

Научная статья

УДК 541. 182. 022: 532. 135

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-3-8-19

ВЯЗКОУПРУГОСТЬ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ СУСПЕНЗИИ В РАМКАХ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Вековищев М. П.*, Кирсанов Е. А.

*Государственный социально-гуманитарный университет, 140411, Московская обл.,
г. Коломна, ул. Зелёная, д. 30, Российская Федерация*

**Корреспондирующий автор, e-mail: mpv.71@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.09.2024

Принята к публикации 20.09.2024

Аннотация

Цель: рассмотреть вязкоупругие свойства электрореологической жидкости, состоящей из частиц диоксида кремния в полидиметилсилоксане, при различных значениях напряжённости электрического поля.

Процедура и методы. Проведена аппроксимация частотных зависимостей динамических модулей с помощью уравнений структурной реологической модели. Определены значения коэффициентов уравнений при различных значениях напряжённости поля.

Результаты. Показана возможность применения уравнений структурной модели для описания частотной зависимости модуля потерь и модуля накопления. Установлена связь коэффициентов реологических уравнений с величиной приложенного электрического поля. Показана связь между характером реологических кривых и структурой дисперсии в электрическом поле.

Теоретическая и/или практическая значимость. Предложены уравнения, которые способны аппроксимировать экспериментальные данные на отдельных участках частотной зависимости динамических модулей для электрореологической жидкости. Установлена связь между рассчитанными коэффициентами реологических уравнений и структурой вещества.

Ключевые слова : электрореологическая жидкость, структурная реологическая модель, вязкоупругость, динамические измерения

Для цитирования :

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Вязкоупругость электрореологической суспензии в рамках структурной модели // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2024. № 3. С. 8-19. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-3-8-19>

Original research article

VISCOELASTICITY OF ELECTORRHEOLOGICAL SUSPENSION WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STRUCTURAL MODEL

M. Vekovishchev*, E. Kirsanov

*State University of Humanities and Social Studies, ulitsa Zelyonaya 30, Kolomna 140411,
Moscow region, Russian Federation*

**Corresponding author, e-mail: mpv.71@mail.ru*

Received by the editorial office 12.09.2024

Accepted for publication 20.09.2024

Abstract

Aim. To consider the viscoelastic properties of an electrorheological fluid consisting of silicon dioxide particles in polydimethylsiloxane at different values of electric field strength.

Methodology. The frequency dependences of dynamic modules were approximated using the equations of the structural rheological model. The values of the coefficients of the equations were determined for different values of the field strength.

Results. The possibility of using the equations of the structural model to describe the frequency dependence of the loss modulus and the storage modulus is shown. The relationship between the coefficients of the rheological equations and the magnitude of the applied electric field is established. The relationship between the nature of the rheological curves and the structure of dispersion in the electric field is shown.

Research implications. Equations are proposed that are capable of approximating experimental data in individual sections of the frequency dependence of dynamic modules for an electrorheological fluid. A relationship is established between the calculated coefficients of rheological equations and the structure of the substance.

Keywords : electrorheological fluid, structural rheological model, viscoelasticity, dynamic measurements

For citation :

Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2024). Viscoelasticity of electrorheological suspension within the framework of the structural model. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 3, pp.8-19. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-3-8-19>

Введение

Область «умных» (smart) материалов привлекает внимание исследователей в различных отраслях науки и технологий на протяжении нескольких последних десятилетий. Материалы называют «умными» за счёт их способности обратимо изменять свои свойства под действием внешнего стимула, например светового, механического, температурного, действия электрического или магнитного поля.

Электрореологические (ЭР) жидкости являются современным материалом, способным изменять свои свойства под действием электрического поля. Электрореологические жидкости имеют ряд потенциальных применений в системах демпфирования и сцепления, твердотельной и мягкой робототехнике, микрофлюидных чипах, датчиках тактильного отклика и медицинских сенсорах и др. [1–3].

