

УДК 541.182.022:532.135

Е. А. Кирсанов, Ю. Н. Тимошин

**ТЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ
В РАМКАХ ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ**

**FLOW OF ELECTORHEOLOGICAL LIQUIDS
WITHIN THE FRAMEWORK OF A GENERALIZED FLOW MODEL**

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

В рамках обобщённой модели течения обсуждается реологическое поведение электро-реологической жидкости. Обсуждается значение возможных тиксотропных свойств. Показано, что кривые течения описываются обобщённым уравнением течения.

Ключевые слова: *электрореологическая жидкость, обобщённое уравнение течения.*

Within the framework of a generalized flow model the rheological behavior of electro-rheological fluid is discussed. The significance of possible thixotropic properties is discussed. It is shown that the generalized flow equation describes the flow curves.

Key words: *electrorheological fluid, generalized flow equation.*

Электрореологические (ЭР) жидкости приобретают высокую вязкость при наложении на образец электрического поля. Это явление объясняют образованием цепочек частиц, связанных между собой силами электрического происхождения. Часто течения системы являются ньютоновскими жидкостями в отсутствие электрического поля, но ведут себя как вязкопластичные жидкости после приложения поля. Изменения вязкости обратимы и время электрореологического отклика составляет несколько миллисекунд. Обычно ЭР-жидкости представляют собой суспензию полупроводящих частиц в непроводящем масле. Такие характеристики ЭР-жидкостей, как малое время отклика, низкие мощности, простота конструкции, позволяют использовать ЭР-жидкости в различных технических устройствах. Многие публикации в отечественной [1, 2] и зарубежной [3—7] печати представляют как экспериментальные данные, так и многочисленные теоретические модели ЭР-эффекта. Необходимо отметить два существенных момента: практически во всех публикациях игнорируются возможные тиксотропные свойства таких агрегированных систем и, как правило, для аппроксимации экспериментальных данных используется только реологическое уравнение Бингама.

Покажем, что стационарное равновесное течение электрореологической жидкости может описываться обобщённой моделью течения [8, 9]. Отклонения от предложенной модели течения вызваны тем, что равновесное состояние течения не достигается за время конкретного измерения.

Например, в первом опыте с увеличением скорости $1 \uparrow$ равновесное состояние течения не достигается на участке низких скоростей сдвига, что приводит к характерному максимуму на кривой течения или даже к уменьшению напряжения сдвига с ростом скорости сдвига. На участке высоких скоростей равновесие между разрушением и

восстановлением агрегатов достигается быстрее, и равновесная кривая течения успешно описывается обобщённым уравнением течения $\eta^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} + \eta_c^{1/2}$, или уравнением Кэссона как его частным случаем: $\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$.

1. Система: органический полимер / частицы глины в силиконовом масле [3]

Рассмотрим кривые течения в корневых координатах $(\tau^{1/2}, \dot{\gamma}^{1/2})$, полученные в эксперименте [3] для частиц монтмориллонита, модифицированного полимером, в силиконовом масле (размер частиц примерно 100 нм, концентрация 20 мас. %). Поле было приложено перпендикулярно поверхности в зазоре между коаксиальными цилиндрами. На рис. 1 показаны «прямые Кэссона» и зависимость коэффициента агрегирования τ_c (Па) от напряжённости постоянного электрического поля E (кВ/мм) при 20 °С.

