режима течения: ньютоновское, C-3 и C-P. Авторы [6] объясняют увеличение вязкости при добавлении SDS образованием смешанных кластеров, содержащих сурфактант SDS и боковые алкильные группы.

Для выбора интервалов аппроксимации уравнениями структурной модели удобно представить данные в двойных логарифмических и в корневых координатах (рис. 1 и 2).



*Rис. 1. Реологическое поведение водного раствора 2 мас. % полимера НМРАА3%250кС18:  
 а – в корневых координатах; б – в двойных логарифмических координатах.*

Кривые 1 – без добавления SDS, кривые 2 – при добавлении SDS (молярное отношение SDS к гидрофобным боковым группам SDS:C18 = 1:1)



*Fig. 1. Rheological behavior of aqueous solution of polymer HMPAA3%250kC18 (2 wt. %):*

*a – in root coordinates, b – in double logarithmic coordinates.*

*Curves 1 – no addition of SDS, curves 2 – with addition of SDS (molar ratio of SDS to hydrophobic side groups SDS:C18 = 1:1)*

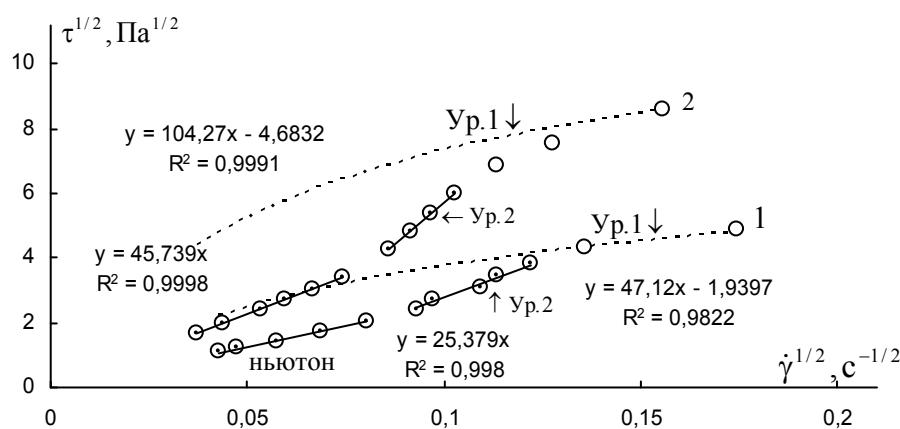


Рис. 2. Кривые течения в корневых координатах при низких скоростях сдвига водного раствора полимера HMPAA3%250kC18 (2 мас. %): 1 – без добавления SDS, 2 – при добавлении SDS (молярное отношение SDS к гидрофобным боковым группам SDS:C18 = 1:1)

Fig. 2. Flow curves in root coordinates at low shear rates of aqueous solution of polymer HMPAA3%250kC18 (2 wt. %): 1 – no addition of SDS, 2 – with addition of SDS (molar ratio of SDS to hydrophobic side groups SDS:C18 = 1:1)

При высоких скоростях сдвига справедливо уравнение (1). При очень низких скоростях течение имеет ньютоновский характер. В промежуточном районе скоростей сдвига можно использовать уравнение (2). Коэффициенты реологических

уравнений представлены в таблице.

Добавление в раствор НМРАА соли (NaCl) при небольшой концентрации приводит к увеличению вязкости, а при большой концентрации – к уменьшению (рис. 3).