Электрореологическим (ЭР) эффектом называют явление увеличения вязкости при наложении на образец вещества электрического поля. ЭР-эффект наблюдается в ЭР-жидкостях, например, в дисперсиях частиц, которые легко поляризуются и находятся в диэлектрической непроводящей жидкости. В основе механизма ЭР-эффекта лежит образование цепочек (или колонок) частиц, за счёт притяжения поляризованных частиц, возникающего в электрическом поле. Цепочки частиц ориентируются вдоль линий напряжённости поля E и образуют структуру, способную разрушаться при сдвиговом течении. В такой структурированной жидкости возможно появление предела текучести. В случае стационарного сдвигового течения для описания кривых течения используют известные уравнения Бингама, Кэссона, Гершеля-Балкли [1; 2]. Часто применяется [2; 4] уравнение Бингама в следующем виде $\tau = \tau_y(E) + \eta_0 \dot{\gamma}$, где динамическое предельное напряжение зависит от напряжённости поля E , например в виде $\tau_y(E) = \alpha E^2 \frac{\tanh(E/E_c)^\beta}{(E/E_c)^\beta}$.

В некоторых случаях простые реологические уравнения плохо аппроксимируют экспериментальные данные. Тогда используют [2] более сложные модели, например, вида:

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + (t_1 \dot{\gamma})^a} + \eta_\infty \left(1 + \frac{1}{(t_2 \dot{\gamma})^b}\right) \dot{\gamma} \text{ или } \tau = \tau_{sy} \left(1 - \frac{1 - \exp(-a \dot{\gamma})}{1 + (a \dot{\gamma})^a}\right) + \eta_\infty \dot{\gamma}.$$

Общей универсальной модели, основанной на строгих физических принципах, до сих пор не существует. Зависимость $\tau_y(E)$ представляют степенным законом $\tau_y \sim E^n$, где величина n находится в интервале от 1 до 2 в зависимости от характера поляризации частиц.

Динамические измерения в ЭР-жидкостях демонстрируют типичное поведение модуля упругости $G'(\omega)$ и модуля потерь G'' [5]. Теоретическая интерпретация основана [4] на моделях с механическими элементами: пружина, демпфер, элемент сухого трения.

В представленной статье осциллирующее течение ЭР-жидкости рассматривается с точки зрения структурной реологической модели [6].

Вязкоупругое поведение при осциллирующем течении

В работе [5] рассмотрено реологическое поведение электрореологической монодисперсной суспензии, состоящей из частиц диоксида кремния (SiO_2) в полидиметилсилоксане. Процесс подготовки однородного образца подробно

описан в [5]. Сферические частицы аморфного диоксида кремния (SeahostarKP-100) имеют средний размер частиц $1,00 \pm 0,10$ мкм. Частицы однородно диспергированы в непроводящей жидкости (полидиметилсилоксан), которая имеет ньютоновскую вязкость $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Суспензия ERS107 имеет массовую концентрацию 20 % и объёмную концентрацию $\Phi = 0,107$. После длительного перемешивания проводились динамические измерения на ротационном вискозиметре ARES в куэттовской ячейке с зазором между цилиндрами 1 мм. Внутренний цилиндр был заземлён, внешний цилиндр являлся положительным электродом. Напряжённость электрического поля варьировалась от 30 до 2000 В/мм. Измерения проводились при комнатной температуре, электрический ток в ячейке не наблюдался.

Экспериментальные результаты частотных зависимостей динамических модулей $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ представлены на рис. 1–4 в двойных логарифмических координатах и в корневых координатах. Предварительно определялся район линейной вязкоупругости, причём амплитуда сдвиговых колебаний γ_0 выбиралась отдельно для разных напряжённостей электрического поля E : 0,1% при 2000 В/мм; 0,2% при 1000 В/мм и 500 В/мм; 1% при 250 В/мм и 100 В/мм; 10% при 60 В/мм и при отсутствии поля. Перед началом каждой развёртки по частоте образцы подвергались предварительному сдвигу с большой амплитудой при частоте 10 рад/с в течение 60 с. Предварительная подготовка способствовала одинаковому начальному состоянию образцов.

В работе [5] дано традиционное описание реологических кривых. Отмечено, что в отсутствии поля расплав полимера демонстрирует типичное поведение в терминальной зоне: G' и $G'' \sim \omega^2$. После наложения электрического поля величина динамических модулей возрастает, что приписывается возникновению внутренней структуры из «цепочек» частиц, ориентированных в направлении вектора напряжённости поля. При низких значениях напряжённости поля E преобладает вязкость (G''), при высоких значениях E доминирует упругость (G'). Авторы [5] связывают такое поведение с переходом от жидкого состояния в состояние геля.

