

Физика

Научная статья

УДК 541.64:532.783

НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ.

XXXVI. НАНОЖИДКОСТЬ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА В ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕ

Михаил Петрович Вековищев*, Евгений Александрович Кирсанов

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

ИНФОРМАЦИЯ

А Н Н О Т А Ц И Я

История статьи:

Поступила 6.12.2022

Одобрена 25.01.2023

Принята 6.02.2023

Ключевые слова:

реологические кривые,
структурная
реологическая модель,
наножидкость

Структурная реологическая модель используется для интерпретации результатов реологических измерений в наножидкости, которая представляет собой суспензию наночастиц оксида железа (гематит) в этиленгликоле, в которой возможна агрегация наночастиц. Уравнения структурной реологической модели использованы для аппроксимации экспериментальных данных на отдельных участках реологических кривых $\tau(\dot{\gamma})$, $G''(\omega)$, $G'(\omega)$, $G''(\gamma_0)$, $G'(\gamma_0)$. Каждому выделенному участку кривой соответствует отдельный режим стационарного или осциллирующего течения, который связан со специфическим состоянием структуры наножидкости. Изменение реологических величин при изменении скорости сдвига, амплитуды колебаний или частоты колебаний зависит от изменения количества агрегированных частиц в структурированной жидкости.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.38

Для цитирования:

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. XXXVI. Наножидкость наночастиц оксида железа в этиленгликоле // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 2. С. 38–51.

*Автор для переписки: mpv.71@mail.ru

© Вековищев М. П., Кирсанов Е. А., 2023

Physics

Research Article

NON-NEWTONIAN FLOW OF STRUCTURED SYSTEMS.

XXXVI. NANOFUID OF IRON OXIDE NANOPARTICLES IN ETHYLENE GLYCOL

Mikhail P. Vekovishchev*, Evgeniy A. Kirsanov

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

ARTICLE INFO:

Article history:

Received 6 December 2022

Approved 29 January 2023

Accepted 6 February 2023

Key words:

rheological curves,
structural rheological
model,
nanofuid

ABSTRACT

The structural rheological model is used to interpret the results of rheological measurements in nanofuid. Nanofuid is a suspension of iron oxide (hematite) nanoparticles in ethylene glycol, in which aggregation of nanoparticles is possible. The equations of the structural rheological model are used to approximate experimental data on the individual sections of rheological curves $\tau(\dot{\gamma})$, $G''(\omega)$, $G'(\omega)$, $G''(\gamma_0)$, $G'(\gamma_0)$. Each selected section of the curve corresponds to a separate mode of stationary or oscillating flow, which is associated with a specific state of the nanofuid structure. The change in rheological values along with the change in shear rate, amplitude of oscillations or frequency of oscillations depends on the change in the number of aggregated particles in the structured liquid.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.38

For citation:

Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A. Non-newtonian flow of structured systems. XXXVI. Nanofuid of iron oxide nanoparticles in ethylene glycol. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (2), 38–51 (in Russ.).

* Corresponding author: mpv.71@mail.ru

© Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A., 2023

Введение

В предыдущих работах [1, 2, 3] структурная реологическая модель была использована для интерпретации равновесного стационарного сдвигового течения и равновесного осциллирующего сдвигового течения. С помощью уравнений реологической модели были описаны функциональные зависимости основных реологических величин:

$$\tau(\dot{\gamma}), N_1(\dot{\gamma}), G''(\omega), G'(\omega), G''(\gamma_0), G'(\gamma_0).$$

В настоящей работе структурная реологическая модель используется для анализа реологического поведения наножидкости, которая представляет собой систему наночастиц, сuspendedированных в вязкую среду низкомолекулярной жидкости. Известно, что наночастицы способны образовывать кластеры или агрегаты частиц. Таким образом, наножидкости следует отнести к структурированным жидкостям [4, 5].

Сдвиговая вязкость

В работе [5] были выполнены реологические измерения наножидкости: оксид железа/этиленгликоль. Образец представляет собой гомогенную и стабильную суспензию в этиленгликоле наночастиц коммерческого вещества: $\alpha-\text{Fe}_2\text{O}_3$ (гематит). Средний диаметр наночастиц равен 29 ± 18 нм. Измерения проводились на устройстве конус–плоскость. Зависимость вязкости от скорости сдвига была определена при контролируемом напряжении сдвига (CS-реометр). Образец наножидкости показывает значительное тиксотропное поведение. При этом вязкость уменьшается до примерно постоянного значения во временном интервале от 300 с до 500 с. Таким образом, время измерения выбиралось в этом интервале, чтобы было достигнуто равновесное состояние течения.

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные [5]. Значительное сдвиговое разжижение присутствует на интервале скоростей сдвига от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 400 с^{-1} . Сдвиговое разжижение авторы [5] связывают с возможным упорядочиванием частиц или с разрушением агрегатов, при котором освобождается жидкость, иммобилизованная внут-

ри агрегатов. Также создается впечатление, что при более низких скоростях сдвига и, возможно, при более высоких скоростях сдвига течение приближается к ньютоновскому поведению с постоянной сдвиговой вязкостью.

Чтобы проверить возможность такого реологического поведения, нами проводилась аппроксимация на среднем интервале скоростей сдвига с помощью обобщенного уравнения течения, представленного в двух эквивалентных формах:

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

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

Обобщенное уравнение течения и физический смысл его коэффициентов описаны в работах [1, 2]. Это уравнение получено при условии, что агрегаты частиц постепенно разрушаются под действием гидродинамических сил по мере увеличения скорости сдвига. Величина коэффициента агрегации $\tau_c^{1/2}$ существенно превышает величину коэффициента Кессона $\eta_c^{1/2}$, связанного с вязкостью предельно разрушенной структуры.