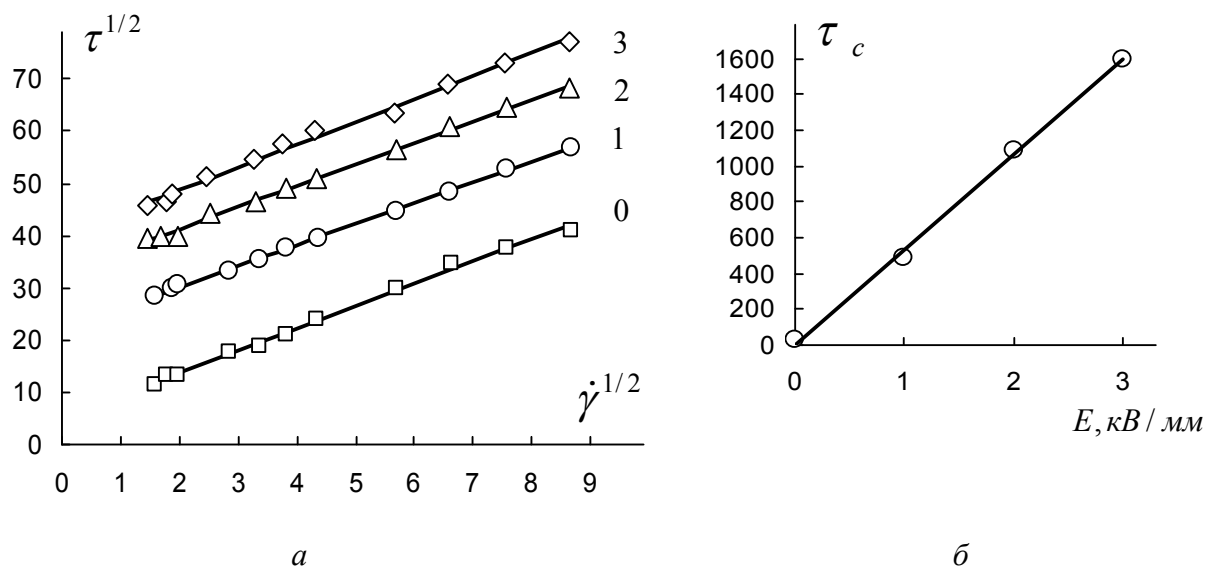


Рис. 1. Кривые течения суспензии нанокomпозитных частиц поли-*N*-метанилин/монтмориллонит в силиконовом масле, представленные в корневых координатах (а); зависимость предельного напряжения сдвига от напряжённости внешнего электрического поля (б).

Цифры у «прямых Кэссона» обозначают величину напряжённости поля

Коэффициент χ , отвечающий за характер упаковки частиц внутри агрегата, равен нулю, таким образом, наблюдается пластичное течение с предельным напряжением сдвига τ_c . Коэффициент вязкости Кэссона η_c связан с обтеканием отдельных частиц и потому практически не зависит от величины приложенного электрического поля.

Коэффициент агрегирования τ_c увеличивается практически линейно с увеличением напряжённости поля E , хотя в теоретических работах принята квадратичная зависимость. Увеличение величины τ_c прямо связано с увеличением размеров агрегатов. Отметим, что в отсутствие поля течение также описывается уравнением Кэссона, а не Бингама, хотя авторы статьи [3] утверждают, что течение в отсутствие поля — ньютоновское, а при наложении поля кривая течения соответствует уравнению Бингама.

2. Система: частицы гематита в силиконовом масле [4]

Оксид железа (III) имел плотность $5,2 \text{ г/см}^3$, средний размер частиц — примерно 100 нм. Силиконовое масло (поли(диметилсилоксан)) имело плотность $0,966 \text{ г/см}^3$ и вязкость 20 мПа с. Реометр с контролируемым напряжением сдвига позволял прикладывать к плоским пластинам переменное электрическое поле с частотой 1 кГц и амплитудой от 2 до 4 кВ/мм. Все реологические измерения проводились при $25 \text{ }^\circ\text{C}$ и состояли из нескольких этапов: предварительное сдвиговое течение образца при наибольших напряжениях сдвига в течении 10 сек; установление равновесного состояния образца при наложении электрического поля в течении 60 сек; установление напряжения сдвига, достаточного для начала течения суспензии при наивысшей напряжённости электрического поля. Минимальное время отдельного измерения — около 90 сек. При указанных размерах частиц и разности плотности частиц и среды седиментация в ходе эксперимента пренебрежимо мала [4].

Описание условий эксперимента представляется важным, поскольку свидетельствует о достижении практически равновесного состояния течения в этой несомненно тиксотропной суспензии. Поэтому при анализе кривых течения мы отбрасывали из интервала аппроксимации только три начальных значения напряжения при самых низких скоростях сдвига. Результаты аппроксимации экспериментальных данных с помощью обобщённого уравнения течения представлены на рис. 2, значения коэффициентов реологического уравнения в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты обобщённого уравнения течения образца гематита в силиконовом масле при различных концентрациях

Концентрация Φ	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
$\tau_c^{1/2} \text{ Па}^{1/2}$	4,70,0	3,60	2,97	2,18	1,70
$\eta_c^{1/2} (\text{Па с})^{1/2}$	0,468	0,312	0,264	0,116	0,097
$\chi \text{ с}^{-1/2}$	0	0	0	0	0
символ	ромб	треугол.	точка	откр. ромб	откр. треуг.

Равенство коэффициента χ нулю означает, что имеется тенденция к образованию сплошной трёхмерной сетки частиц, заполняющей весь объём вискозиметра при скорости сдвига, стремящейся к нулю. Увеличение других коэффициентов при повышении объёмной концентрации вполне согласуется с уравнениями обобщённой модели течения [8, 9].