Будем рассматривать отдельно «вязкое» и «упругое» поведение электрореологической суспензии с точки зрения структурных изменений.

В рамках структурной реологической модели [6] предполагается, что в области линейной вязкоупругости под действием сдвига происходит изменение структуры вещества. На отдельных интервалах частот наблюдаются различные режимы осциллирующего течения, связанные с характером изменения структуры в результате изменения амплитуды скорости сдвига $\gamma_0 \omega$.

Для описания реологических кривых будем использовать уравнения структурной модели, подобно тому, как сделано в работах [7; 8].

«Вязкое» реологическое поведение при высоких значениях E представлено на рис. 1. На графиках показана аппроксимация экспериментальных данных, взятых из работы [5], с помощью реологического уравнения

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

Значения коэффициентов приведены в табл. 1.

Уравнение (1) описывает равновесное состояние осциллирующего течения, при котором происходит постепенное разрушение агрегатов (цепочек частиц) с увеличением частоты под действием сдвига.

На интервале низких частот экспериментальные значения G'' превышают рассчитанные, что можно объяснить избытком агрегированных частиц в суспензии. Такое состояние течения будем считать неравновесным.

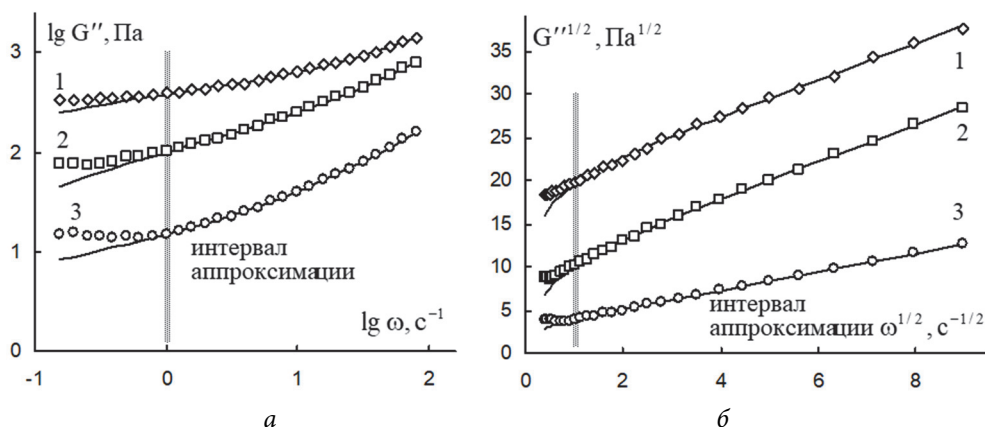


Рис. 1 / Fig. 1. Зависимость модуля потерь G'' от циклической частоты ω для суспензии диоксида кремния в полидиметилсилоксане при напряжённости электрического поля (В/мм) 2000 (1); 1000 (2); 500 (3):

a – в двойных логарифмических координатах, b – в корневых координатах /

Dependence of the loss modulus G'' on the cyclic frequency ω for a suspension of silicon dioxide in polydimethylsiloxane at electric field strength (V/mm) of 2000 (1); 1000 (2); 500 (3):

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

Источник: [5].

При более низких значениях E на графиках (рис. 2) имеется только участок высоких частот, где наблюдается равновесное течение. Реологические кривые G' достаточно хорошо аппроксимируются уравнением (1).

При $E = 60$ В/мм и в отсутствие поля в корневых координатах экспериментальные данные описываются прямой, т. е. коэффициент χ' равен нулю. В рамках структурной модели [6] это означает, что отсутствует спонтанное разрушение цепочек-агрегатов; процесс разрушения агрегатов происходит только в результате разрывающих гидродинамических сил при сдвиге. Возможное «ньютоновское течение» с постоянной вязкостью показано пунктирной прямой на рис. 2, a . Таким образом, видно, что в отсутствии поля также существует некая слабая структура, которая разрушается с увеличением частоты сдвиговых колебаний.