Результаты аппроксимации уравнением (1) показаны сплошной линией на рис. 1. Видно, что экстраполяция уравнением (1) хорошо описывает участок средних и высоких скоростей сдвига. Значения предельно низкой вязкости разрушенной структуры показаны горизонтальными пунктирными линиями. Ньютоновского течения на участке высоких скоростей не наблюдается. Коэффициенты реологического уравнения приведены в табл. 1. Коэффициент компактности χ очень мал или равен нулю. Это означает, что течение можно считать пластичным, при котором вероятность спонтанного разрыва контакта между частицами крайне мала. В пределе низких скоростей сдвига формируется сплошная сетка (каркас) связанных между собой частиц. На рис. 2, a зависимость $\tau(\dot{\gamma})$ представлена в корневых координатах.

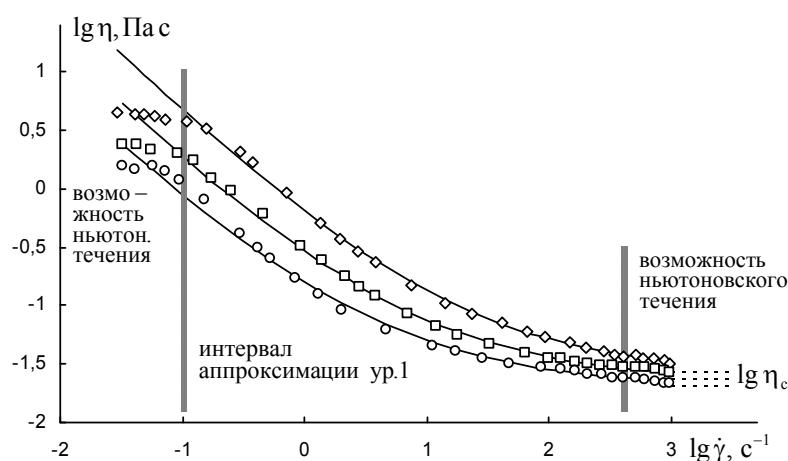


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига $\eta(\dot{\gamma})$ в двойных логарифмических координатах для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °С для массовых концентраций: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг). Экспериментальные данные из [5]

Fig. 1. Dependence of viscosity on shear rate $\eta(\dot{\gamma})$ in double logarithmic coordinates for iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C for mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle). Experimental data taken from [5]

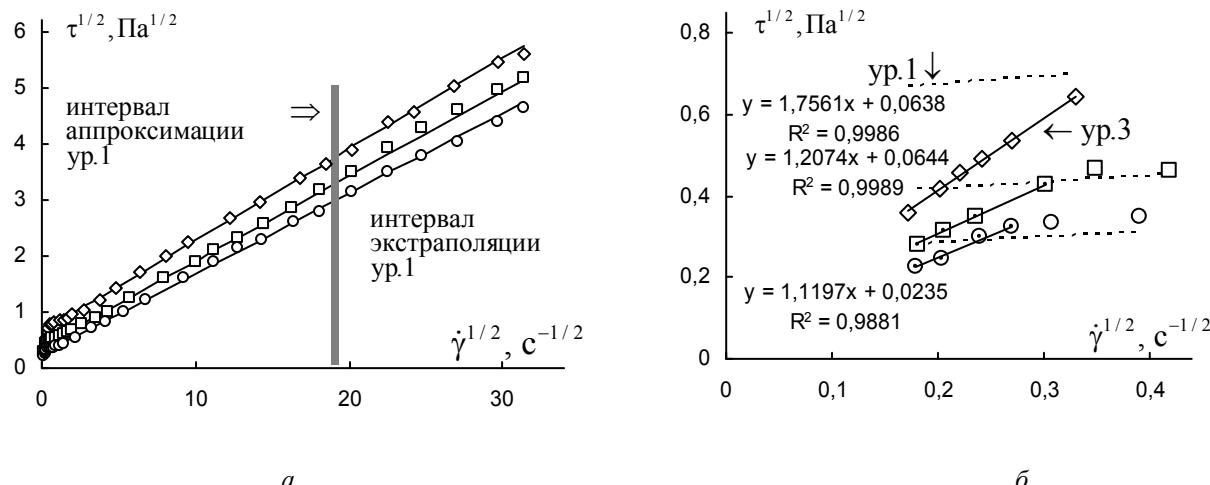


Рис. 2. Кривые течения наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °С в корневых координатах для массовых концентраций: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг):
 а – на полном интервале скоростей сдвига; б – на интервале низких скоростей сдвига

Fig. 2. Flow curves of iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C in root coordinates for mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle): a – at the full range of shear rates; b – at the range of low shear rates

На рисунке 2, б показан участок низких скоростей сдвига, где поведение напоминает «ньютоновское». В этой области низких скоростей сдвига наблюдается реологическое поведение, которое можно описать уравнением:

$$\tau^{1/2} = \eta_{cv}^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} + \tau_{cv}^{1/2}, \quad (3)$$

где положительный коэффициент $\tau_{cv}^{1/2}$ намного меньше коэффициента $\eta_{cv}^{1/2}$ (табл. 1). Такое реологическое поведение соответствует состоянию

структурь, при котором происходит одновременное разрушение агрегатов частиц в результате сдвига и формирование агрегатов частиц при столкновениях частиц в сдвиговом течении (доминирует процесс разрушения агрегатов, поскольку $\tau_{cv}^{1/2} > 0$). С другой стороны, величина $\tau_{cv}^{1/2}$ настолько мала, что поведение при малых скоростях легко принять за «ニュтоновское».

