

УДК 541. 182. 022: 532. 135

Е. А. Кирсанов, Ю. Н. Тимошин

**НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ.
XXIV. СДВИГОВОЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЕ**

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

Рассмотрены особенности сдвигового затвердевания, т. е. явления увеличения вязкости суспензии при увеличении скорости сдвига после превышения некоторой критической скорости сдвига. Кривые вязкости (кривые течения) хорошо аппроксимируются на интервале до начала сдвигового затвердевания и на интервале после завершения сдвигового затвердевания с помощью обобщенного уравнения течения

$\tau^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} \dot{\gamma}^{1/2} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$. *Нами использованы опубликованные экспериментальные результаты для*

структурированных систем: водная суспензия кукурузного крахмала; суспензия частиц угольной сажи в тетрадекане; суспензия частиц полиметилметакрилата в полиэтиленгликоле; коллоидная дисперсия наночастиц кремния в полиэтиленгликоле. После завершения явления сдвигового затвердевания иногда наблюдается «срыв течения». Величина критической скорости сдвига $\dot{\gamma}_{S1}$ перехода от сдвигового разжижения к сдвиговому затвердеванию уменьшается с ростом концентрации дисперсной фазы. В рамках структурной реологической модели явление сдвигового затвердевания интерпретируется как переход от одного режима течения к другому, связанный с увеличением силы сцепления между частицами.

Ключевые слова: структурная реологическая модель, сдвиговое затвердевание, суспензии.

DOI: 10.18083/LCAppl.2017.4.73

Е. А. Kirsanov, Yu. N. Timoshin

**NON-NEWTONIAN FLOW OF STRUCTURED SYSTEMS.
XXIV. SHEAR THICKENING**

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

We have considered the features of shear thickening, that is, the phenomenon of increase in the suspension viscosity with increasing the shear rate after exceeding the critical shear rate. We have shown that viscosity

curves (flow curves) are well approximated using the generalized flow equation $\tau^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} \dot{\gamma}^{1/2} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$ on the

interval before the onset of shear thickening and on the interval after the completion of the shear thickening. We used published experimental results for structured systems: an aqueous suspension of corn starch, a suspension of carbon black particles in tetradecane, a suspension of particles of polymethylmethacrylate in polyethylene glycol, colloidal dispersion of silicon nanoparticles in polyethylene glycol. After the phenomenon of shear thickening is complete, a "flow spurt" is sometimes observed. The value of the critical shear rate $\dot{\gamma}_{S1}$ of the transition from shear thinning to shear thickening decreases with increasing concentration of the dispersed phase. Within the

framework of the structural rheological model, the phenomenon of shear thickening is interpreted as a transition from one flow regime to another regime, associated with an increase of the engagement force between particles.

Key words: structural rheological model, shear thickening, suspensions.

Введение

Сдвиговое затвердевание (иногда называемое дилатансией) представляет собой увеличение сдвиговой вязкости η при достижении и превышении некоторого критического значения скорости сдвига $\dot{\gamma}_s$. Увеличение вязкости со скоростью сдвига $\dot{\gamma}$ может происходить как постепенно, так и скачкообразно при практически постоянной скорости сдвига. Сдвиговое затвердевание (СЗ) наблюдается обычно в концентрированных дисперсных системах, которые назвали текучими средами со сдвиговым затвердеванием. Явление СЗ обычно происходит на конечном участке высоких скоростей сдвига, но при более низких скоростях наблюдается либо сдвиговое разжижение (пластичное или псевдопластичное течение), либо ньютоновское течение с постоянной вязкостью. Также часто наблюдается сдвиговое разжижение после завершения явления СЗ. В рамках структурной реологической модели [1] явление сдвигового затвердевания не является самостоятельным, отдельным видом течения, а представляет собой участок перехода от сдвигового разжижения на участке низких скоростей сдвига (1) к сдвиговому разжижению (2) на участке высоких скоростей сдвига. При этом изменяются коэффициенты обобщенного уравнения течения (ОУТ) в результате изменения условий на контактах частиц суспензии. В итоге образуются агрегаты больших размеров, возможно, за счет увеличения прочности контакта частиц при более интенсивных столкновениях. Дисперсная система приобретает высокую вязкость, но ее течение при дальнейшем увеличении скорости соответствует известным режимам течения: пластичное, псевдопластичное или «срыв течения».

В представленной статье рассмотрены некоторые особенности неньютоновского течения систем, в которых наблюдается явление сдвигового затвердевания.

Структурная интерпретация явления сдвигового затвердевания

Высококонтрированная водная суспензия крахмала часто используется для демонстрации неньютоновского поведения как сдвигового разжижения (СР), так и сдвигового затвердевания (СЗ). На рис. 1 представлено реологическое поведение [2] суспензии кукурузного крахмала (*Argo*) с массовой концентрацией 55 %, что соответствует объемной концентрации 35,5 %. Частицы размером от 5 до 15 мкм имеют примерно сферическую форму. Приготовленная суспензия предварительно размешивалась, чтобы добиться разрушения агрегатов и достаточной гомогенности. Использовался реометр с контролируемым напряжением сдвига, вещество помещалось между параллельными пластинами в зазоре 1 мм. Типичное поведение включает в себя сдвиговое разжижение (СЗ) на 1-ом интервале скоростей сдвига, сдвиговое затвердевание (СЗ) на промежуточном интервале и начало сдвигового разжижения на 2-ом интервале.