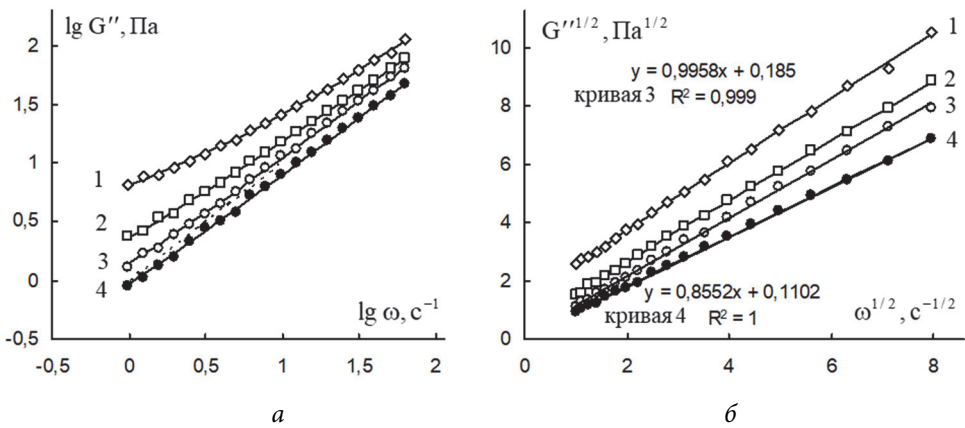


Рис. 2 / Fig. 2. Зависимость модуля потерь G'' от циклической частоты ω для суспензии диоксида кремния в полидиметилсилоксане при напряжённости электрического поля (В/мм) 250 (1); 100 (2); 60 (3); 0 (4):
а – в двойных логарифмических координатах, б – в корневых координатах /
Dependence of the loss modulus G'' on the cyclic frequency ω for a suspension of silicon dioxide in polydimethylsiloxane at electric field strength (V/mm) of 250 (1); 100 (2); 60 (3); 0 (4):
а – in double logarithmic coordinates, б – in root coordinates

Источник: [5].

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты уравнений для модуля потерь для суспензии диоксида кремния в полидиметилсилоксане, полученные при различной напряжённости электрического поля / The coefficients of the equations for the loss modulus obtained for a suspension of silicon dioxide in polydimethylsiloxane at different electric field strengths

Е, В/мм	2000	1000	500	250	100	60	0
$g', \text{Па}^{1/2}$	19,65	10,21	3,087	1,675	0,863	0,185	0,110
$\eta_{\infty}'^{1/2}, (\text{Па с})^{1/2}$	2,067	2,078	1,067	1,110	1,010	0,996	0,855
$\chi', \text{с}^{-1/2}$	0,122	0,284	0,102	0,173	0,741	0	0
$g'/\chi', (\text{Па с})^{1/2}$	161,7	35,99	30,39	9,681	1,166	-	-
$\eta'^{1/2}(0), (\text{Па с})^{1/2}$	163,8	38,07	31,45	10,79	2,176	-	-

Источник: по данным авторов

В рамках структурной реологической модели [6] коэффициент агрегации g' , связан с прочностью контактов между частицами и количеством контактов. Разумно считать, что величина g' должна возрастать с увеличением напряжённости электрического поля (табл. 1).

Величина коэффициента $\eta_{\infty}^{1/2}$ представляет суммарную вязкость одиночных частиц, которые присутствуют в жидкости при возможном полном разрушении всех агрегатов. Строго говоря, величина $\eta_{\infty}^{1/2}$ не должна изменяться при изменении электрического поля. Однако мы видим практически одинаковые значения $\eta_{\infty}^{1/2}$ при двух высоких напряжённостях E , а затем коэффициент резко уменьшается в два раза и крайне незначительно уменьшается затем вплоть до исчезновения поля (табл. 1). Можно допустить, что при очень высоких значениях E агрегаты не способны распадаться полностью и сохраняются отдельные малые агрегаты, выступающие в модели в роли первичных частиц.

Коэффициент χ' пропорционален вероятности спонтанного разрыва контактов между частицами, например в результате теплового движения. Величина коэффициента компактности χ' зависит от строения агрегатов частиц. Более рыхлые агрегаты соответствуют низким значениям χ' ; при вероятном возникновении сплошной сетки частиц коэффициент стремится к нулю.

