

УДК 541. 182. 022: 532. 135

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-6-16

## НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ НАНОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ТИТАНА

**Вековищев М. П., Кирсанов Е. А.**

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

### **Аннотация**

**Цель:** рассмотреть реологическое поведение наножидкости, полученной на основе наночастиц оксида титана в воде и этиленгликоле.

**Процедура и методы.** Проведена аппроксимация экспериментальных данных уравнениями структурной реологической модели на отдельных интервалах скорости сдвига.

**Результаты.** Показана связь коэффициентов реологических уравнений с характером изменения структуры наножидкости, а именно формирования и разрушения агрегатов наночастиц.

**Теоретическая и/или практическая значимость.** Предложены уравнения, которые способны аппроксимировать экспериментальные данные на отдельных интервалах скорости сдвига, соответствующих определённому структурному состоянию наножидкости.

**Ключевые слова:** наножидкость, наночастицы оксида титана, структурная реологическая модель, реологические кривые

## NON-NEWTONIAN FLOW OF A NANOFUID BASED ON TITANIUM OXIDE

**M. Vekovishchev, E. Kirsanov.**

*State University of Humanities and Social Studies  
ul. Zelenaya 30, Kolomna 140411, Moscow Region, Russian Federation*

### **Abstract**

**Aim.** We consider the rheological behavior of a nanofluid obtained on the basis of titanium oxide nanoparticles in water and ethylene glycol.

**Methodology.** The experimental data are approximated using equations of the structural rheological model on separate intervals of the shear rate.

**Results.** A relationship is obtained between the coefficients of rheological equations and the nature of changes in the structure of the nanofluid, namely, the formation and destruction of nanoparticle aggregates.

**Research implications.** Equations are derived that make it possible to approximate experimental data at individual shear rate intervals corresponding to a certain structural state of the nanofluid.

**Keywords:** nanofluid, titanium oxide nanoparticles, structural rheological model, rheological curves

## Введение

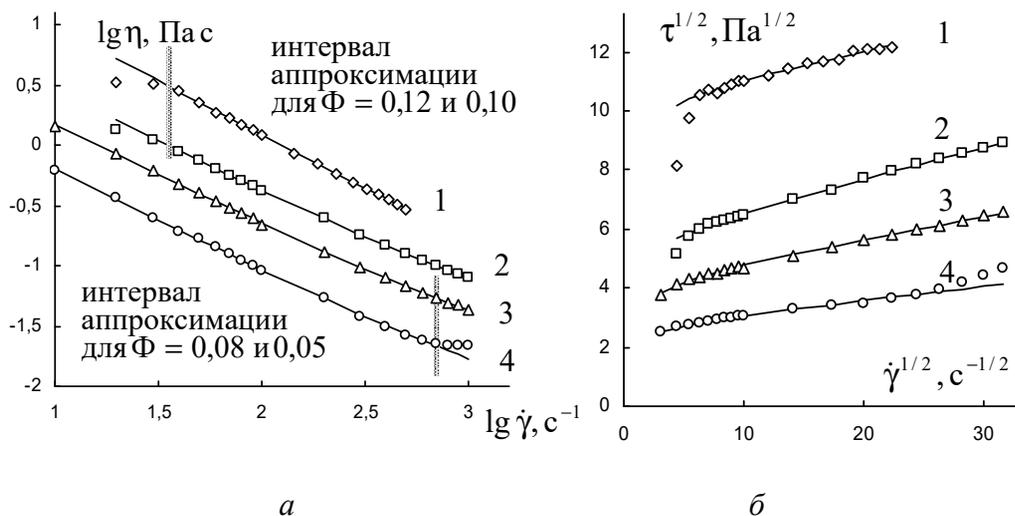
Наножидкости представляют собой ультрадисперсные системы с жидкой дисперсионной средой [1–4]. В случае твёрдых наночастиц систему часто называют золев или коллоидным раствором наночастиц. Некоторые исследователи [2] считают такие наножидкости особым объектом, отличным от традиционных систем коллоидной химии. Одним из важных применений наножидкости является увеличение теплопередачи в жидких средах.