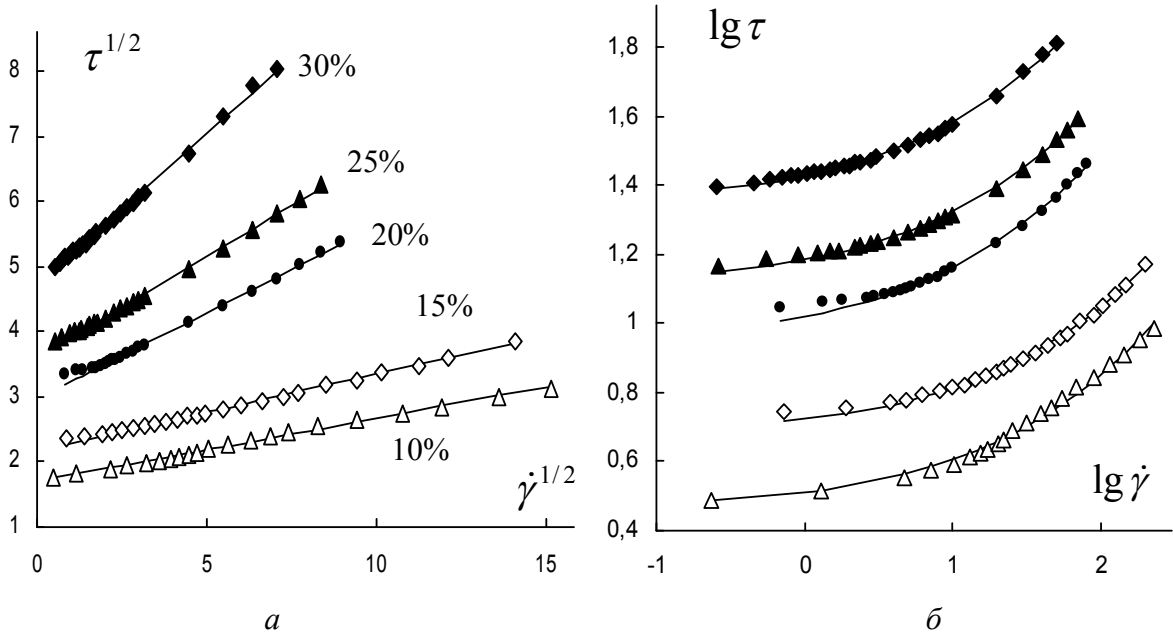


Рис. 2. Кривые течения суспензии гематита в силиконовом масле, представленные в корневых координатах (а); в двойных логарифмических координатах (б). Цифры у «прямых Кэссона» обозначают величину объёмной концентрации (доли) дисперсной фазы. Напряжённость поля 4 кВ/мм