На участке низких скоростей сдвига экспериментальные данные хорошо аппроксимируются обобщенным уравнением течения (ОУТ):

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

Коэффициенты ОУТ показаны на рис. 1, а. При изучении графиков (рис. 1) можно выделить характерные точки. Скорость сдвига $\dot{\gamma}_{S1}$ соответствует началу сдвигового затвердевания (СЗ), т. е. отклонению экспериментальных точек от кривой ОУТ (показано стрелкой).

Это значение скорости в данном случае практически совпадает с минимумом вязкости: $\dot{\gamma}_{S1} = 5,63 \text{ с}^{-1}$, $\eta_{\min} \approx 0,3 \text{ Па с}$. Максимальное значение вязкости после завершения СЗ равно $\eta_{\max} \approx 19,2 \text{ Па с}$ при скорости $\dot{\gamma}_{\max} = 75,3 \text{ с}^{-1}$.

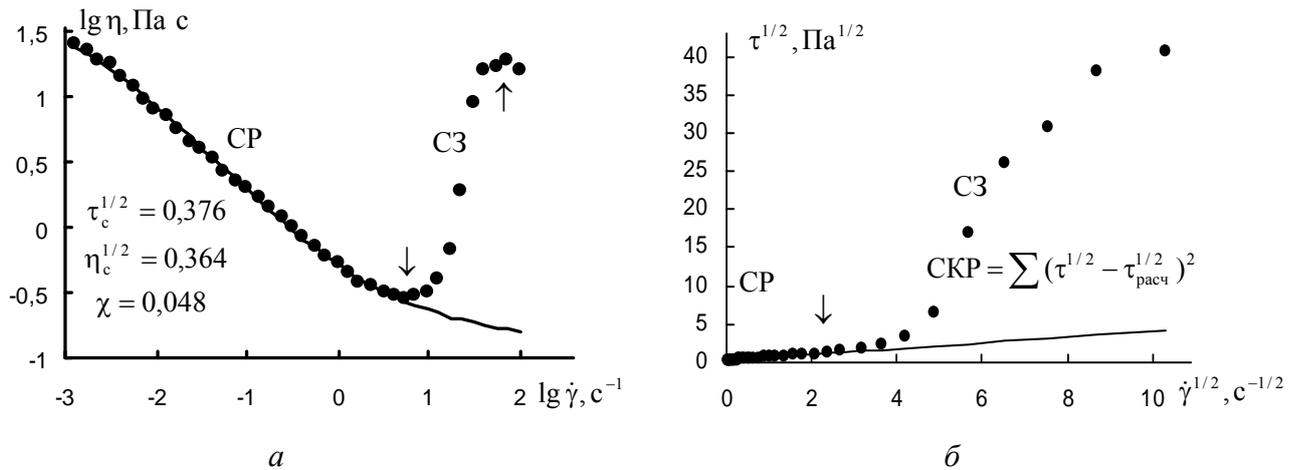


Рис. 1. Кривые течения суспензии крахмала, представленные:

a – в двойных логарифмических координатах, *b* – в корневых координатах.

Коэффициенты обобщенного уравнения течения приведены на графике. Экспериментальные данные из [2]

Fig. 1. Flow curves of the starch suspension provided:

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

The coefficients of the generalized flow equation given on the chart. Experimental data from [2]

В работе [3] изучено сложное реологическое поведение дисперсии частиц угольной сажи (*Cabot Vulcan XC72R*) диаметром примерно 0,5 мкм в неполярной низкомолекулярной жидкости тетрадекан с вязкостью 2,8 мПа·с. Предполагается, что между частицами действуют силы притяжения Ван-дер-Ваальса. Измерения сдвиговой вязкости выполнены при 25 °С в ротационном вискозиметре с контролируемой скоростью сдвига. Образцы подвергались предварительной сдвиговой деформации ($\dot{\gamma} = 100 \text{ c}^{-1}$), чтобы исключить влияние исходного состояния суспензии. Было обнаружено оптическими методами, что при низких значениях $\dot{\gamma}$ от 1 до 10 с в образцах формируются упорядоченные цилиндрические флоки, т. е. структура, индуцированная сдвигом (SIS). При увеличении скорости достигается более однородное состояние и наблюдается микроструктура из кластеров частиц в режиме сдвигового разжижения. При более высоких скоростях микроструктура состоит из малых групп частиц, а при $\dot{\gamma} > 100 \text{ c}^{-1}$ постепенно начинается сдвиговое затвердевание. Отмечено также

существование петли гистерезиса, что указывает на возможные тиксотропные свойства системы.

На рисунке 2 показаны экспериментальные данные [3] и аппроксимация уравнением Кэссона в логарифмических и в корневых координатах (коэффициенты приведены в табл. 1).

Зависимость коэффициента агрегации от массовой концентрации $\tau_c^{1/2}(\Phi_w)$ указывает на увеличение числа агрегированных частиц с увеличением концентрации суспензии (рис. 3, *a*). В рамках структурной реологической модели [1] коэффициент агрегации прямо пропорционален силе сцепления между частицами в агрегатах ($\tau_c \sim F_s$).