Таблица 1. Коэффициенты уравнений (1) и (2) для стационарного равновесного течения наножидкости на основе наночастиц Fe₂O₃ в этиленгликоле при температуре 30 °С и различных массовых концентрациях

Table 1. Coefficients of equations (1) and (2) for the stationary equilibrium flow of the nanofluid based on Fe₂O₃ nanoparticles in ethylene glycol at a temperature of 30 °C and various mass concentrations

Интервал	Высокие скорости сдвига			Низкие скорости сдвига			
	Концентрация	25 %	20 %	15 %	концентрация	25 %	20 %
$\tau_c^{1/2}$, (Па) ^{1/2}	0,646	0,399	0,254	$\tau_{cv}^{1/2}$	0,0638	0,0644	0,0235
$\eta_c^{1/2}$, (Па с) ^{1/2}	0,163	0,151	0,143	$\eta_{cv}^{1/2}$	1,756	1,207	1,120
χ , с ^{-1/2}	0,00127	0	0	—	—	—	—

Динамические модули как функция амплитуды сдвиговой деформации

Измерения динамических модулей G' и G'' в осциллирующем сдвиговом течении позволяют разделить вклады упругости и вязкости. Первоначальным тестом являлась [5] развертка по де-

формации сдвига на интервале от 0,1 % до 1000 % при фиксированной частоте $\omega = 10$ рад/с. Зависимость модуля потерь от амплитуды сдвиговой деформации $G''(\gamma_0)$ показана на рис. 3. Интервал амплитуд деформации условно можно разделить на три участка: малых, средних и больших амплитуд.

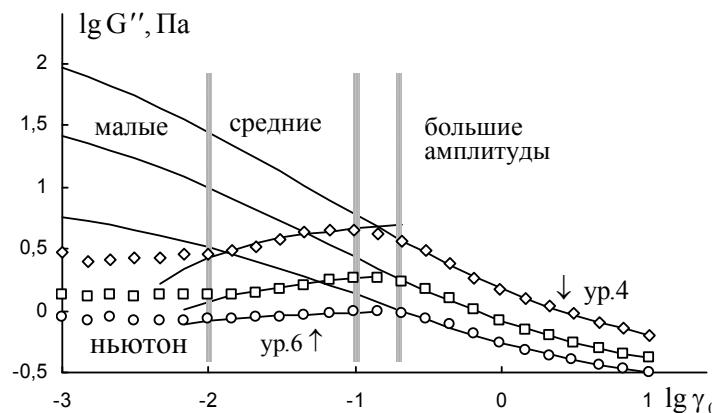


Рис. 3. Зависимость модуля потерь от амплитуды сдвиговой деформации (в условных единицах) при фиксированной частоте 10 рад/с в двойных логарифмических координатах для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °С для массовых концентраций: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг). Экспериментальные данные из [5]

Fig. 3. Dependence of the loss modulus on the amplitude of shear strain (in conventional units) at a fixed frequency of 10 rad/s in double logarithmic coordinates for iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C for mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle). Experimental data taken from [5]

Постоянная величина $G''(\gamma_0)$ наблюдается на интервале от 0,001 до 0,01 условных единиц. При последующем увеличении амплитуды модуль потерь увеличивается, достигает некого максимума и начинает монотонно снижаться (рис. 3). Исследователи [5] предполагают, что сначала структура остается постоянной, затем агрегаты частиц разрушаются, а сами наночастицы упорядочиваются в поле течения.

Для анализа реологической кривой $G''(\gamma_0)$ будем использовать полученные ранее уравнения структурной реологической модели [3].

Для интервала больших амплитуд аппроксимацию проводим с помощью уравнения:

$$G''^{1/2} = \frac{g'_A}{\gamma_0^{1/2} + \chi'_A} + G_\infty''^{1/2}. \quad (4)$$

Это реологическое уравнение описывает зависимость модуля потерь при изменении амплитуды деформации для системы, где под действием сдвига разрываются контакты между частицами. Чтобы использовать стандартные методы расчета

[3], введем величину амплитудного модуля потерь $G_A'' = \gamma_0 G''$. Тогда можно получить уравнение, сходное по форме с обобщенным уравнением течения:

$$G_A''^{1/2} = \gamma_0^{1/2} G''^{1/2} = \frac{g'_A \gamma_0^{1/2}}{\gamma_0^{1/2} + \chi'_A} + G_\infty''^{1/2} \gamma_0^{1/2}. \quad (5)$$

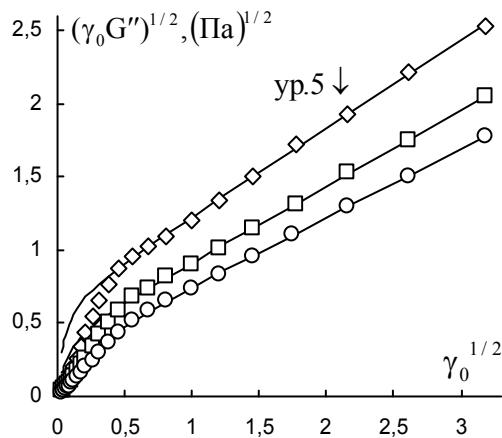
При определенных условиях количество контактов между частицами или прочность этих контактов могут увеличиваться под действием сдвига, что приводит к дополнительному формированию структур, индуцированных сдвигом. Тогда необходимо использовать уравнение вида:

$$G''^{1/2} \approx g'_{0A} - \frac{\Delta G_A''^{1/2}}{\gamma_0^{1/2}}. \quad (6)$$