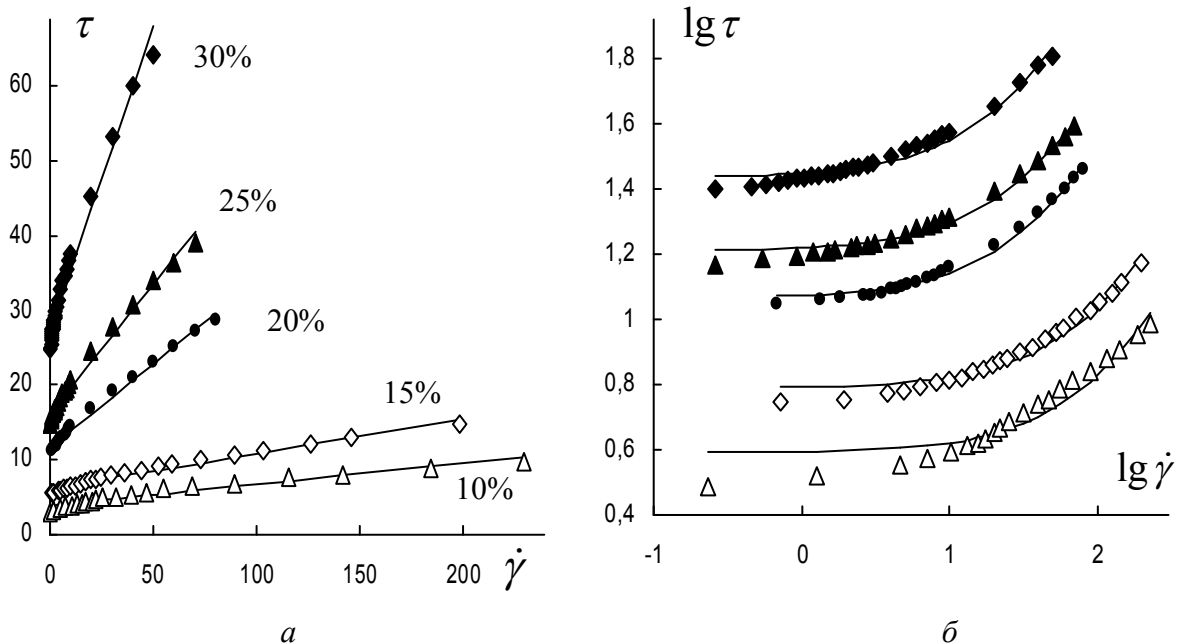


Рис. 3. Кривые течения суспензии гематита в силиконовом масле, представленные в обычных координатах (а); в двойных логарифмических координатах (б). Цифры у «прямых Бингама» обозначают величину объёмной концентрации (доли) дисперсной фазы. Напряжённость поля 4 кВ/мм

Для сравнения на рис. 3 представлены те же экспериментальные данные, аппроксимированные с помощью уравнения Бингама, значения коэффициентов реологического уравнения в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения Бингама образца гематита в силиконовом масле

Концентрация Φ	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
τ_B , Па	27,2	16,2	11,6	6,17	3,89
η_B , Па с	0,816	0,348	0,226	0,047	0,029
символ	ромб	треугол.	точка	откр. ромб	откр. треугол.

Видно, что «прямые Бингама» хуже описывают экспериментальные данные, но могут быть использованы в качестве первого приближения. Такое «сходство» в результатах аппроксимации объясняется математическим сходством между уравнением Кэссона и уравнением Бингама.

Рассмотрим реологическое поведение суспензии гематита при различных напряжённостях электрического поля (рис. 4, табл. 3).