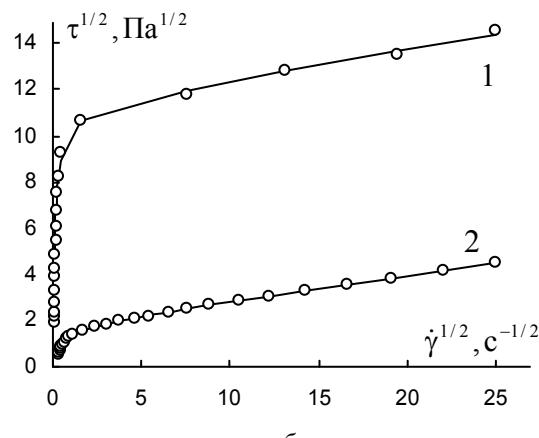
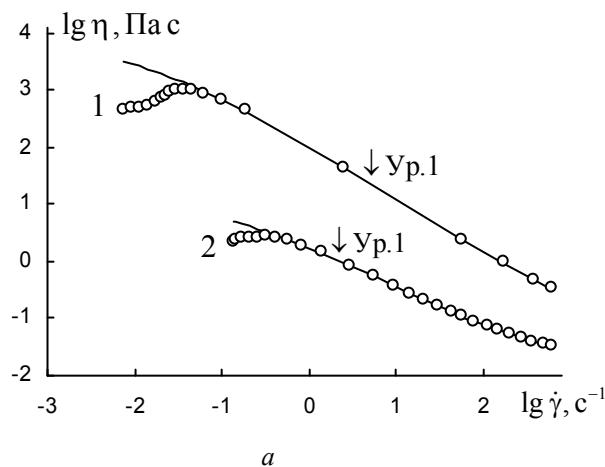
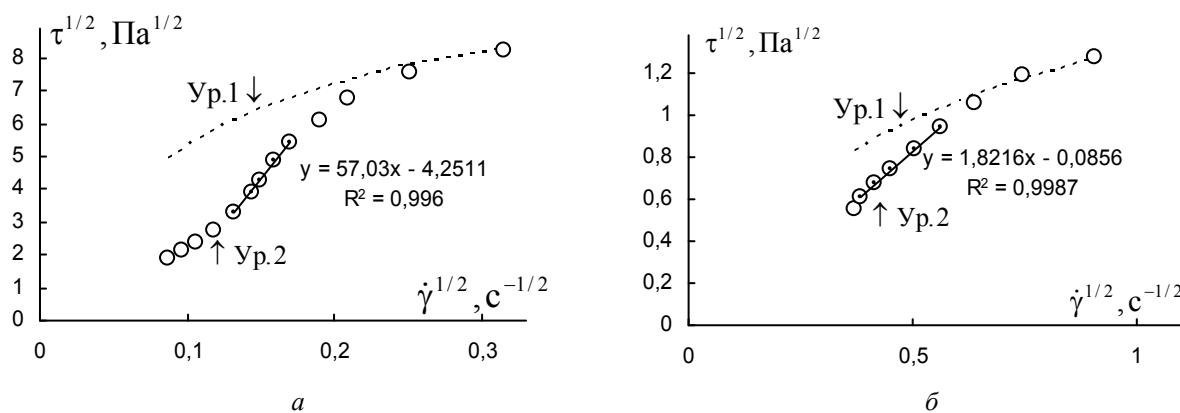


Рис. 3. Реологическое поведение водного раствора полимера HMPAA3%250kC18 (2 мас. %), pH = 7.  
 Концентрация NaCl: 1 – 0,1 М; 2 – 1 М.  
 а – в двойных логарифмических координатах; б – в корневых координатах

Fig. 3. Rheological behavior of aqueous solution of polymer HMPAA3%250kC18 (2 wt. %), pH = 7.  
 Concentration of NaCl: 1 – 0,1 M; 2 – 1 M.  
 a – in double logarithmic coordinates; b – in root coordinates



*Рис. 4.* Кривые течения водного раствора полимера HMPAA3%250kC18 (2 мас. %) при pH = 7 в корневых координатах при низких скоростях сдвига и концентрации NaCl: *a* – 0,1 М; *б* – 1 М

*Fig. 4.* Flow curves of aqueous solution of polymer HMPAA3%250kC18 (2 wt. %) at pH = 7 in root coordinates at low shear rates at concentration of NaCl: *a* – 0.1 M, *b* – 1 M

Таблица. Реологические характеристики растворов полимеров и суспензий: коэффициенты реологических уравнений 1 и 2, значения ньютоновской вязкости (система СИ)

Table. Rheological characteristics of polymer solutions and suspensions: coefficients of rheological equations 1 and 2, values of Newtonian viscosity (SI system)