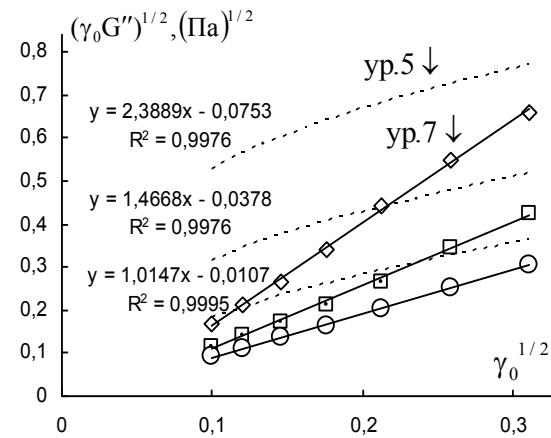
Умножая на $\gamma_0^{1/2}$, получим удобное для расчета уравнение:

$$G_A''^{1/2} = \gamma_0^{1/2} G''^{1/2} \approx g'_{0A} \gamma_0^{1/2} - \Delta G_A''^{1/2}. \quad (7)$$

Результаты аппроксимации уравнениями (5) и (7) показаны на рис. 4 в корневых координатах.



a



б

Рис. 4. Зависимость амплитудного модуля потерь от амплитуды сдвиговой деформации для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °C в корневых координатах для массовых концентраций 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг): *a* – на полном интервале амплитуд деформации; *б* – на интервале средних амплитуд деформации

Fig. 4. Dependence of the amplitude loss modulus on the amplitude of shear strain for iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C in root coordinates for mass concentrations 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle): *a* – on the full range of strain amplitudes; *b* – on the range of average strain amplitudes

Сплошные кривые на рис. 3 соответствуют уравнениям (4) и (6). На интервале малых амплитуд деформации с достаточной степенью точности можно считать, что величина $G''(\gamma_0)$ и, соответственно, динамическая вязкость $\eta'(\gamma_0)$ являются

Таблица 2. Коэффициенты уравнений (4) и (6) для модуля потерь $G''(\gamma_0)$ наножидкости на основе наночастиц Fe_2O_3 в этиленгликоле при температуре 30 °C и различных массовых концентрациях

Table 2. Coefficients of equations (4) and (6) for the loss modulus $G''(\gamma_0)$ of the nanofluid based on Fe_2O_3 nanoparticles in ethylene glycol at a temperature of 30 °C and various mass concentrations

Интервал Концентрация	Большие амплитуды			Средние амплитуды деформации			
	25 %	20 %	15 %	концентрация	25 %	20 %	
g'_A , (Па) $^{1/2}$	0,664	0,428	0,315	g'_{A0} , (Па) $^{1/2}$	2,389	1,467	
$G''_\infty^{1/2}$, (Па) $^{1/2}$	0,592	0,511	0,464	$\Delta G''_A^{1/2}$, (Па) $^{1/2}$	0,0753	0,0378	
χ'_A	0,042	0,062	0,134	Малые амплитуды деформации			
g'_A/χ'_A	15,81	6,90	2,35	G''_N , Па	2,68	1,32	
						0,84	

Рассмотрим случай больших амплитуд деформации. Величина $G''_\infty^{1/2}$ соответствует модулю потерь при бесконечно большой амплитуде, т.е. состоянию с наиболее разрушенной структурой. Коэффициент g'_A/χ'_A соответствует структурной части модуля потерь при предельно малой амплитуде, т.е. при максимально структурированном веществе. Разумно, что величина g'_A/χ'_A намного превышает $G''_\infty^{1/2}$. По мере увеличения концентрации коэффициент компактности χ'_A уменьшается, что свидетельствует об уменьшении вероятности спонтанного разрыва контакта между частицами. Увеличивается тенденция к формированию сплошного каркаса частиц в пределе малых амплитуд деформации.

В области средних амплитуд, где используется уравнение (6), происходит одновременно процесс разрушения агрегатов частиц под действием сдвига и процесс формирования агрегатов, но последний доминирует ($\Delta G''_A^{1/2} > 0$). Поэтому модуль потерь (а также динамическая вязкость) увеличиваются с ростом амплитуды (рис. 3).

В области малых амплитуд деформации разброс значений достаточно большой; но можно, в

постоянными величинами. В рамках структурной модели это означает, что «вязкая» структура не изменяется на этом интервале амплитуды деформации. Коэффициенты реологических уравнений приведены в табл. 2.

первом приближении считать поведение «ニュтона

новским» с неизменной структурой вещества и постоянным значением G''_N (табл. 2).

Зависимость модуля накопления от амплитуды сдвиговой деформации $G'(\gamma_0)$ показана на рис. 5. Можно условно выделить три интервала амплитуд с разными режимами «упругого» поведения.

На участке малых амплитуд визуально наблюдается «ニュтоновское» состояние, т.е. величина $G'(\gamma_0)$ и, соответственно, динамическая упругость $\eta''(\gamma_0)$ являются постоянными величинами. В рамках структурной модели это означает, что «упругая» структура практически не изменяется на интервале малой амплитуды деформации.

На участке средних и больших амплитуд модуль накопления монотонно уменьшается с ростом амплитуды. Для аппроксимации реологических кривых будем использовать уравнения для параметров упругости, полученные аналогично уравнениям для параметров вязкости:

$$G'^{1/2} = \frac{g''_A}{\gamma_0^{1/2} + \chi''_A} + G''_\infty^{1/2}, \quad (8)$$

$$G_A'^{1/2} = \gamma_0^{1/2} G'^{1/2} = \frac{g''_A \gamma_0^{1/2}}{\gamma_0^{1/2} + \chi''_A} + G_\infty'^{1/2} \gamma_0^{1/2}, \quad (9)$$

$$G'^{1/2} \approx g''_{0A} - \Delta G_A'^{1/2} / \gamma_0^{1/2}, \quad (10)$$

$$G_A'^{1/2} = \gamma_0^{1/2} G'^{1/2} \approx g''_{0A} \gamma_0^{1/2} - \Delta G_A'^{1/2}. \quad (11)$$

В соответствии с формой уравнений результаты аппроксимации лучше представить в корневых координатах зависимости амплитудного модуля накопления ($\gamma_0 G'$) от амплитуды сдвиговой деформации (рис. 6 и 7).