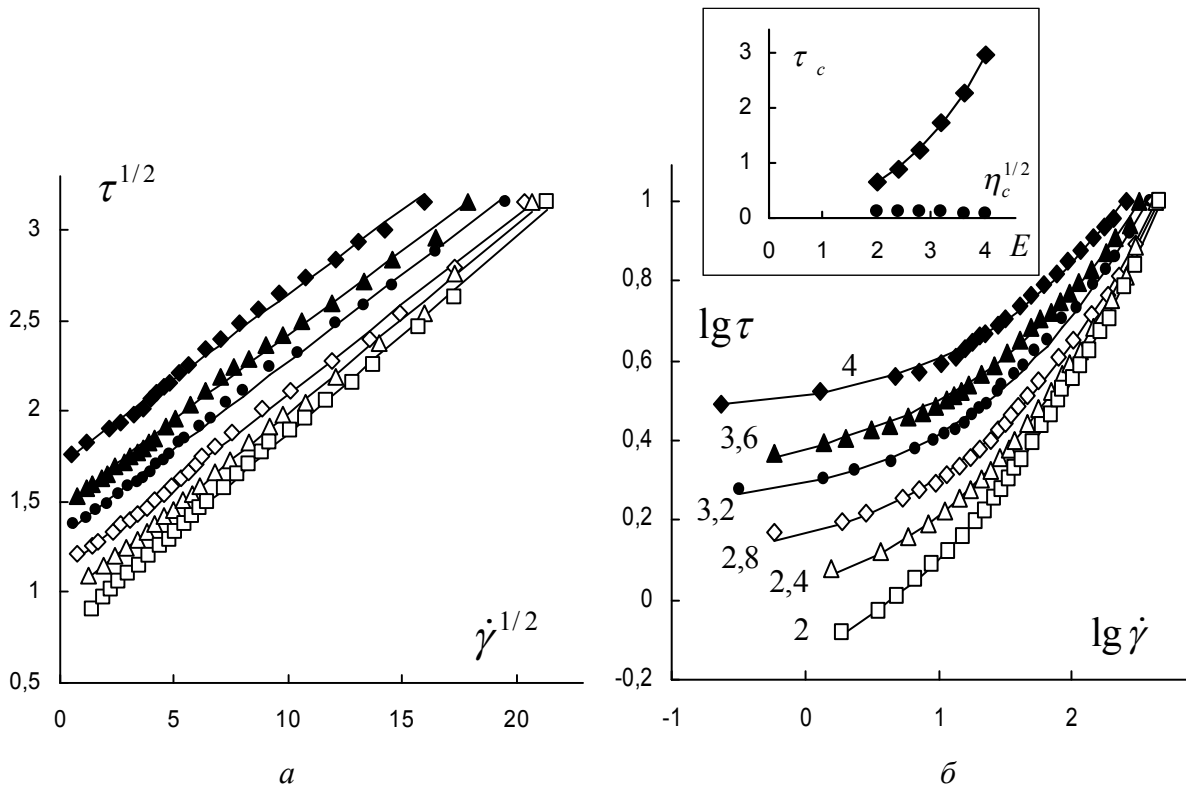


Рис. 4. Кривые течения суспензии гематита в силиконовом масле, представленные в корневых координатах (а); в двойных логарифмических координатах (б). Цифры у кривых обозначают величину напряжённости поля. Объёмная концентрация (доля) дисперсной фазы равна 10 % или 0,1. На вставке зависимость τ_c и $\eta_c^{1/2}$ от E

Таблица 3

**Коэффициенты обобщённого уравнения течения образца гематита
в силиконовом масле при различной напряжённости поля**

Напряжённость поля E , кВ/мм	4	3,6	3,2	2,8	2,4	2
$\tau_c^{1/2}$ Па ^{1/2}	1,71	1,51	1,31	1,11	0,95	0,81
$\eta_c^{1/2}$ (Па с) ^{1/2}	0,0937	0,0925	0,0965	0,0985	0,105	0,108
χ с ^{-1/2}	0,0012	0,0372	0,0030	0	0	0,0975
символ	ромб	треугол.	точка	откр. ромб	откр. треуг.	откр. кв.

Коэффициент χ , который связан с компактностью упаковки частиц в агрегате, равен нулю или очень близок к нулю. Это означает, что кривые течения близки к «прямым Кэссона», течение является пластичным или близким к нему. При низких скоростях сдвига частицы формируют сплошную сетку, ограниченную размерами рабочего объёма вискозиметра.

Увеличение коэффициента $\tau_c^{1/2}$ с ростом напряжённости поля вполне естественно, поскольку при этом растёт степень агрегации системы и увеличиваются размеры агрегатов частиц. В принципе, коэффициент вязкости Кэссона $\eta_c^{1/2}$ не должен изменяться, поскольку концентрация постоянна. Его небольшое снижение можно отнести к небольшому отклонению системы от равновесного состояния.

Обычно [4—6] изменение предельного напряжения сдвига τ_y от напряжённости поля E описывают степенной зависимостью, где показатель степени m близок к двум. Например, в рассматриваемой работе, предельное напряжение определялось прямой экстраполяцией τ к нулевой скорости сдвига, без использования какого-либо реологического уравнения. Значение m изменялось от 1,75 до 2,1 для различных концентраций. Нами получено соотношение для концентрации 10 % : $\tau_c = 0.24 + 0.06 E^{2.75}$ (вставка к рис. 4, б). Другими словами, пластичное течение должно наблюдаться и при отсутствии электрического поля, но значение предельного напряжения сдвига достаточно мало.

3. Система: монодисперсные, сферические частицы кремния в силиконовом масле [5]

Монодисперсные сферические частицы кремния имеют размеры $1,00 \pm 0,10$ мкм, плотность 2 г/см³. Силиконовое масло — полидиметилсилоксан с винилдиметил-группами с ньютоновской вязкостью $0,5$ Па с и плотностью $0,96$ г/см³.

Образцы подвергались непрерывному сдвиговому течению от $0,1$ до 100 с⁻¹ при различном напряжении электрического поля от 0 до 2000 В/мм. В отсутствие поля течение суспензии близко к ньютоновскому. При низких значениях поля кривая течения аппроксимирована уравнением Бингама, при высоких напряжённостях поля — уравнением Гершеля-Балкли [5]. Результаты аппроксимации экспериментальных данных с помощью обобщённого уравнения течения представлены на рис. 5, значения коэффициентов реологического уравнения в табл. 4.