Раствор полимера	$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	$\chi$	$\eta_V^{1/2}$	$\tau_{CV}^{1/2}$	$\eta_N$
HMPAA3%250kC18	6,97	2,20	0,098	47,1	1,94	644,1
HMPAA3%250kC18 SDS:C18 = 1:1	11,4	2,52	0,061	104,3	4,68	2092,1
HMPAA3%250kC18; 0,1 M NaCl	11,1	0,13	0,11	57,0	4,25	–
HMPAA3%250kC18; 1 M NaCl	1,74	0,11	0,45	1,82	0,086	–
стекло в смеси глицерин / вода; 0,57	190,2	12,5	2,08	80,39	92,2	62,79
стекло в смеси глицерин / вода; 0,55	169,5	11,3	10,5	44,40	71,1	45,21
SiO <sub>2</sub> в смеси глицерин / вода; 0,598	высокие скорости			282,9	131,0	–
	низкие скорости			173,5	60,2	–
SiO <sub>2</sub> в смеси глицерин / вода; 0,562	высокие скорости			40,9	31,3	55,0
	низкие скорости			45,5	37,1	
SiO <sub>2</sub> в смеси глицерин / вода; 0,524	весь интервал			15,9	7,9	30,2

Явление С-З можно объяснить как постепенный переход от внутренних гидрофобных связей внутри макромолекулы к гидрофобным связям между соседними макромолекулами в процессе деформации и разворачивания макромолекул при высоких скоростях сдвига. При низких скоростях сдвига ньютоновское течение можно объяснить неизменным состоянием структуры: разрыв гидрофобных контактов и разрыв зацеплений уравновешивается их непрерывным возникновением за-

счет теплового движения. После превышения некоторой критической скорости начинается образование контактов между гидрофобными группами соседних макромолекул.

Вязкость увеличивается в результате увеличения количества макромолекул в ассоциатах в соответствии с уравнением (2). Физической причиной С-З является увеличение гидрофобных контактов между макромолекулами; в кинетическом уравнении этот процесс представлен с помощью

скорости формирования ассоциатов под действием сдвига  $\tilde{k}_3 \dot{\gamma}^{1/2} N_1$ . До и после участка С-З величину константы скорости  $\tilde{k}_3$  можно считать нулевой. На интервале высоких скоростей сдвига можно использовать уравнение (1), которое соответствует процессу постепенного разрыва как гидрофобных контактов, так и зацеплений.

В работе [3] рассмотрены особенности сдвигового затвердевания различных дисперсных систем, изученных в вискозиметре с контролируемой

скоростью сдвига в ячейке коаксиальных цилиндров при температуре 20 °C. Все дисперсии электростатически стабилизированы.

На рисунке 5 представлено реологическое поведение суспензии стеклянных частиц в смеси глицерин / вода (86,1 мас. % глицерина). Вязкость смеси  $\eta_0 = 0,140$  Па с. Стеклянные частицы имели в основном сферическую форму со средним диаметром 2,4 мкм,  $\zeta$ -потенциал равен 75 мВ. Необходимо учитывать, что на графиках указана относительная вязкость суспензии.

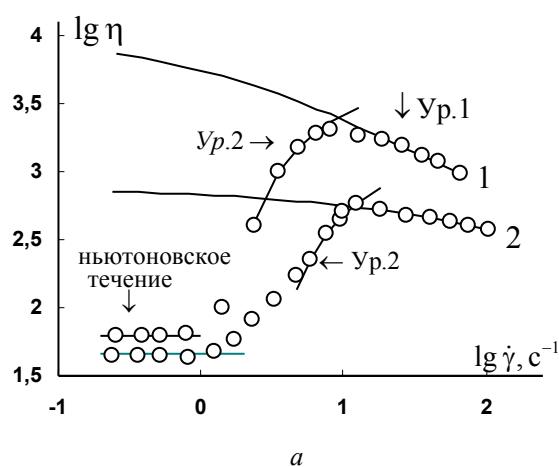


Рис. 5. Реологическое поведение суспензии стеклянных частиц в смеси глицерин/вода:  
 $a$  – в двойных логарифмических координатах,  $b$  – в корневых координатах.  
Объемная концентрация дисперсной фазы: 0,57 – кривые 1 и 0,55 – кривые 2

Fig. 5. Rheological behavior of the suspension of glass particles in glycerin/water mixture:  
 $a$  – in double logarithmic coordinates,  $b$  – in root coordinates.  
Volume concentration of the dispersed phase: 0.57 – curves 1, 0.55 – curves 2.