Поэтому можно предположить, что увеличение коэффициента агрегации при переходе от первой ко второй «прямой Кэссона» ($\tau_{S2}^{1/2} > \tau_{S1}^{1/2}$) соответствует увеличению силы сцепления между частицами на интервале высоких скоростей сдвига. Более высокая сила сцепления приводит к образованию агрегатов больших размеров, что увеличивает вязкость дисперсной системы.

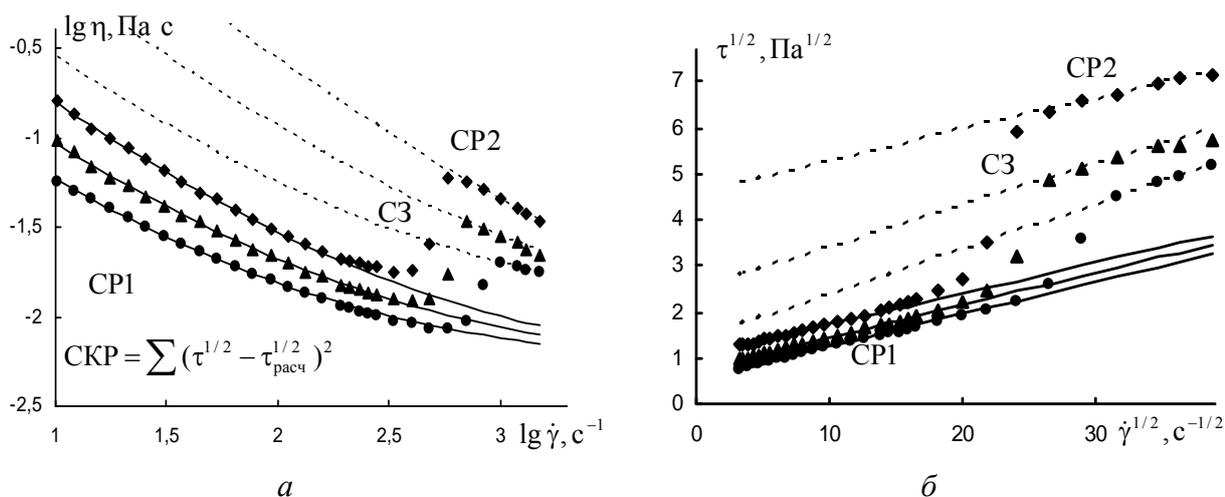


Рис. 2. Кривые течения суспензии частиц угольной сажи в тетрадекане при концентрациях 6 % (ромб), 5 % (треугольник), 4 % (точка):

a – в двойных логарифмических координатах; b – в корневых координатах.

Коэффициенты обобщенного уравнения течения приведены в табл. 1. Экспериментальные данные из [3]

Fig. 2. Flow curves of coal particles suspension in tetradecane at concentrations of 6 % (diamond), 5 % (triangle), 4 % (point):
 a – in double logarithmic coordinates; b – in the root coordinates.

The coefficients of the generalized flow equation are given in table. 1. Experimental data from [3]

Таблица 1. Коэффициенты уравнения Кэссона ($\chi = 0$) суспензии частиц угольной сажи в тетрадекане с указанием суммы квадратов разностей (СКР)

Table 1. The Casson equation coefficients ($\chi = 0$) of coal particles in tetradecane indicating the of squared differences sum

Интервал	Низкие скорости			Высокие скорости			
	концентрация Φ_w	6 %	5 %	4 %	6 %	5 %	4 %
$\tau_c^{1/2}$ Па ^{-1/2}		1,05	0,748	0,545	4,57	2,51	1,39
$\eta_c^{1/2}$ (Па·с) ^{-1/2}		0,0674	0,070	0,070	0,0684	0,0891	0,0977
СКР		0,0022	0,0012	0,0003	0,011	0,00003	0,00014

Чтобы выделить интервал, где наблюдается явление СЗ, определим значения корней скорости сдвига $\dot{\gamma}_s^{1/2}$ и напряжения сдвига $\tau_s^{1/2}$, при которых экспериментальные значения отклоняются от первой и второй «прямых Кэссона» на интервалах низких и высоких скоростей сдвига (рис. 3, б).

В общем, значение критической скорости $\dot{\gamma}_s$ уменьшается с ростом концентрации, а значение критического напряжения сдвига τ_s незначительно увеличивается или остается постоянным.