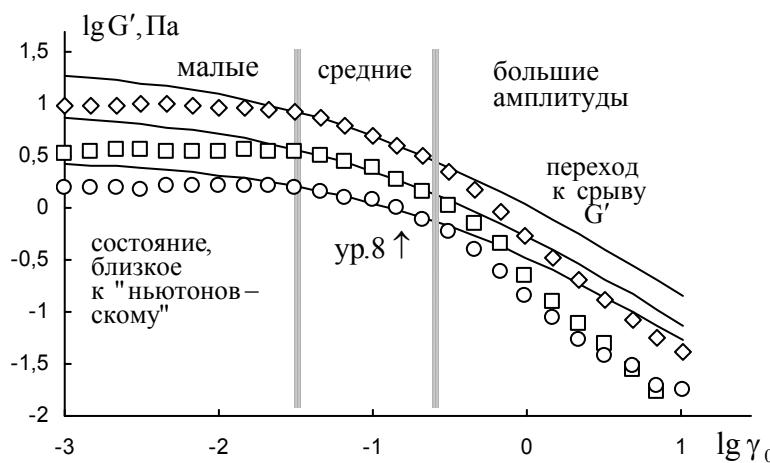


Рис. 5. Зависимость модуля накопления от амплитуды сдвиговой деформации (в условных единицах) при фиксированной частоте 10 рад/с в двойных логарифмических координатах для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °C для массовых концентраций: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг). Экспериментальные данные из [5]

Fig. 5. Dependence of the storage modulus on the amplitude of shear strain (in conventional units) at a fixed frequency of 10 rad/s in double logarithmic coordinates for the iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C for mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle). Experimental data taken from [5]



Рис. 6. Зависимость амплитудного модуля накопления от амплитуды сдвиговой деформации для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °C в корневых координатах для концентраций: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг)

Fig. 6. Dependence of the amplitude storage modulus on the amplitude of shear strain for the iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C in root coordinates for concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle)

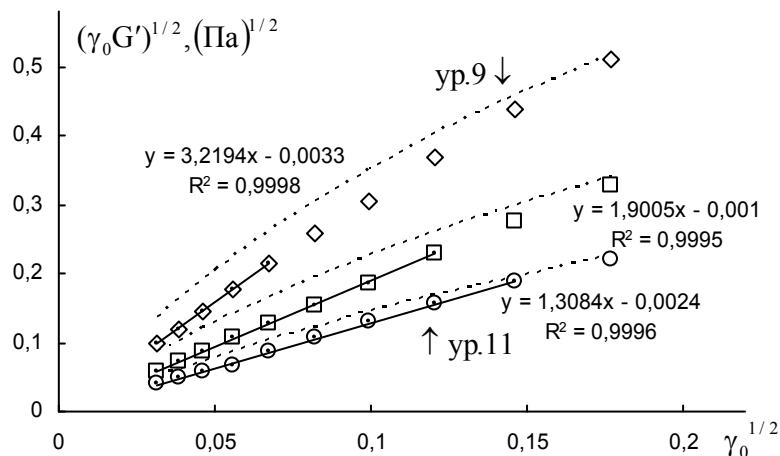


Рис. 7. Зависимость амплитудного модуля накопления от амплитуды сдвиговой деформации для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °C на интервале малых амплитуд деформации в корневых координатах для массовых концентраций: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг)

Fig. 7. Dependence of the amplitude storage modulus on the amplitude of shear strain for the iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C in the range of small deformation amplitudes in root coordinates for mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle)

Таблица 3. Коэффициенты уравнений (8) и (10) для модуля накопления $G'(\gamma_0)$ наножидкости на основе наночастиц Fe_2O_3 в этиленгликоле при температуре 30 °C и различных массовых концентрациях

Table 3. Coefficients of equations (8) and (10) for the storage module $G'(\gamma_0)$ of the nanofluid based on Fe_2O_3 nanoparticles in ethylene glycol at a temperature of 30 °C and various mass concentrations

Интервал Концентрация	Средние амплитуды			Малые амплитуды деформации		
	25 %	20 %	15 %	концентрация	25 %	20 %
$g''_A, (\text{Pa})^{1/2}$	1,309	0,966	0,856	$g''_{A0}, (\text{Pa})^{1/2}$	3,219	1,901
$G_\infty^{1/2}, (\text{Pa})^{1/2}$	0	0	0	$\Delta G_A^{1/2}, (\text{Pa})^{1/2}$	0,0033	0,0010
χ''_A	0,271	0,325	0,493	$\approx G'_N, \text{ Па}$	10,36	3,614
g''_A/χ''_A	4,833	2,972	1,736	—	—	—

Коэффициенты реологических уравнений приведены в табл. 3.