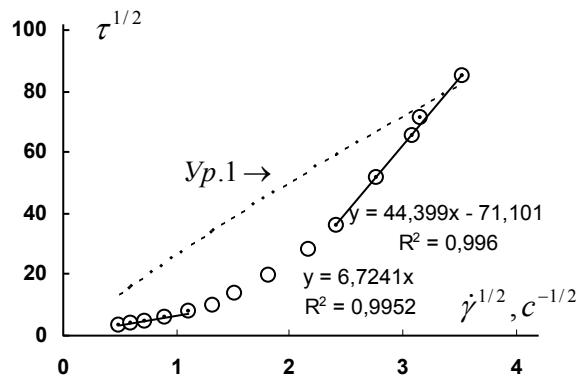
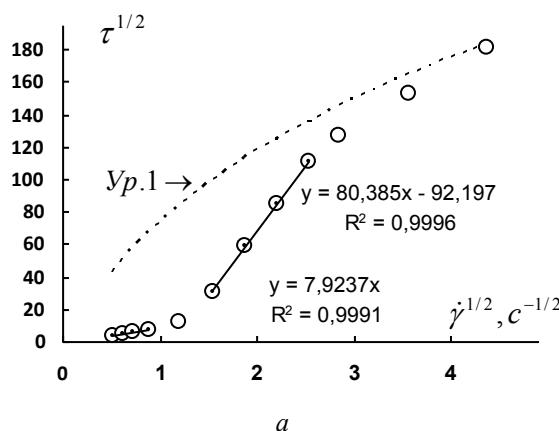
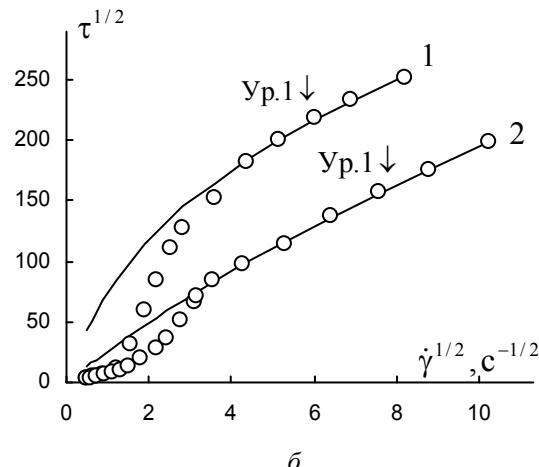


Рис. 6. Кривые течения суспензии стеклянных частиц в смеси глицерин/вода в корневых координатах при низких скоростях сдвига. Объемная концентрация дисперсной фазы:  $a$  – 0,57 и  $b$  – 0,55

Fig. 6. Flow curves of the suspension of glass particles in glycerin/water mixture in root coordinates at low shear rates.  
Volume concentration of the dispersed phase:  $a$  – 0.57,  $b$  – 0.55

На графиках хорошо видны участки сдвигового затвердевания. Более наглядно результаты аппроксимации экспериментальных данных при низких скоростях представлены в корневых координатах (рис. 6). Коэффициенты реологических уравнений приведены в таблице.

Также в работе [3] представлено реологическое поведение дисперсии частиц оксида кремния в смеси глицерин/вода. Частицы имеют форму, близкую к сферической. Суспензия практически

монодисперсная со средним диаметром частиц 1,91 мкм,  $\zeta$ -потенциал равен 50 мВ.

На рисунке 7, а показана зависимость относительной вязкости от скорости сдвига, причем практически на всем интервале скоростей наблюдается сдвиговое затвердевание. При очень низких скоростях сдвига можно говорить о тенденции к ньютоновскому течению с постоянной вязкостью  $\eta_N$ .