При получении наножидкостей обычно используют высокодисперсные порошки стабильных металлов, их оксидов с характерными размерами частиц от 1 до 100 нм. В качестве жидкой фазы чаще всего выступают водные растворы, содержащие различные органические добавки и соли, препятствующие слипанию частиц. После смешивания нанопорошка с несущей жидкостью образец наножидкости подвергают длительному воздействию ультразвука [5–8].

Наибольшее внимание исследователей направлено на зависимость вязкости наножидкости от концентрации и размера наночастиц, а также от температуры. Однако при достаточно высокой концентрации наночастиц наножидкости демонстрируют неньютоновское поведение [5; 7–10]. Поэтому имеет смысл рассмотреть реологическое поведение наножидкостей с точки зрения структурной реологической модели [11; 12].

## Наножидкость на основе оксида титана в воде

В работе [8] исследовано стационарное течение наножидкости на основе наночастиц оксида титана в воде (рис. 1, *a*). Наночастицы имеют размеры от 7 до 20 нм и диспергированы в деионизированной воде.



**Рис. 1 / Fig. 1.** Реологические кривые наножидкости на основе наночастиц оксида титана в воде при температуре 25° С и объёмных концентрациях  $\Phi = 0,12$  (1), 0,10 (2), 0,08 (3), 0,05 (4):

*a* – кривые вязкости в двойных логарифмических координатах; *б* – кривые течения в корневых координатах / Curves of nanofluids based on titanium oxide nanoparticles in water at a temperature of 25° C and volumetric concentrations

$\Phi = 0.12$  (1), 0.10 (2), 0.08 (3), and 0.05 (4):

(a) viscosity curves in double logarithmic coordinates; (b) flow curves in root coordinates

Источник: [8].

По существующим представлениям [5] присутствие частиц в несущей «ньютоновской» жидкости увеличивает вязкость системы в результате возмущения сдвигового течения вращающимися частицами, а в особенности агрегатами частиц. В теории наножидкостей принято наименование – нанокластеры. Поэтому вязкость наножидкостей увеличивается с ростом концентрации дисперсной фазы. Значительное уменьшение сдвиговой вязкости при увеличении скорости сдвига (сдвиговое разжижение) объясняют разрушением нанокластеров при высоких напряжениях сдвига. Обычно полагают, что при достаточно низких концентрациях зависимость вязкости от скорости сдвига описывается степенным законом (уравнением Оствальда).

В рамках структурной реологической модели [11] вязкость увеличивается пропорционально количеству агрегированных частиц, т. е. возрастает с концентрацией. Разрушение агрегатов частиц объясняется действием разрывающих гидродинамических сил, сходных по природе с силами Стокса. Судя по виду кривых вязкости (рис. 1, *a*), степенной закон не выполняется достаточно строго при всех рассмотренных концентрациях, кроме того, имеются «ньютоновские» участки при низких или при очень высоких скоростях сдвига.

Аппроксимация на выделенных интервалах скоростей сдвига проводилась нами с помощью обобщённого уравнения течения [11].

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

Физический смысл коэффициента компактности  $\chi$ , коэффициента агрегации  $\tau_c^{1/2}$  и коэффициента вязкости Кэссона  $\eta_c^{1/2}$  описан в работе [11]. Результаты аппроксимации удобно представить в корневых координатах (рис. 1, б), поскольку рассчитанная кривая переходит в прямолинейную зависимость при высоких скоростях сдвига. Коэффициенты реологического уравнения представлены в табл. 1.

Суммарная вязкость неагрегированной системы описывается коэффициентом  $\eta_c$ , и, в целом, уменьшается с уменьшением концентрации, т. е. количества частиц в единице объёма. Структурная часть вязкости  $\tau_c^{1/2} / \chi$  обусловлена количеством и величиной агрегатов и также уменьшается с уменьшением концентрации. Ньютоновское поведение соответствует динамическому равновесию структуры, при котором количество агрегированных частиц не зависит от скорости сдвига.