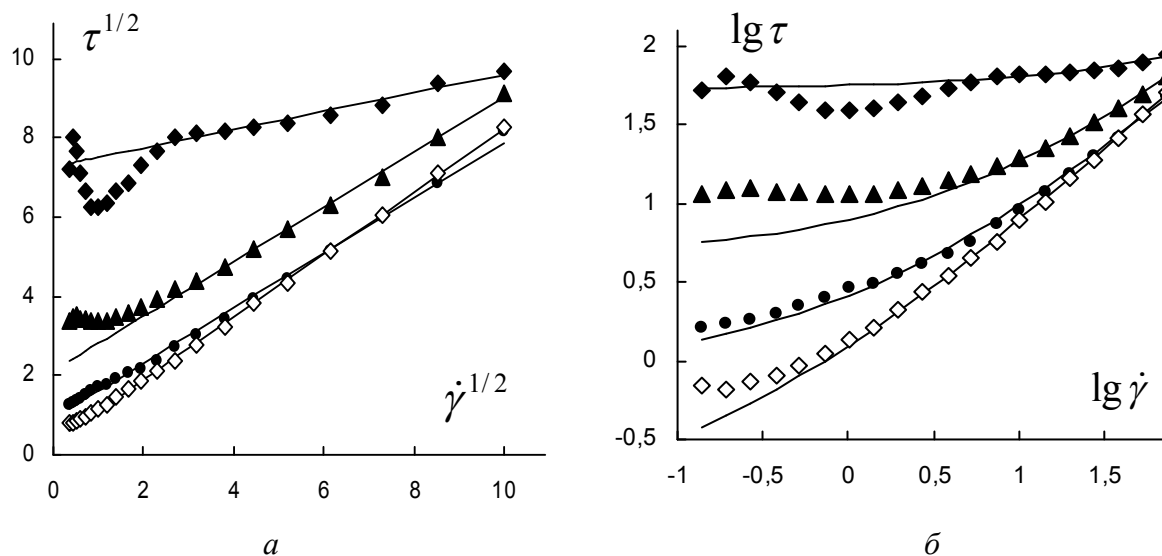


Рис. 5. Кривые течения суспензии кремния в силиконовом масле, представленные в корневых координатах (а); в двойных логарифмических координатах (б). Объёмная концентрация (доля) дисперсной фазы равна 0,107. Пояснения в табл. 4

Таблица 4

Коэффициенты обобщённого уравнения течения для образца суспензии кремния в силиконовом масле

Напряжённость поля E , кВ/мм	2	1	0,5	0,25
$\tau_c^{1/2}$ Па ^{1/2}	7,29	2,14	0,91	0,33
$\eta_c^{1/2}$ (Па с) ^{1/2}	0,23	0,69	0,70	0,79
χ с ^{-1/2}	0	0	0	0
символ	ромб	треугол.	точка	откр. ромб

Интересно, что в статье [5] отсутствуют всякие упоминания о возможной тиксотропии в этой существенно агрегированной системе. Однако характерные максимум и минимум в области низких скоростей типичны для неравновесного состояния течения тиксотропных систем. При высоких напряжённостях поля размеры агрегатов настолько велики, что система при низких скоростях сдвига не успевает за время опыта достичь состояния равновесия. Действительно, смещение от равновесного распределения агрегатов по размерам в сторону больших агрегатов приводит к увеличению $\tau_c^{1/2}$ и уменьшению $\eta_c^{1/2}$ по сравнению с равновесными значениями. В общем, в области низких скоростей экспериментальные напряжения сдвига превышают теоретические равновесные значения, поскольку медленное разрушение агрегатов не позволяет сформировать равновесное распределение по размерам за время измерения.

4. Система: коллоидные частицы полиэтилена, покрытые полипирролом, в минеральном масле [6]

Электрореологическая жидкость представляет собой 10 мас. % суспензию частиц полиэтилена, покрытого полипирролом, в минеральном масле. При отсутствии поля суспензия показывает ньютоновское течение. При наложении электрического поля напряжение сдвига резко увеличивается, наблюдается сдвиговое разжижение и отмечается предельное напряжение. Предполагается реологическое поведение Бингама. В электрическом поле образуются цепочки, состоящие из поляризованных частиц.

Кривые течения, показанные на рис. 6 демонстрируют существенные аномалии вязкости, что свидетельствует о значительном отклонении системы от равновесного состояния течения.