Рассмотрим случай средних амплитуд деформации. Величина $G_\infty^{1/2}$ соответствует модулю накопления при бесконечно большой амплитуде, т.е. состоянию с наиболее разрушенной структурой. Величина $G_\infty^{1/2}$ практически равна нулю, это означает, что отдельные наночастицы и отдельная жидкость – этиленгликоль не проявляют каких-либо упругих свойств в данном методе измерения. Коэффициент g''_A/χ''_A соответствует структурной части модуля накопления при предельно малой амплитуде, т.е. при максимально структурирован-

ном веществе. Отсюда следует, что в данном опыте упругость наножидкости обусловлена практически целиком ее структурой. Величина g''_A/χ''_A является основной характеристикой упругости наножидкости и намного превышает $G_\infty^{1/2}$. По мере увеличения концентрации коэффициент компактности χ''_A уменьшается, что свидетельствует об уменьшении вероятности спонтанного разрушения упругого агрегата.

В области малых амплитуд деформации (рис. 7) можно провести аппроксимацию по уравнению (11). Однако величина $\Delta G_A^{1/2}$ настолько

мала по сравнению с g''_{A0} , что можно в первом приближении считать поведение «ньютоновским» с неизменной «упругой» структурой вещества и постоянным значением G'_N (табл. 3).

В области больших амплитуд значение $(\gamma_0^{1/2} G'^{1/2})$ снижается, а затем приближается к постоянной величине по мере роста амплитуды. Это явление можно назвать срывом модуля упругости G' , что предположительно связано со сдвиговым расслоением образца при большой амплитуде скорости сдвига $\omega \gamma_0$.

Динамические модули как функция частоты сдвиговых колебаний

Частотная развертка динамических модулей получена при постоянной малой амплитуде деформации $\gamma_0 = 1\%$, т.е. в области линейной вязкоупругости. Значения модуля потерь показаны на рис. 8, *a*. Несмотря на значительный разброс экспериментальных точек, можно использовать реологические уравнения структурной модели на различных интервалах частот.

Если по мере увеличения амплитуды сдвиговых колебаний ($\gamma_0 \omega$) происходит постепенный разрыв контактов между частицами, то уменьшаются количество агрегированных частиц и, соответственно, динамическая вязкость η' , равная G''/ω . Реологическое уравнение имеет вид:

$$G''^{1/2} = \frac{g' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi'} + \eta_\infty^{1/2} \omega^{1/2}. \quad (12)$$

Если в результате сдвига происходят одновременно процесс разрушения агрегатов и процесс формирования агрегатов (так называемой структуры, индуцированной сдвигом), то используется уравнение:

$$G''^{1/2} = g'_0 \omega^{1/2} - \Delta G''^{1/2}. \quad (13)$$

В случае доминирования процесса формирования агрегатов коэффициент $\Delta G''^{1/2}$ является положительным и динамическая вязкость η' увеличивается с ростом частоты. Это аномальное увеличение динамической вязкости сходно с явлением сдвигового затвердевания при стационарном течении (рис. 9). Результаты аппроксимации показаны на рис. 8, 9; коэффициенты уравнений представлены в табл. 4.

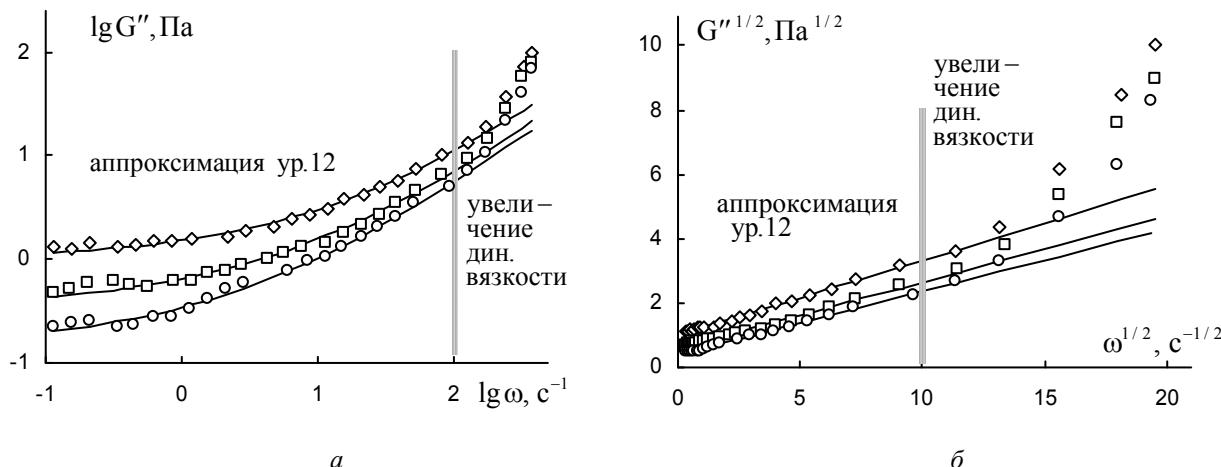


Рис. 8. Зависимость модуля потерь от частоты сдвиговых колебаний для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °C при массовых концентрациях: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг):
a – в двойных логарифмических координатах, *b* – в корневых координатах. Экспериментальные данные из [5]

Fig. 8. Dependence of the loss modulus on the frequency of shear oscillations for the iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C at mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle):
a – in double logarithmic coordinates, *b* – in root coordinates. Experimental data taken from [5]