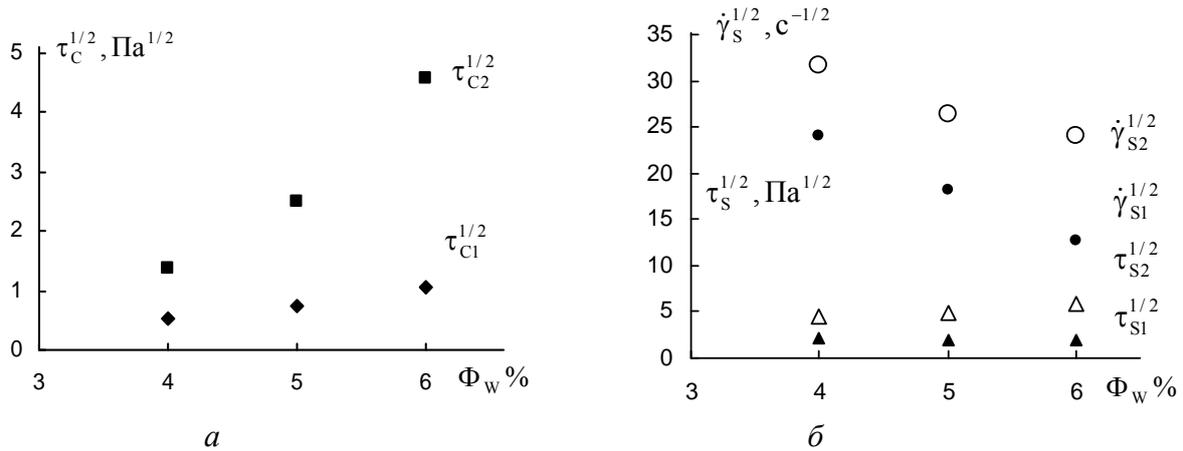


Рис. 3. Зависимость коэффициентов агрегации и критических величин от концентрации: а – коэффициенты агрегации $\tau_c^{1/2}(\Phi_w)$ для двух режимов сдвигового разжижения; б – значения критических параметров $\dot{\gamma}_s^{1/2}$ и $\tau_s^{1/2}$, ограничивающих район сдвигового затвердевания

Fig. 3. The dependence of the coefficients of aggregation and critical levels from concentration: а – the coefficients of aggregation $\tau_c^{1/2}(\Phi_w)$ for two regimes of shear thinning; б – values of the critical parameters $\dot{\gamma}_s^{1/2}$ and $\tau_s^{1/2}$, limiting the region of shear thickening

Эффект сдвигового затвердевания используется для создания композитных материалов, предназначенных для защиты от баллистических ударов пуль и острых предметов. Одним из таких материалов является суспензия полимерных частиц в полимерных жидкостях с малой молекулярной массой. В работе [4] исследовано реологическое поведение частиц полиметилметакрилата ($1,05 \pm 0,05$ мкм) в полиэтиленгликоле ($\eta = 0,049$ Па с). Использовался реометр с контролируемым напряжением сдвига и системой конус-плоскость. Образцы демонстрировали

предельное статическое напряжение сдвига, т. е. течение начиналось после превышения некоторого значения τ . Поэтому образцы подвергались предварительному сдвигу в течение минуты вплоть до 1000 Па в зависимости от концентрации частиц, затем производилась развертка при уменьшении напряжения сдвига в течение трех минут. Экспериментальные данные и аппроксимация обобщенным уравнением течения показаны на рис. 4, значения коэффициентов ОУТ и СКР приведены в табл. 2.

Таблица 2. Реологические характеристики суспензии полиметилметакрилата в полиэтиленгликоле

Table 2. Rheological characteristics of polymethylmethacrylate suspensions in polyethylene glycol

Интервал	Низкие скорости сдвига				Высокие скорости сдвига			
	0,49	0,48	0,45	0,40	0,49	0,48	0,45	0,40
концентрация	0,49	0,48	0,45	0,40	0,49	0,48	0,45	0,40
$\tau_c^{1/2}$ Па ^{-1/2}	1,23	0,93	1,23	0,49	25,8	19,6	6,54	3,57
$\eta_c^{1/2}$ (Па с) ^{-1/2}	1,65	1,01	1,66	4,86	8,56	2,68	2,42	1,07
χ с ^{-1/2}	0,052	0,060	0,065	0,045	2,05	2,93	4,78	4,71
$\tau_c^{1/2} / \chi$	23,5	15,7	19,0	10,8	12,6	6,70	1,37	0,76
$\eta^{1/2}(0)$	25,2	16,7	20,6	15,6	21,1	9,38	3,79	1,83
СКР	$9 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0,068	0,079	0,001	0,02

В рамках структурной реологической модели сдвиговое разжижение (СР) объясняется разрушением агрегатов частиц, причем скорость разрушения увеличивается при увеличении скорости сдвига и, соответственно, напряжения

сдвига. Понятно, что при непрерывном, достаточно быстром уменьшении τ равновесное состояние течения достигается быстрее на участке высоких скоростей сдвига и медленнее на участке низких скоростей сдвига.