Уравнение для динамической вязкости имеет вид:

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

Для удобства сравнения различных кривых вводим величину структурной части динамической вязкости g'/χ' и величину нулевой вязкости в виде $\eta'^{1/2}(0)$ (при частоте $\omega \rightarrow 0$); значения этих величин приведены в табл. 1.

«Упругое» реологическое поведение при высоких значениях E представлено на рис. 3. На графиках показана аппроксимация экспериментальных данных, взятых из работы [5], с помощью реологического уравнения (3):

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

Поскольку $\eta'' = G'/\omega$, то уравнение для динамической упругости η'' приобретает вид

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

Первое слагаемое представляет собой структурную часть модуля накопления (или динамической упругости), обусловленную упругостью агрегатов частиц; второе слагаемое описывает часть модуля накопления (или динамической упругости), связанную с суммарной упругостью отдельных частиц.

Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Уравнение (3) описывает равновесное состояние осциллирующего течения, при котором происходит постепенное разрушение упругих агрегатов (точнее, упругих контактов между частицами) с увеличением частоты. Отметим, что на интервале низких частот экстраполированные значения G' (из области высоких частот) практически совпадают с экспериментальными точками.

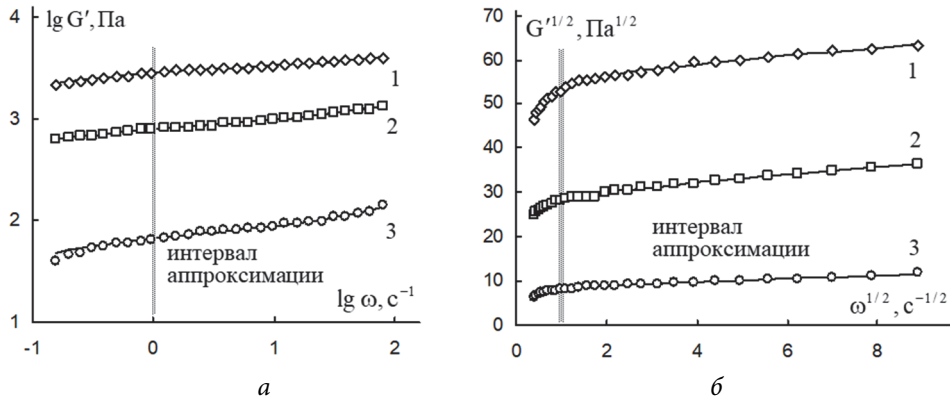


Рис. 3 / Fig. 3. Зависимость модуля накопления G' от циклической частоты ω для суспензии диоксида кремния в полидиметилсилоксане при напряжённости электрического поля (В/мм) 2000 (1); 1000 (2); 500 В/мм (3):
 a – в двойных логарифмических координатах, b – в корневых координатах / Dependence of the storage modulus G' on the cyclic frequency ω for a suspension of silicon dioxide in polydimethylsiloxane at electric field strength (V/mm) of 2000 (1); 1000 (2); 500 V/mm (3):
 a – in double logarithmic coordinates, b – in root coordinates

Источник: [5].

При значениях $E = 100$ В/мм и $E = 60$ В/мм равновесное состояние наблюдается (рис. 4) на участке высоких частот (начало аппроксимации отмечено стрелкой).