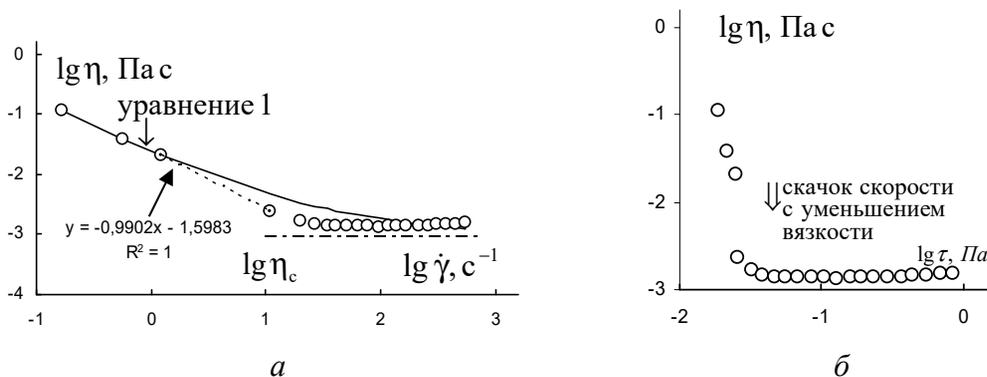
Таблица 1 / Table 1

**Коэффициенты обобщённого уравнения течения, величина корня предельной нулевой вязкости, корень из структурной вязкости, рассчитанные для наножидкости на основе наночастиц оксида титана в воде при температуре 25° С и различных объёмных концентрациях / Coefficients of the generalized flow equation, the value of the root of the limiting zero viscosity, and the root of the structural viscosity calculated for an aqueous nanofluid based on titanium oxide nanoparticles at a temperature of 25° C and various volume fractions**

<b>концентрация</b>	0,12	0,10	0,08	0,05	0,018
$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	10,41	5,63	4,24	2,70	0,125
$\eta_c^{1/2}$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	0,088	0,107	0,075	0,047	0,030
$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	0,265	0,371	0,567	0,451	0
$\tau_c^{1/2} / \chi$	39,35	15,18	7,48	5,98	-
$\eta^{1/2}(0)$ , (Па с) <sup>1/2</sup>	39,44	15,29	7,55	6,03	-

Источник: по данным авторов.

При очень низких концентрациях наночастиц ньютоновское поведение при высоких скоростях более выражено (рис. 2, *a*). В работе [9] использовались наночастицы  $\text{TiO}_2$  размером около 20 нм, диспергированные в воде при объёмной концентрации 1,18 об. %.



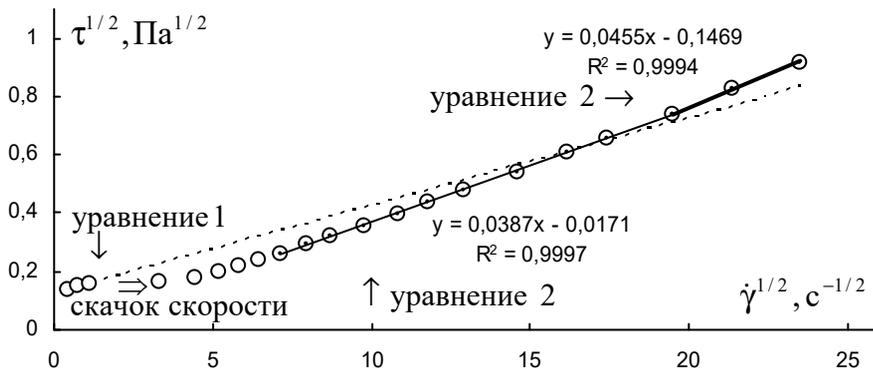
**Рис. 2 / Fig. 2.** Реологические кривые наножидкости на основе наночастиц оксида титана в воде при объёмной концентрациях  $\Phi = 0,018$ :

*a* – зависимость вязкости от скорости сдвига; *b* – зависимость вязкости от напряжения сдвига / Rheological curves of a nanofluid based on titanium oxide nanoparticles in water at volume concentrations  $\Phi = 0.018$ :

(*a*) dependence of viscosity on shear rate; (*b*) dependence of viscosity on shear stress

Источник: [9].