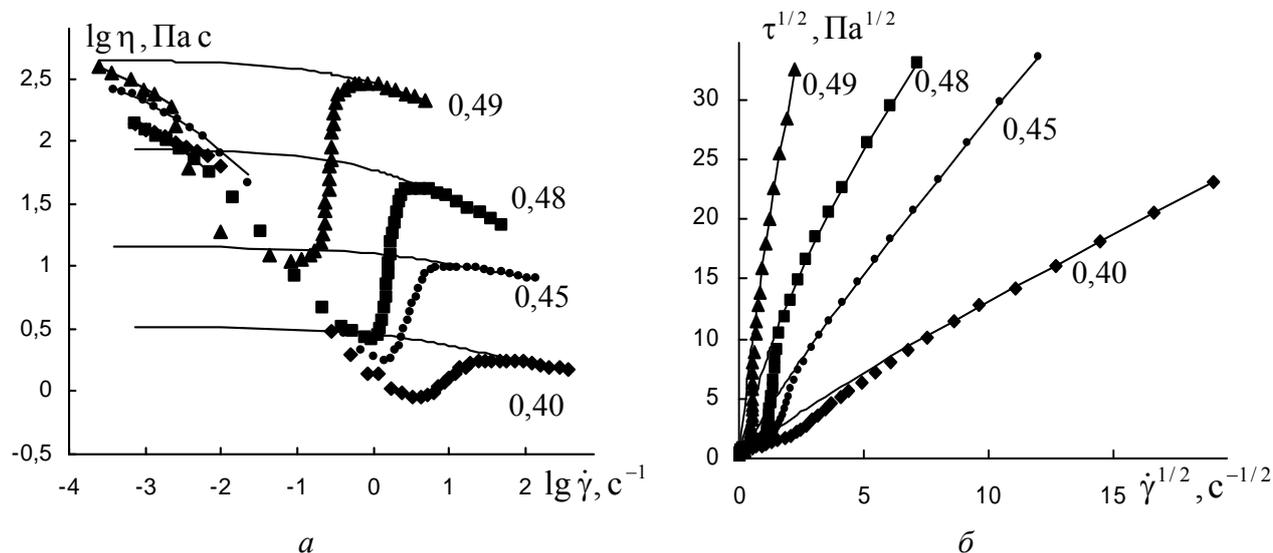


Рис. 4. Кривые вязкости и течения суспензии полиметилметакрилата в полиэтиленгликоле: *a* – представленные в двойных логарифмических координатах; *b* – в корневых координатах. Сплошные линии построены с помощью обобщенного уравнения течения с коэффициентами, приведенными в табл. 2. Указаны концентрации. Данные из [4]

Fig. 4. Viscosity curves and flow curves of a suspension of polymethyl methacrylate in polyethylene glycol: *a* – is represented in double logarithmic coordinates; *b* – in the root coordinates. The solid line is constructed using the generalized flow equation with coefficients given in tabl. 2. The specified concentrations are presented. Data from [4]

Поэтому неоднозначные результаты, приведенные в табл. 2 для района низких скоростей сдвига, можно объяснить некоторым отклонением состояния течения от равновесного в условиях постоянной скорости снижения напряжения сдвига. Тем не менее можно говорить о более низких значениях коэффициента компактности χ , что свидетельствует о тенденции к образованию сплошной сетки частиц при минимальных скоростях сдвига.

Реологическое поведение водной суспензии кукурузного крахмала при различных концентрациях исследовано в работе [5]. Частицы имеют размеры порядка 10 мкм, т.е. не подвержены броуновскому движению. Сдвиговое затвердевание начинается с монотонного возрастания вязкости с увеличением скорости сдвига, но затем

происходит скачкообразное увеличение вязкости при практически постоянной скорости сдвига. Причиной СЗ авторы [5] считают дилатансию, при которой образуются гидродинамические кластеры, индуцированные сдвигом. При этом между частицами возникают прямые контакты, появляются силы трения. Экспериментальные данные [5] и результаты расчета в рамках структурной реологической модели представлены на рис. 5, 6 и в табл. 3.

Скорость сдвига $\dot{\gamma}_{S1}$, выше которой экспериментальные значения вязкости становятся выше рассчитанных по ОУТ значений, немного меньше или равна значениям скорости сдвига $\dot{\gamma}_{\min}$, при котором наблюдается минимум на кривой вязкости.

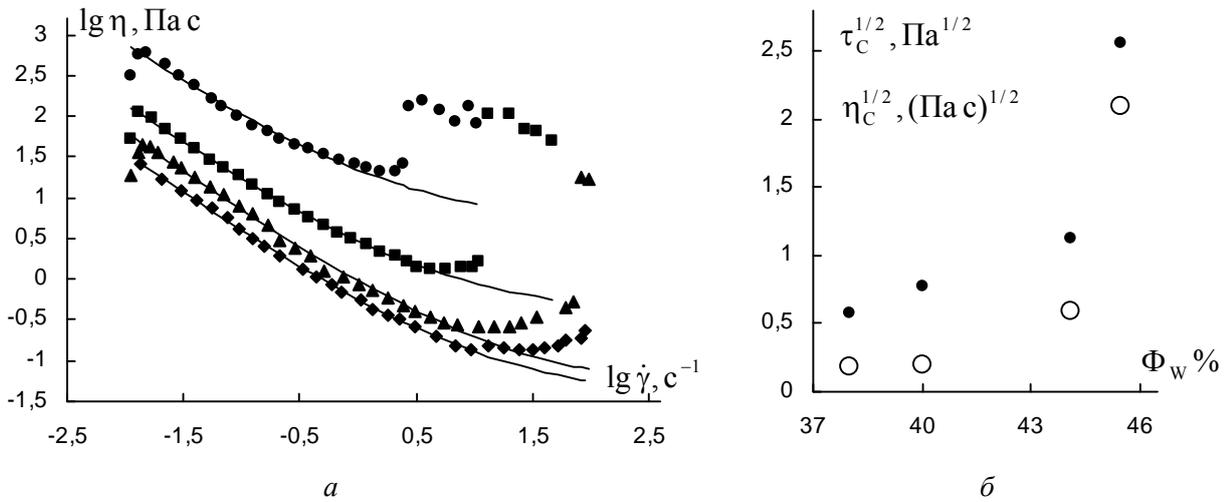


Рис. 5. Реологические характеристики суспензии кукурузного крахмала при массовых концентрациях 38 % (ромб), 40 % (треугольник), 44,1 % (квадрат), 45,5 % (точка):
 а – кривые вязкости в двойных логарифмических координатах, б – зависимость коэффициентов агрегации $\tau_c^{1/2}$ (точка) и коэффициентов вязкости Кэссона $\eta_c^{1/2}$ (круг) от массовой концентрации Φ_w . Данные из [5]