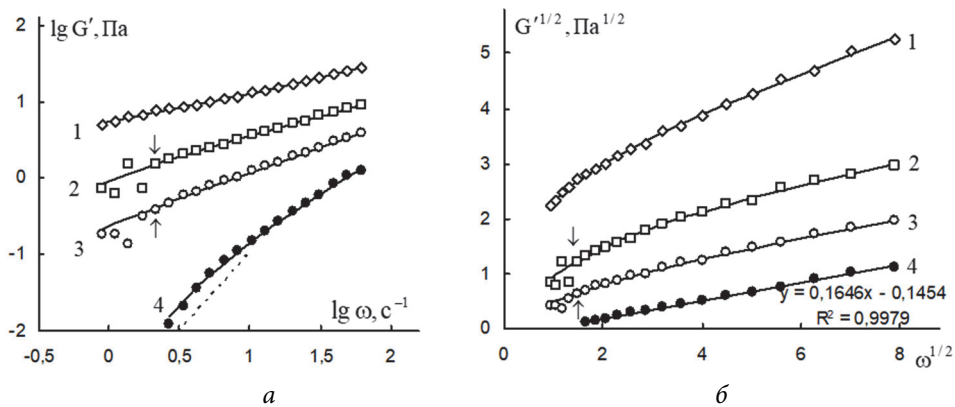


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость модуля накопления G' от циклической частоты ω для суспензии диоксида кремния в полидиметилсилоксане при напряжённости электрического поля (В/мм) 250 (1); 100 (2); 60 (3); 0 (4):
 a – в двойных логарифмических координатах, b – в корневых координатах / Dependence of the storage modulus G' on the cyclic frequency ω for a suspension of silicon dioxide in polydimethylsiloxane at an electric field strength (V/mm) of 250 (1); 100 (2); 60 (3); 0 (4):
 a – in double logarithmic coordinates, b – in root coordinates

Источник: [5].

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты уравнений для модуля накопления, полученных для суспензии диоксида кремния в полидиметилсилоксане при различной напряжённости электрического поля / The coefficients of the equations for the storage modulus obtained for a suspension of silicon dioxide in polydimethylsiloxane at different electric field strengths

E, В/мм	2000	1000	500	250	100	60
g'' , Па ^{1/2}	57,02	29,51	8,631	2,855	2,114	0,999
$\eta''^{1/2}$, (Па с) ^{1/2}	0,784	0,820	0,344	0,327	0,158	0,150
χ'' , с ^{-1/2}	0,085	0,078	0,103	0,443	1,669	2,037
g'' / χ'' , (Па с) ^{1/2}	671,8	376,5	84,11	6,441	1,267	0,491
$\eta''^{1/2}(0)$, (Па с) ^{1/2}	672,6	377,3	84,45	6,769	1,425	0,641

Источник: по данным авторов

В рамках структурной реологической модели [5] коэффициент g' определяет прочность упругих контактов между частицами и пропорционален корню силы сцепления между частицами. Величина g' увеличивается с увеличением напряжённости электрического поля (табл. 2).

Изменение коэффициентов, связанных с упругостью, сходно с изменением коэффициентов, связанных с вязкостью (рис. 5–7). При той же самой напряжённости поля происходит скачок от низких значений к высоким значениям предельной вязкости (и предельной упругости) «полностью разрушенной» структуры (рис. 5).

Зависимость коэффициентов агрегации для «вязких» и «упругих» агрегатов в первом приближении прямо пропорциональны E (рис. 6).

Зависимость коэффициентов компактности χ' для «вязких» агрегатов и коэффициентов компактности χ' для «упругих» агрегатов имеют сходный вид, а при высоких значениях E практически совпадают (рис. 7).

В рамках структурной реологической модели количество агрегированных частиц в единице объёма N_2 можно выразить соотношением:

$$N_2 = \frac{g'}{B\omega^{1/2}}, \quad (5)$$

где B – некоторая постоянная величина.

Чем больше агрегированных частиц, тем больше величина коэффициента агрегации g' , при данной частоте. Можно допустить, что коэффициент агрегации g' увеличивается с ростом E , поскольку визуальное наблюдение показывает увеличение числа частиц в цепочечных структурах.

В рамках структурной модели величина g' пропорциональна корню из силы сцепления между агрегатами $F_s^{1/2}$. Если сила сцепления, вызванная электрическим полем, пропорциональна квадрату напряжённости поля, то $g' \sim E$. Такая зависимость, в первом приближении, присутствует на графиках (рис. 6).