При такой низкой концентрации уравнение (1) можно использовать только на малом интервале низких скоростей сдвига. В дальнейшем, при крайне малом увеличении напряжения сдвига  $\tau$  происходит резкое увеличение скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (и соответствующее резкое уменьшение вязкости), которое связывают со сдвиговым расслоением вещества. Этот эффект хорошо виден на кривой  $\eta(\tau)$  в двойных логарифмических координатах (рис. 2, *b*) и на кривой  $\tau(\dot{\gamma})$  в корневых координатах (рис. 3). Скачкообразный переход от одного режима течения к другому показан на рис. 2, *a* пунктирной линией ( $\eta \sim 1/\dot{\gamma}$ ). Участок высоких скоростей сдвига можно считать «ньютоновским», поскольку зависимости  $\eta(\tau)$  и  $\eta(\dot{\gamma})$  примерно параллельны оси абсцисс. Экспериментально полученные значения вязкости  $\eta$  превышают рассчитанную предельную вязкость  $\eta_c$  максимально разрушенной структуры (штрихпунктирная прямая на рис. 2, *a*).



**Рис. 3 / Fig. 3.** Кривая течения в корневых координатах для наножидкости на основе наночастиц оксида титана в воде при объёмных концентрациях  $\Phi = 0,018$  / Flow curve in root coordinates for a nanofluid based on titanium oxide nanoparticles in water at volume concentrations  $\Phi = 0.018$

Источник: [9].

Однако, на рис. 3 можно видеть, что в корневых координатах с достаточно хорошей точностью выполняется линейная зависимость вида

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

В рамках структурной реологической модели [12] коэффициенты этого реологического уравнения имеют следующий вид:  $\eta_{cv}^{1/2} = \eta_{\infty}^{1/2} + BNk_3 / (k_3 + k_1)$ ;

$$\tau_{cv}^{1/2} = BN(k_0 - k_2) / (k_3 + k_1). \quad (3)$$

В модели предполагается, что агрегаты и индивидуальные частицы являются элементами структуры, которые обеспечивают вязкость при сдвиговом течении. Если в единице объёма содержится  $N$  частиц, то количество агрегированных частиц обозначим как  $N_2$ , а количество индивидуальных частиц как  $N_1$ .

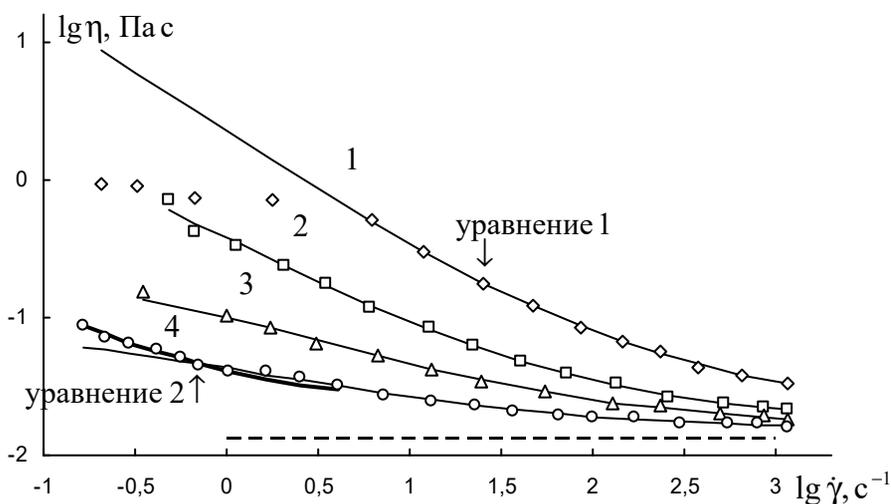
Выражение (3) содержит следующие коэффициенты:  $k_2$  – константа скорости формирования агрегатов при случайных столкновениях частиц;  $k_0$  – константа скорости спонтанного разрушения агрегатов, например, в результате теплового движения;  $k_1$  – константа скорости разрушения агрегата под действием растягивающих гидродинамических сил,  $k_3$  – константа скорости формирования агрегатов частиц из одиночных частиц под действием сдвига. Коэффициент  $B$  не зависит от скорости сдвига.

Коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  является положительным, если  $k_0 > k_2$ , и отрицательным, если  $k_0 < k_2$ . Поэтому на данном интервале скоростей возможны три вида реологического поведения. В первом случае ( $k_0 > k_2$ ), вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига (явление сдвигового затвердевания). Во втором случае ( $k_0 < k_2$ ) вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, причём коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  меньше или сравним по величине с коэффициентом  $\eta_{cv}^{1/2}$ . В третьем случае коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  близок к нулю при условии  $k_0 \approx k_2$ , тогда реологическое поведение

похоже на «ньютоновское» течение с практически постоянным значением сдвиговой вязкости  $\eta_{cv}$ .

### Наножидкость на основе оксида титана в этиленгликоле

Реологическое поведение наножидкости на основе оксида титана в этиленгликоле рассмотрено в работе [10]. Реологические кривые несколько отличаются по виду от тех, что получены для водной наножидкости. Однако, на графиках (рис. 4, 5) имеются аналогичные участки кривых: режим, близкий к «ньютоновскому»; участок снижения вязкости за счёт разрушения агрегатов (уравнение 1). Кроме того, на рис. 4 жирной линией выделено реологическое поведение, описанное уравнением (2). Штриховая горизонтальная линия изображает вязкость этиленгликоля.



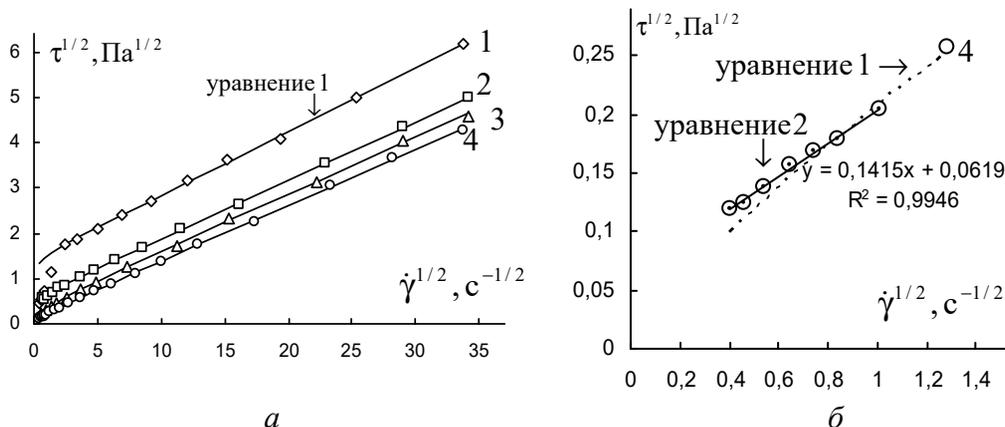
**Рис. 4 / Fig. 4.** Кривые вязкости в двойных логарифмических координатах для наножидкости на основе наночастиц оксида титана в этиленгликоле при массовых концентрациях 25% (1), 15% (2), 10% (3), 5% (4) / Viscosity curves in double logarithmic coordinates for a nanofluid based on titanium oxide nanoparticles in ethylene glycol at mass concentrations of 25% (1), 15% (2), 10% (3), 5% (4)

Источник: [10].

Результаты аппроксимации более ясно выражены на графиках в корневых координатах (рис. 5). Рассчитанная по уравнению (1) зависимость асимптотически приближается к прямой при высоких скоростях сдвига (рис. 5, а). Структура наножидкости постепенно разрушается при увеличении скорости сдвига ( $k_1 > 0$ ,  $k_3 = 0$ ). Коэффициенты обобщённого уравнения течения приведены в табл. 2.

Прямая, соответствующая уравнению (2), пересекает ось ординат при положительных значениях (рис. 5, б). Вязкость уменьшается с ростом скорости

сдвига; коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  меньше коэффициента  $\eta_{cv}^{1/2}$ . В этом случае одновременно происходят два процесса: формирование агрегатов под действием сдвига и разрушение агрегатов под действием сдвига, но доминирует процесс разрушения ( $k_0 < k_2$ ,  $k_1 > 0$ ,  $k_3 > 0$ ).