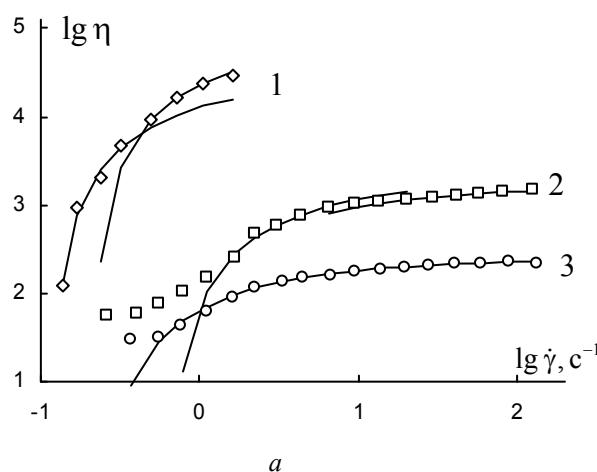


Рис. 7. Реологическое поведение суспензии  $\text{SiO}_2$  в смеси глицерин/вода: а – в двойных логарифмических координатах (объемная концентрация дисперсной фазы: 1 – 0,598; 2 – 0,562; 3 – 0,524), б – в корневых координатах при концентрации 0,598

Fig. 7. Rheological behavior of the suspension of  $\text{SiO}_2$  in glycerin/water mixture: а – in double logarithmic coordinates (volume concentration of the dispersed phase: 1 – 0.598; 2 – 0.562; 3 – 0.524), б – in root coordinates at concentration of 0.598

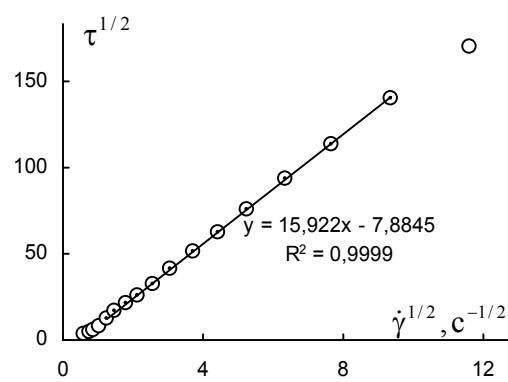
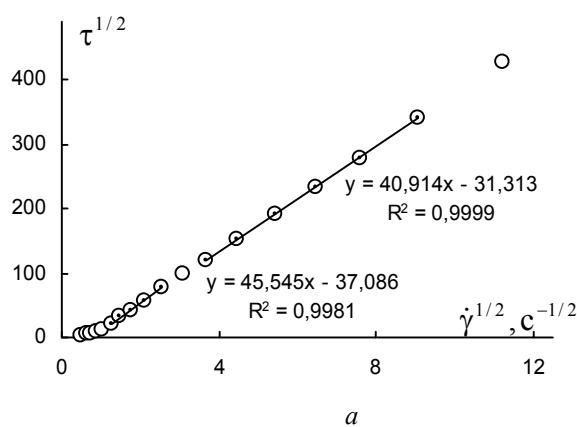
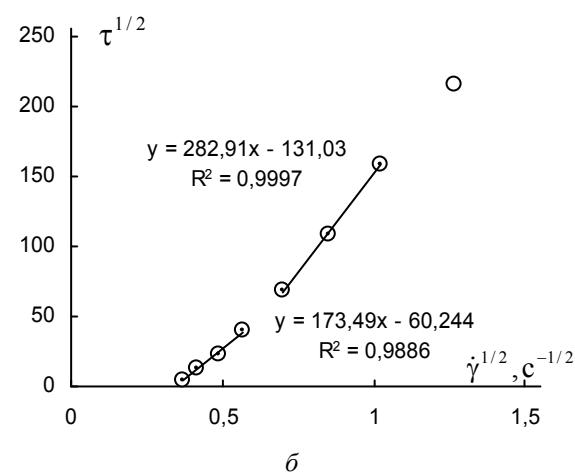


Рис. 8. Кривые течения в корневых координатах при низких скоростях сдвига суспензии  $\text{SiO}_2$  в смеси глицерин/вода при концентрациях: а – 0,562; б – 0,524

Fig. 8. Flow curves of the suspension of  $\text{SiO}_2$  in glycerin/water mixture in root coordinates at low shear rates at concentrations of the dispersed phase: а – 0.562, б – 0.524