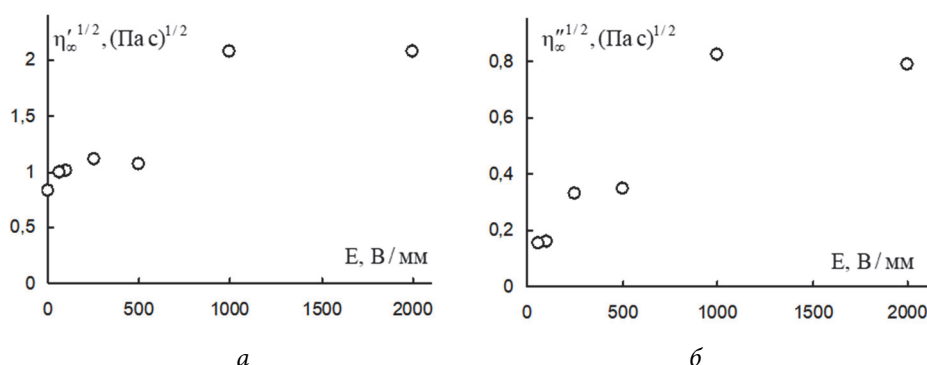


Рис. 5 / Fig. 5. Зависимость коэффициентов уравнений (1) и (3) от напряжённости электрического поля (В/мм): a – корень предельной динамической вязкости $\eta'_{\infty}{}^{1/2}$, b – корень предельной динамической упругости $\eta''_{\infty}{}^{1/2}$ / Dependence of the coefficients of equations (1) and (3) on the electric field strength (V/mm): a – root of the limiting dynamic viscosity $\eta'_{\infty}{}^{1/2}$, b – root of the limiting dynamic elasticity $\eta''_{\infty}{}^{1/2}$

Источник: по данным авторов.

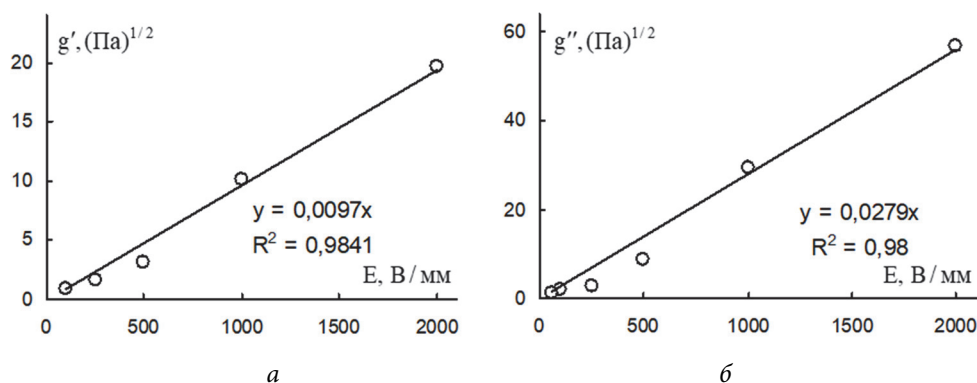


Рис. 6 / Fig. 6. Зависимость коэффициентов уравнений (1) и (3) от напряжённости электрического поля (В/мм): a – коэффициент агрегации g' для «вязких» агрегатов, b – коэффициент агрегации g'' для «упругих» агрегатов / Dependence of the coefficients of equations (1) and (3) on the electric field strength (V/mm): a – aggregation coefficient g' for “viscous” aggregates, b – aggregation coefficient g'' for “elastic” aggregates

Источник: по данным авторов.

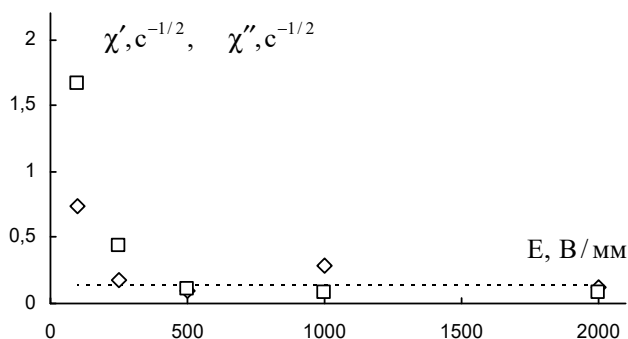


Рис. 7 / Fig. 7. Зависимость коэффициентов уравнений (1) и (3) от напряжённости электрического поля (В/мм): коэффициент компактности χ' для «вязких» агрегатов (ромб), коэффициент компактности χ'' для «упругих» агрегатов (квадрат) / Dependence of the coefficients of equations (1) and (3) on the electric field strength (V/mm): compactness coefficient χ' for “viscous” aggregates (rhombus), compactness coefficient χ'' for “elastic” aggregates (square)

Источник: по данным авторов.