Fig. 5. Rheological characteristics of corn starch suspensions with a mass concentration of 38 % (diamond), 40 % (triangle), 44,1 % (square), 45,5 % (point):
 а – viscosity curves in double logarithmic coordinates, б – dependence the coefficients of aggregation $\tau_c^{1/2}$ (dot) and the Casson coefficients of viscosity $\eta_c^{1/2}$ (circle) from the mass concentration Φ_w . Data from [5]

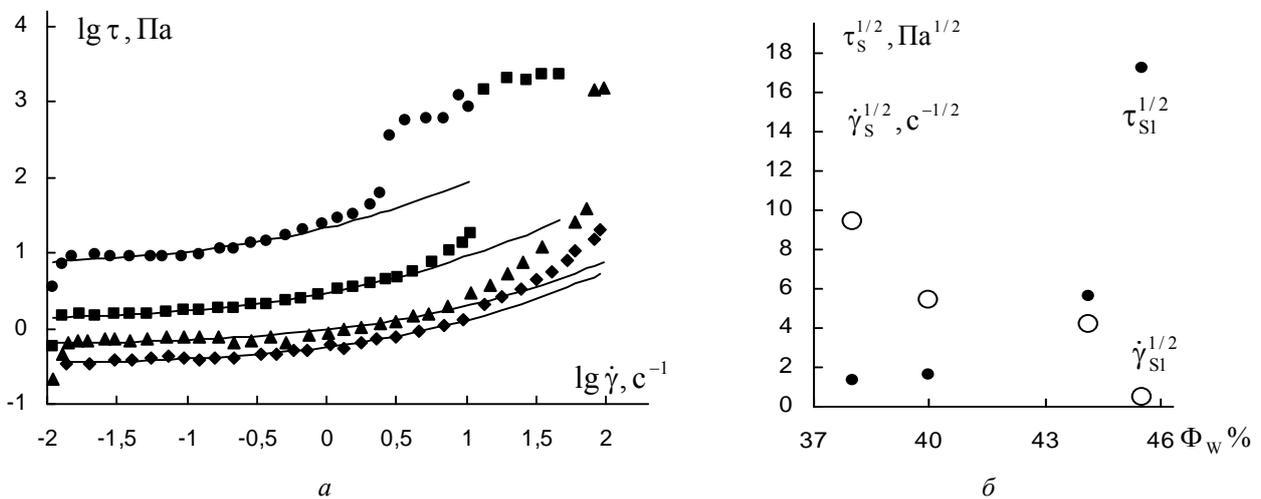


Рис. 6. Реологические характеристики суспензии кукурузного крахмала при массовых концентрациях 38 % (ромб), 40 % (треугольник), 44,1 % (квадрат), 45,5 % (точка):
 а – кривые течения в двойных логарифмических координатах, б – значения критических параметров $\dot{\gamma}_{s1}^{1/2}$ (круг) и $\tau_{s1}^{1/2}$ (точка) при разных концентрациях. Данные из [5]

Fig. 6. Rheological characteristics of corn starch suspensions with a mass concentration of 38 % (diamond), 40 % (triangle), 44,1 % (square), 45,5 % (point):
 а – flow curves in double logarithmic coordinates, б – values of critical parameters $\dot{\gamma}_{s1}^{1/2}$ (circle) and $\tau_{s1}^{1/2}$ (dot) with different concentrations. Data from [5]

Значения $\dot{\gamma}_{S1}^{1/2}$ уменьшаются, а значения $\tau_{S1}^{1/2}$ увеличиваются с ростом массовой концентрации дисперсной фазы (рис. 6, б).

Таблица 3. Коэффициенты уравнения Кэссона ($\chi = 0$) водной суспензии кукурузного крахмала при различных массовых концентрациях

Table 3. The coefficients Casson equation ($\chi = 0$) of an aqueous corn starch suspension at various mass concentrations

Концентрация	38 %	40 %	44,1 %	45,5 %
$\tau_c^{1/2}$, Па ^{-1/2}	0,574	0,775	1,13	2,56
$\eta_c^{1/2}$ (Па с) ^{-1/2}	0,179	0,200	0,590	2,096
СКР	0,005	0,051	0,014	0,281

Поведение коэффициентов реологического уравнения (ОУТ) типично для структурированных систем, агрегаты в которых постепенно разрушаются с увеличением скорости сдвига. Характерное снижение вязкости на начальном

этапе эксперимента может быть приписано неравновесному состоянию течения, когда в исходном образце размеры агрегатов меньше равновесных в результате предварительного размешивания. Отметим, что после скачкообразного увеличения напряжения сдвига τ в последующем районе течения имеются признаки «срыва течения», т. е. состояния, где $\tau \approx \text{const}$, $\eta \sim 1/\dot{\gamma}$ (рис. 6, а).