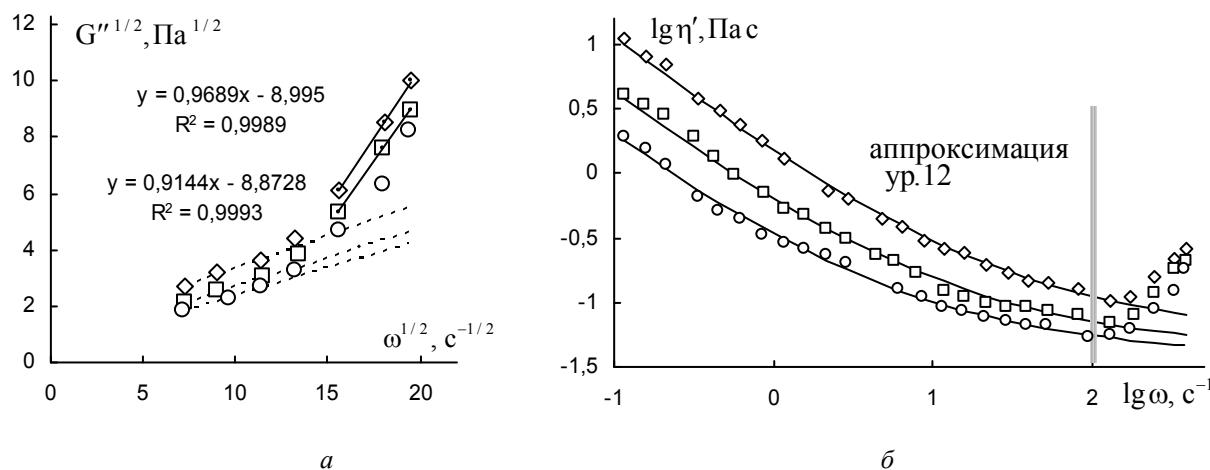


Рис. 9. Зависимость модуля потерь и динамической вязкости от частоты сдвиговых колебаний для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °С при массовых концентрациях: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг): *a* – модуль потерь на интервале высоких частот в корневых координатах, *б* – динамическая вязкость в двойных логарифмических координатах. Экспериментальные данные из [5]

Fig. 9. Dependence of the loss modulus and dynamic viscosity on the frequency of shear oscillations for iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C at mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle): *a* – loss modulus at the high frequency interval in root coordinates, *b* – dynamic viscosity in double logarithmic coordinates. Experimental data from [5]

Таблица 4. Коэффициенты уравнений (12) и (13) для модуля потерь $G''(\omega)$ наножидкости на основе наночастиц Fe_2O_3 в этиленгликоле при температуре 30 °С и различных массовых концентрациях

Table 4. Coefficients of equations (12) and (13) for the loss modulus $G''(\omega)$ of the nanofluid based on Fe_2O_3 nanoparticles in ethylene glycol at a temperature of 30 °C and various mass concentrations

Интервал	Низкие частоты			Высокие частоты колебаний				
	Концентрация	25 %	20 %	15 %	концентрация	25 %	20 %	15 %
g' , (Па) $^{1/2}$	1,00	0,594	0,386		g'_0	0,969	0,914	–
$\eta_\infty^{1/2}$, (Па с) $^{1/2}$	0,233	0,206	0,197		$\Delta G''^{1/2}$	8,995	8,873	–
χ'	0	0	0		–	–	–	–

Поскольку коэффициент компактности χ' равен нулю, то агрегаты в области низких частот имеют тенденцию к неограниченному росту по мере уменьшения частоты сдвиговых колебаний. Такое реологическое поведение динамической вязкости аналогично режиму пластичного течения. Реологическое поведение при высоких частотах сходно с явлением сдвигового затвердевания.

Значения модуля накопления показаны на рис. 10 в традиционных логарифмических координатах и на рис. 11 в корневых координатах. Несмотря на значительный разброс эксперименталь-

ных точек, можно выделить характерные интервалы частот и аппроксимировать кривые на этих участках уравнениями:

$$G'^{1/2} = \frac{g'' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi''} + \eta_\infty^{1/2} \omega^{1/2}, \quad (14)$$

$$G'^{1/2} = g'_0 \omega^{1/2} - \Delta G'^{1/2}. \quad (15)$$

Происхождение этих уравнений для упругости совершенно аналогично выводу уравнений для вязкости. Коэффициенты реологических уравнений приведены в табл. 5.

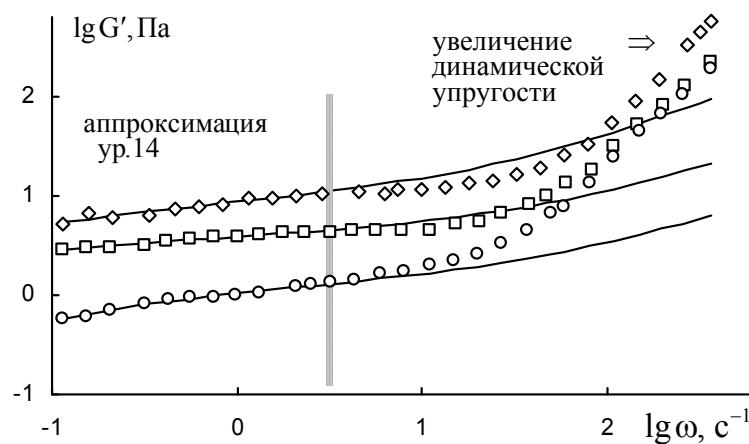


Рис. 10. Зависимость модуля накопления от частоты сдвиговых колебаний в двойных логарифмических координатах для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °С при массовых концентрациях: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг). Экспериментальные данные из [5]

Fig. 10. Dependence of the storage modulus on the frequency of shear oscillations in double logarithmic coordinates for the iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C at mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle). Experimental data taken from [5]