На рисунках 7, б и 8 показаны линейные зависимости  $\tau(\dot{\gamma})$  в корневых координатах при низких скоростях сдвига. Сдвиговое затвердевание в описанных суспензиях можно объяснить следующим образом. На поверхности частиц оксида кремния (или на поверхности стекла) могут существовать поверхностные силанольные группы, которые формируют водородные связи между двумя соседними частицами. Если частицы диспергированы в жидкость, не обладающую водородными связями, то при столкновениях частиц образуются большие прочные агрегаты. Если частицы оксида кремния диспергированы в воде или в молекулярной жидкости со значительными водородными связями, то возникают водородные связи между молекулами и поверхностными силанольными группами. Образуется сольватированный слой, способствующий отталкиванию частиц. Возникает стабильный золь, не способный к флокуляции. Органическая полярная жидкость глицерин содержит молекулы, способные к водородным связям, поэтому частицы оксида кремния в ней достаточно хорошо стабилизированы.

Физические причины возникновения режима С-Р заключаются в закономерном разрушении агрегатов частиц, связанных водородными связями (уравнение 1). Физические причины возникновения режима С-З состоят в образовании новых дополнительных водородных связей между частицами в результате сильных столкновений частиц при высоких скоростях сдвига. Формируются новые агрегаты частиц с большей силой сцепления, что приводит к увеличению вязкости. Постепенный процесс формирования более прочных агрегатов за счет соударений при сдвиге описывается в кинетической модели с помощью константы скорости  $\tilde{k}_3$  (уравнение 2). Коэффициенты реологических уравнений приведены в таблице.

Нужно отметить, что коэффициенты  $\tilde{k}_i$  не обязаны оставаться постоянными на всем интервале сдвигового затвердевания. Поэтому появление двух и более участков с разными значениями  $\tilde{k}_3$ , не противоречит модели. Причиной появления коэффициента  $\tilde{k}_3$  в кинетическом уравнении является постепенное увеличение силы сцепления за счет

более интенсивных столкновений при увеличении относительной скорости частиц.

## Выводы

Предложена структурная реологическая модель для описания сдвигового затвердевания различных структурированных систем. Модель получена с помощью кинетического уравнения формирования/разрушения структуры вещества, в которое включена константа скорости формирования структуры под действием сдвига. Апроксимация уравнениями структурной реологической модели выполнена для раствора ассоциированных полимеров и для суспензии частиц, между которыми могут образовываться водородные связи.

## Список источников / References

1. Barnes H.A. Shear-thickening (“Dilatancy”) in suspensions of nonaggregating solid particles dispersed in Newtonian liquids. *J. Rheol.*, 1989, **33**, 329–366.
2. Hoffman R.L. Discontinuous and dilatant behavior in concentrated suspensions. II. Theory and experimental tests. *J. Colloid Interface Sci.*, 1974, **46**, 491–506.
3. Boersma W.H., Laven J., Stein H.N. Shear-thickening (“Dilatancy”) in concentrated dispersions. *AIChE Journal*, 1990, **36**, 321–332.
4. Кирсанов Е. А., Тимошин Ю. Н. Неньютоновское течение структурированных систем. XXIV. Сдвиговое затвердевание // Жидк. крист. и их практич. использ. 2017. Т. 17, № 4. С. 73–82. [Kirsanov E.A., Timoshin Yu.N. Non-Newtonian flow of structured systems. XXIV. Shear thickening. *Liq. Cryst and their Appl.*, 2017, **17** (4), 73–82 (in Russ.)].  
**DOI:** 10.18083/LCAppl.2017.4.73].
5. Кирсанов Е. А., Матвеенко 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.)].
6. Guo X., Abdala Ah.A., May B.L., Lincoln S.F., Khan S.A., Prud'homme R.K. Rheology control by modulating hydrophobic and inclusion associations in modified poly(acrylic acid) solutions. *Polymer*, 2006, **47**, 2976–2983.

**Вклад авторов:**

Авторы сделали эквивалентный вклад в эту статью.

**Contribution of the authors:**

The authors contributed equally to this article.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

Вековицев М. П. – <https://orcid.org/0000-0001-9100-9526>  
Кирсанов Е. А. – <https://orcid.org/0000-0003-3030-7989>

Поступила 19.01.2022, одобрена 20.02.2022, принята 25.02.2022  
Received 19.01.2022, approved 20.02.2022, accepted 25.02.2022