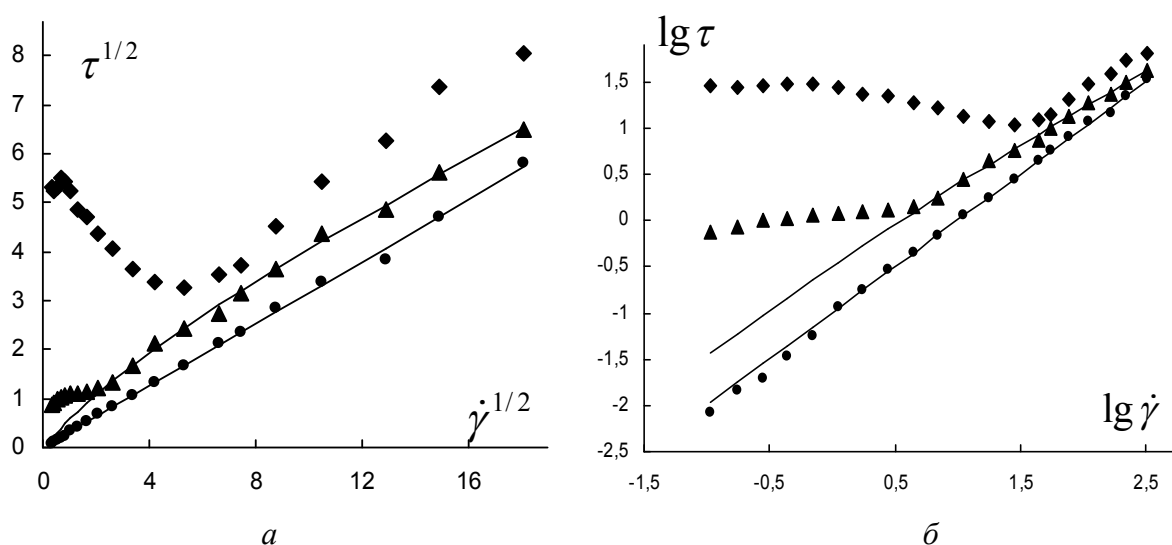


Рис. 6. Кривые течения суспензии полиэтилена с покрытием полупроводящего полимера полипиррола в минеральном масле, представленные в корневых координатах (а); в двойных логарифмических координатах (б) при напряжённостях поля 2 кВ/мм (ромб), 0,5 кВ/мм (треугольник), в отсутствие поля (точка). Массовая концентрация дисперсной фазы равна 10 %

Максимум или плато в районе низких скоростей сдвига обусловлены неравновесным состоянием течения, вообще, снижение напряжения сдвига при повышении скорости сдвига связано с быстрым разрушением больших агрегатов до размеров, соответствующих равновесному течению.

5. Суспензия частиц в непроводящей жидкости [7]

Игнорирование тиксотропных свойств электрореологической жидкости и возможных дилатантных эффектов приводит к существенным затруднениям при анализе кривых течения. Приведённые ниже экспериментальные данные были аппроксимированы авторами статьи [7] с помощью уравнения Бингама на всём интервале напряжений сдвига. Однако при этом наблюдались большие отклонения от теоретической кривой течения.

Покажем, что эти данные хорошо описываются обобщённым уравнением течения или уравнением Кэссона как его частным случаем. Однако при этом для аппроксимации следует выбирать только участки пластичного или псевдопластичного течения. Результаты приведены на рис. 7 и в табл. 5.