Коллоидная дисперсия наночастиц кремния (размеры частиц от 90 до 250 нм) в полиэтиленгликоле (вязкость полимера 0,05 Па с) была исследована при температуре 25 °С в работе [6] с помощью реометра с контролируемым напряжением сдвига и устройством конус-плоскость. Чтобы избежать эффектов неоднородности, образец подвергался сдвигу 1 с⁻¹ в течение 60 с перед измерением. Экспериментальные данные, взятые из работы [6, рис. 4.10], и результаты аппроксимации ОУТ представлены на рис. 7 и 8. В работе [6] отмечено, что при концентрации кремния ниже 5 % сдвиговое затвердевание отсутствует.

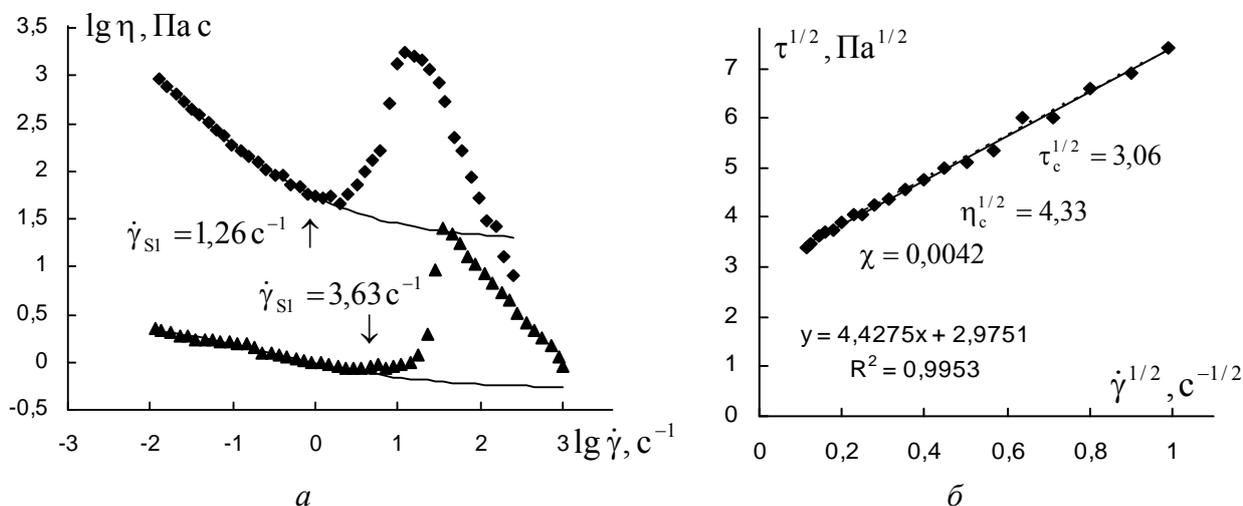


Рис. 7. Реологические характеристики коллоидной дисперсии кремния в полиэтиленгликоле при массовых концентрациях 25 % (ромб), 10 % (треугольник):

а – кривые вязкости в логарифмических координатах, б – кривая течения в корневых координатах для концентрации 25 % на участке низких скоростей сдвига. Данные из [6]

Fig. 7. Rheological characteristics of colloidal dispersions of silicon in polyethylene glycol at a mass concentration of 25 % (diamond), 10 % (triangle):

а – the curves of viscosity in a logarithmic scale, б – the flow curve in root coordinates for concentration 25 % in the region of low shear rates. Data from [6]

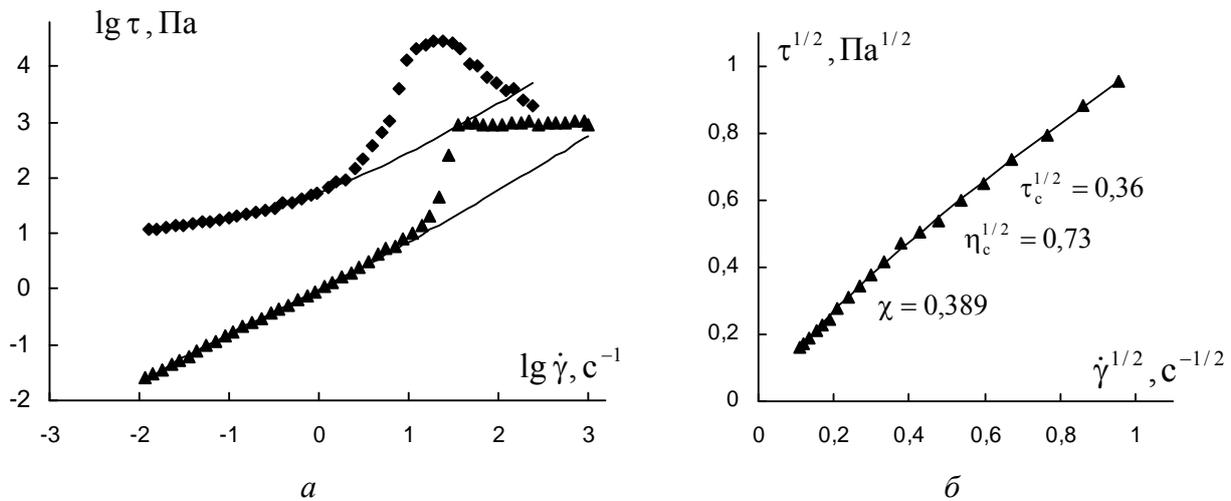


Рис. 8. Реологические характеристики коллоидной дисперсии кремния в полиэтиленгликоле при массовых концентрациях 25 % (ромб), 10 % (треугольник): *a* – кривые течения в логарифмических координатах, *б* – кривая течения в корневых координатах для концентрации 10 % на участке низких скоростей сдвига. Данные из [6]