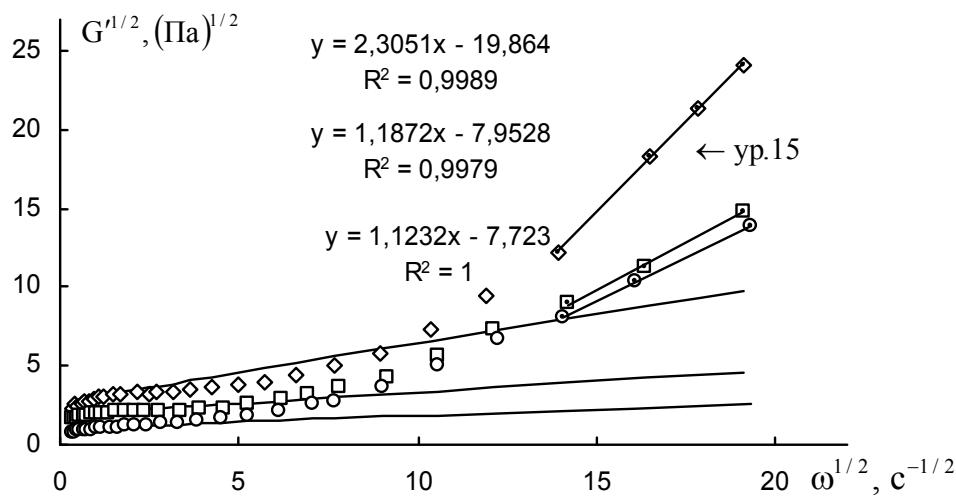


Рис. 11. Зависимость модуля накопления от частоты сдвиговых колебаний в корневых координатах для наножидкости оксид железа/этиленгликоль при 30 °С при массовых концентрациях: 25 % (ромб), 20 % (квадрат), 15 % (круг)

Fig. 11. Dependence of the storage modulus on the frequency of shear oscillations in root coordinates for the iron oxide/ethylene glycol nanofluid at 30 °C at mass concentrations: 25 % (rhombus), 20 % (square), 15 % (circle)

Таблица 5. Коэффициенты уравнений (14) и (15) для модуля накопления $G'(\omega)$ наножидкости на основе наночастиц Fe_2O_3 в этиленгликоле при температуре 30 °C и различных массовых концентрациях

Table 5. Coefficients of equations (14) and (15) for the storage modulus $G'(\omega)$ of the nanofluid based on Fe_2O_3 nanoparticles in ethylene glycol at a temperature of 30 °C and various mass concentrations

Интервал Концентрация	Низкие частоты			Высокие частоты колебаний			
	25 %	20 %	15 %	концентрация	25 %	20 %	15 %
g'' , (Па) $^{1/2}$	2,82	1,948	1,097	g''_0	2,31	1,19	1,12
$\eta_\infty''^{1/2}$, (Па с) $^{1/2}$	0,365	0,139	0,076	$\Delta G'^{1/2}$	19,86	7,95	7,72
χ''	0,096	0,068	0,164	—	—	—	—
g''/χ''	29,38	28,65	6,69	—	—	—	—

Поведение «упругих» агрегатов частиц несколько отличается от поведения агрегатов, обеспечивающих вязкость. Судя по табл. 5, в данном методе измерения следует принимать во внимание упругость «первичных» частиц $\{\eta_\infty''^{1/2}\}$, но структурная часть упругости $\{g''/\chi''\}$ существенно превышает упругость, связанную с индивидуальными частицами. С ростом концентрации дисперсной фазы коэффициент агрегации g'' и суммарная динамическая упругость $\eta_\infty''^{1/2}$ отдельных частиц увеличиваются, а коэффициент компактности χ'' уменьшается.

В области высоких частот согласно уравнениям (13) и (15) преобладает формирование агрегатов частиц, связанных с вязкостью, а также агрегатов частиц, связанных с упругостью.

Выводы

Рассмотрено в достаточно полном объеме, за исключением нормальных напряжений, реологическое поведение наножидкости, состоящей из наночастиц оксида железа в этиленгликоле. Уравнения структурной реологической модели достаточно хорошо аппроксимируют отдельные участки реологических кривых $\tau(\dot{\gamma})$, $G''(\omega)$, $G'(\omega)$, $G''(\gamma_0)$, $G'(\gamma_0)$. Характер реологического поведения на выбранных участках реологических кривых определяется состоянием структуры наножидкости: постоянная структура, уменьшение или

увеличение количества агрегированных частиц при изменении скорости сдвига, амплитуды или частоты сдвиговых колебаний.

Список источников / References

1. Кирсанов Е. А., Матвеенко В. Н. Неньютонаовское 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. Кирсанов Е. А., Матвеенко В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей. М. : Техносфера, 2022. 284 с. [Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Viscosity and elasticity of structured liquids. Moscow : Technosphere, 2022, 284 p. (in Russ.)].
3. Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютонаовское течение структурированных систем. XXXIV. Зависимость динамических модулей от амплитуды деформации в водной суспензии латекса // Жидк. крист. и их практич. использ. 2022. Т. 22, № 3. С. 58–70. [Vekovishchev M.P., Kirsanov E.A. Non-Newtonian flow of structured systems. XXXIV. Dependence of dynamic viscosity and dynamic elasticity on strain amplitude in aqueous latex suspension. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (3), 58–70 (in Russ.)]. DOI: 10.18083/LCAppl.2022.3.58.
4. Рудяк В. Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 1. С. 5–22. ISSN 1818–7994. [Rudyak V.Ya. Current state of research on the viscosity of nanofluids. *Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Physics*, 2015, **10** (1), 5–22 (in Russ.)].

5. Pastoriza-Gallego M.J., Lugo L., Legido J.L., Piñero M.M. Rheological non-Newtonian behaviour of ethylene glycol-based Fe₂O₃ nanofluids. *Nanoscale Res. Lett.*, 2011, **6**, 560–566.

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 6.12.2022, одобрена 25.01.2023, принята 6.02.2023

Received 6.12.2022, approved 25.01.2023, accepted 6.02.2023