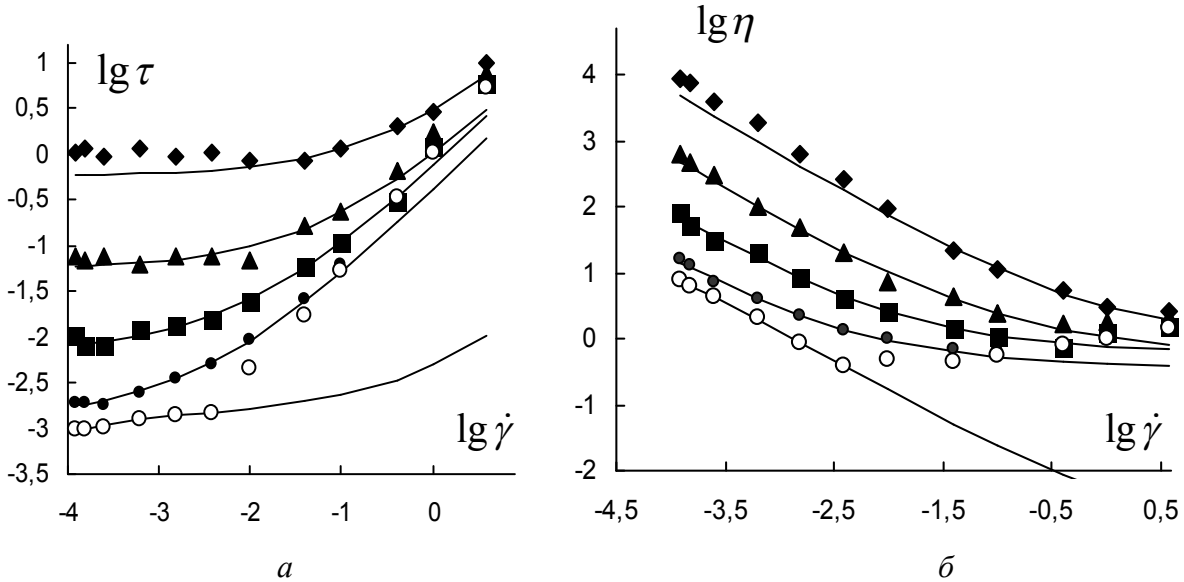


Рис. 7. Кривые течения суспензии в масле, представленные в двойных логарифмических координатах напряжение сдвига – скорость сдвига (а); в двойных логарифмических координатах вязкость — скорость сдвига (б) при различных напряжённостях поля. Пояснения в табл. 5

Таблица 5

Коэффициенты обобщённого уравнения течения для образца суспензии в масле

Напряжённость поля E , В/мм	400	200	100	50	0
$\tau_c^{1/2}$ Па ^{1/2}	0,758	0,234	0,083	0,035	0,038
$\eta_c^{1/2}$ (Па с) ^{1/2}	0,99	0,79	0,78	0,61	0,03
χ с ^{-1/2}	0	0	0	0	0,003
символ	ромб	треугол.	квадрат	точка	круг
Число точек	4	7	8	7	6

Традиционно результаты представляют в координатах $\lg \tau - \lg \dot{\gamma}$. Явный участок плато при низких скоростях сдвига не может описываться ни уравнением Бингама, ни уравнением Кэссона. При использовании координат $\lg \eta - \lg \dot{\gamma}$ легко видны участки в районе высоких скоростей сдвига, где вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига; ясно, что такие дилатантные участки не могут описываться вышеупомянутыми уравнениями. Таким образом, для аппроксимации выбраны участки средних скоростей сдвига, число точек на которых указано в табл. 5. Эти участки соответствуют явлению «сдвигового

разжижения» с режимами пластичного и псевдопластичного течения. Именно на этих участках справедливо обобщённое уравнение течения.

Заключение

ЭР-жидкости подчиняются обобщённому уравнению течения или уравнению Кэссона, как его частному случаю, если процесс течения происходит в условиях, близких к равновесию. Это означает, что процессы разрушения и восстановления агрегатов уравновешены, средний размер агрегатов не изменяется со временем. Равновесные условия течения устанавливаются, если суспензия предварительно подвергнута сдвиговому течению с достаточно большой скоростью для разрушения агрегатов. Равновесие также достаточно быстро устанавливается на участках высоких скоростей сдвига.

Большинство исследователей не учитывают тиксотропные свойства электрореологических жидкостей, что препятствует правильной интерпретации кривых течения. Не производится предварительное размешивание образца, не проверяется возможность гистерезиса кривых течения. Описание и объяснение неравновесного течения ЭР-жидкости, особенно на участке низких скоростей сдвига, необходимо для технических приложений. Однако, оно может быть осуществлено только при условии понимания равновесного состояния течения той же жидкости.

Список использованной литературы

1. Шульман З. П., Дейнега Ю. Ф., Городкин Р. Г. Ю., Мацепуро А. А. Электрореологический эффект. Минск : Наука и Техника, 1972. 176 с.
2. Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология : концепции, методы, приложения / пер. с англ. СПб. : Профессия, 2007. 560 с.
3. Lu J., Zhao X. // J. Colloid Interface Sci., 2004. Vol. 273. P. 651—657.
4. Espin M. J., Delgado A. V., Martin J. E. // Rheol. Asta. 2004. Vol. 44. P. 71—79.
5. Chin B. D., Winter H. H. // Rheol. Asta. 2002. Vol. 41. P. 265—275.
6. Kim D.-H., Kim Y. D. // J. Ind. Eng. Chem. 2007. Vol. 13. P. 879—894.
7. Klingenberg D. J., Zukoski C. F. // Langmuir. 1990. 2002. Vol. 6. P. 15—24.
8. Курсанов Е. А. Течение дисперсных и жидкокристаллических систем. Иваново : Иван. гос. ун-т», 2006. 232 с.
9. Матвеев В. Н., Курсанов Е. А. // Вестник Моск. ун-та. Сер. 2 : Химия. 2011. Т. 66, № 4. С. 243—276.

Поступила в редакцию 18.09.2012 г.