Fig. 8. Rheological characteristics of colloidal dispersions of silicon in polyethylene glycol at a mass concentration of 25 % (diamond), 10 % (triangle): *a* – flow curves in a logarithmic scale, *b* – the flow curve in root coordinates for concentration 10 % in the region of low shear rates. Data from [6]

В работе [6] сдвиговое затвердевание объясняется изменениями структуры, а именно, образованием гидрокластеров. В рамках структурной модели сдвиговое затвердевание происходит в результате постепенного увеличения количества и размеров агрегатов, что приводит к увеличению вязкости коллоидной системы. Причиной такого изменения структуры может быть увеличение силы сцепления между частицами при столкновениях на участке высоких скоростей сдвига. После завершения формирования системы «новых» агрегатов дальнейшее увеличение скорости снова приводит к разрушению этих агрегатов и уменьшению вязкости. Если концентрация достаточно мала, то наблюдается обычное сдвиговое разжижение. В случае высоких концентраций наблюдается «срыв течения», когда напряжение сдвига практически не изменяется с ростом скорости сдвига или даже уменьшается (рис. 8, *a*).

Обсуждение результатов

Приведенные здесь и другие сведения [1] о характере сдвигового затвердевания позволяют

сделать следующие выводы. Явление СЗ наблюдается практически в любых суспензиях (дисперсиях) независимо от характера суспензии: в коллоидных системах частиц малых размеров с броуновским движением; в неколлоидных системах с частицами большого размера, где броуновское движение отсутствует; в неагрегированных 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 не наблюдается тиксотропное поведение. Явление СЗ наблюдается на интервале скоростей сдвига между районом 1 сдвигового разжижения или ньютоновского течения и районом 2, где наблюдается сдвиговое разжижение или «срыв течения».

На интервале СЗ возможно монотонное увеличение вязкости до некоторой предельной величины и/или скачкообразное увеличение вязкости.

В отличие от явления сдвигового разжижения, для кривых течения (вязкости) в интервале

сдвигового затвердевания предложено крайне мало реологических уравнений. Иногда используют степенной закон $\eta \sim \dot{\gamma}^n$, где n близок к 2. Имеются расчеты значения $\dot{\gamma}_{S1}$, полученные в модели «гидрокластеров» частиц. Независимо от природы сил взаимодействия между частицами, существующие теории предполагают образование групп, где частицы максимально близки друг к другу. Взаимодействие таких «плотных» групп с вязкой средой в условиях сдвигового течения приводит к резкому увеличению вязкости.

В рамках структурной реологической модели явление сдвигового затвердевания рассматривается как переход от одного режима течения к другому, при котором происходит увеличение силы сцепления между частицами и образуются «новые» агрегаты, способные существовать при высоких скоростях сдвига. Увеличение числа и размеров таких агрегатов приводит к увеличению вязкости по мере увеличения скорости сдвига. После завершения процесса формирования «новых» агрегатов вновь начинается разрушение агрегатов, приводящее к уменьшению вязкости системы. Режимы течения до и после интервала сдвигового затвердевания можно объяснить разрушением агрегатов частиц, поэтому легко допустить существование и вторичное формирование агрегатов в процессе сдвигового затвердевания.

Поскольку все агрегированные системы в той или иной степени обладают тиксотропными свойствами, то необходимо исследовать дисперсные системы на большом интервале скоростей сдвига, включающем участки СР и СЗ, а также проводить измерения при увеличении, уменьшении и последующем увеличении скорости сдвига.

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. Bischoff White E.E., Chellamuthu Manoj, Rothstein J.P. Extensional rheology of a shear-thickening cornstarch. *Rheol Acta.*, 2010, **49**, 119–129. DOI 10.1007/s00397-009-0415-3.
3. Osuji Ch.O., Kim Chanjoong, Weitz D.A. Shear thickening and scaling of the elastic modulus in a fractal colloidal system with attractive interactions. *Phys. Rev. E*, 2008, **77**, 060402-1–060402-4. DOI: 10.1103/PhysRevE.77.060402.
4. Kalman D.P., Schein J.B., Houghton J.M., Laufer C.H.N., Wetzel E.D., Wagner N.J. Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective applications. *Proceedings of SAMPE*. Baltimore, MD, 2007, 1–9.
5. Fall A., Lemaitre A., Bertrand F., Bonn D., Ovarlez G. Shear thickening and migration in granular suspension. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**, 268303.
6. Erdoğan T. Development of liquid armor materials and rheological behavior of shear thickening fluids (STFs). *A Thesis for the Degree of Master of Science in Materials Science*. Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Izmir, 2011, 129 p.

Поступила в редакцию 11.09.2017 г.
Received 11 September 2017