Выводы

Вязкоупругие свойства электрореологической жидкости (суспензии диоксида кремния) рассмотрены в рамках структурной реологической модели. Частотные зависимости динамических модулей G' и $G''(\omega)$ аппроксимированы с помощью реологических уравнений структурной модели. Показана зависимость коэффициентов реологических уравнений от величины напряжённости электрического поля. Установлена связь реологических характеристик с величиной электрического поля и структурой дисперсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрореологический эффект / З. П. Шульман, Ю. Ф. Дейнега, Р. Г. Городкин, А. А. Мацепуро. Минск: Наука и Техника, 1972. 176 с.
2. Кузнецов Н. М. Электрореологические жидкости: состав, структура, свойства: дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2023. 335 с.
3. Joshi R. R., Patil A. A. Smart Materials- Electrorheological Fluids // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET). 2020. Vol. 9. Iss. 4. P. 1310–1312.
4. Magnetorheological Fluid Dampers: A Close Look at Efficient Parametric Models / A. Bahar, Fr. Pozo, R. M. Meybodi, S. Karami // Structural Control and Health Monitoring. 2024. Vol. 2024. Iss. 1. Article ID 6860185. DOI: 10.1155/2024/6860185.
5. Chin B. D., Winter H. H. Field-induced gelation, yield stress, and fragility of an electro-rheological suspension // Rheologica Acta. 2002. Vol. 41. Iss. 3. P. 265–275. DOI: 10.1007/s00397-001-0212-0.
6. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей: монография. М.: Техносфера, 2022. 284 с.
7. Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Вязкоупругость углеродных нанотрубок в полимерной матрице // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2024. № 1. С. 6–19. DOI: 10.18384/2949-5067-2024-1-6-19.

8. Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. XXXVI. Наножидкость наночастиц оксида железа в этиленгликоле // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2023 Т. 23. № 2. С. 38–51. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.2.38.

REFERENCES

1. Shulman, Z. P., Deinega, Yu. F., Gorodkin, R. G. & Matsepuro, A. A. (1972). *Electrorheological effect*. Minsk: “Nauka i Tekhnika” publ. (in Russ.)
2. Kuznetsov, N. M. (2023). *Electrorheological fluids: composition, structure, properties* [dissertation]. Moscow (in Russ.).
3. Joshi, R. R. & Patil, A. A. (2020). Smart Materials- Electrorheological Fluids. In: *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 9 (4), 1310–1312.
4. Bahar, A., Pozo, Fr., Meybodi, R. M. & Karami, S. (2024). Magnetorheological Fluid Dampers: A Close Look at Efficient Parametric Models. In: *Structural Control and Health Monitoring*, 2024 (1), article ID 6860185. DOI: 10.1155/2024/6860185.
5. Chin, B. D. & Winter, H. H. (2002). Field-induced gelation, yield stress, and fragility of an electro-rheological suspension. In: *Rheologica Acta*, 41 (3), 265–275. DOI: 10.1007/s00397-001-0212-0.
6. Kirsanov, E. A. & Matveenko, V. N. (2022). *Viscosity and elasticity of structured liquids*. Moscow: Tekhnosfera publ. (in Russ.)
7. Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2024). Viscoelasticity of carbon nanotubes in a polymer matrix. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 1, 6–19. DOI: 10.18384/2949-5067-2024-1-6-19 (in Russ.).
8. Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2023). Non-Newtonian flow of structured systems. XXXVI. Nanofluid of iron oxide nanoparticles in ethylene glycol. In: *Liquid crystals and their Application*, 23 (2), 38–51. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.2.38 (in Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вековищев Михаил Петрович (г. Коломна, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;

ORCID: 0000-0001-9100-9526; e-mail: mpv.71@mail.ru

Кирсанов Евгений Александрович (г. Коломна, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;

ORCID: 0000-0003-3030-7989; e-mail: Kirsanov47@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail P. Vekovishchev (Kolomna, Moscow Region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies; ORCID: 0000-0001-9100-9526; e-mail: mpv.71@mail.ru

Evgeny A. Kirsanov (Kolomna, Moscow Region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;

ORCID: 0000-0003-3030-7989; e-mail: Kirsanov47@mail.ru