**Рис. 5 / Fig. 5.** Кривые течения в корневых координатах для наножидкости на основе наночастиц оксида титана в этиленгликоле при массовых концентрациях 25% (1), 15% (2), 10% (3), 5% (4):

*a* – кривые течения на полном интервале скоростей сдвига; *б* – кривая течения для массовой концентрации 5% на интервале низких скоростей / Flow curves in root coordinates for a nanofluid based on titanium oxide nanoparticles in ethylene glycol at mass concentrations of 25% (1), 15% (2), 10% (3), 5% (4):

(*a*) flow curves over the full range of shear rates; (*b*) flow curve for 5% mass concentration in the low velocity range

Источник: [10].

Таблица 2 / Table 2

**Коэффициенты обобщённого уравнения течения, величина корня предельной нулевой вязкости, корень из структурной вязкости, рассчитанные для наножидкости на основе наночастиц оксида титана в этиленгликоле при различных массовых концентрациях / Coefficients of the generalized flow equation, the value of the root of the limiting zero viscosity, and the root of the structural viscosity calculated for an aqueous nanofluid based on titanium oxide nanoparticles at various weight concentrations**

концентрация	25%	15%	10%	5%
$\tau_c^{1/2}$ , Па <sup>1/2</sup>	1,430	0,603	0,371	0,162
$\eta_c^{1/2}$ , (Пас) <sup>1/2</sup>	0,140	0,128	0,125	0,123
$\chi$ , с <sup>-1/2</sup>	0,055	0,239	0,945	0,917

концентрация	25%	15%	10%	5%
$\tau_c^{1/2} / \chi$	26,10	2,52	0,393	0,176
$\eta^{1/2}(0), (\text{Па с})^{1/2}$	26,24	2,65	0,518	0,299

Источник: по данным авторов.

### Выводы

Рассмотрено реологическое поведение наножидкостей на основе наночастиц оксида титана в воде и в этиленгликоле. Аппроксимация реологических кривых в случае стационарного сдвигового течения проведена с помощью уравнений структурной реологической модели. Обнаружены характерные особенности реологического поведения, которые встречаются в других структурированных жидкостях: участок ньютоновского течения; сдвиговое разжижение; сдвиговое затвердевание, эффект резкого увеличения скорости сдвига при незначительном увеличении напряжения сдвига.

*Статья поступила в редакцию 14.10.2022 г.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mahbubul I. M., Saidur R., Amalina M. A. Latest developments on the viscosity of nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. Iss. 4. P. 874–885. DOI: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2011.10.021.
2. Рудяк В. Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 1. С. 5–22.
3. Haisheng Chen, Yulong Ding, Chunqing Tan. Rheological behaviour of nanofluids // New Journal of Physics. 2007. Vol. 9. P. 367–391. doi:10.1088/1367-2630/9/10/367.
4. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets / Mehrali M., Sadeghinezhad E., Tahan Latibari S., Kazi S. N., Mehrali M., Zubir M. N., Metselaar H. S. C. // Nanoscale Research Letters. 2014. Vol. 9. P. 15–24. DOI: 10.1186/1556-276X-9-15.
5. Hasan S. M. Non-Newtonian rheological characteristics of oil-based metal oxide nanofluids: a thesis for the degree master of science. Department of Mechanical Engineering, Northern Illinois University. De Kalb, Illinois, 2017. 55 p.
6. Saeedi A. H., Akbari M., Toghraie D. An experimental study on rheological behavior of a nanofluid containing oxide nanoparticle and proposing a new correlation // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2018. Vol. 99. P. 285–293. DOI: 10.1016/j.physe.2018.02.018.
7. Rheological non-Newtonian behaviour of ethylene glycol-based Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids / Pastoriza-Gallego M. J., Lugo L., Legido J. L., Piñeiro M. M. // Nanoscale Research Letters. 2011. Vol. 6. P. 560–566. DOI: 10.1186/1556-276X-6-560.
8. Tseng W. J., Lin K. Rheology and colloidal structure of aqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle suspensions // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 355. Iss. 1–2. P. 186–192. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00063-7.
9. Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing through a vertical pipe / He Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H. // International

- Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. Iss. 11–12. P. 2272–2281. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024.
10. Rheological and volumetric properties of TiO<sub>2</sub>-ethylene glycol nanofluids / Cabaleiro D., Pastoriza-Gallego M. J., Gracia-Fernandez C., Pineiro M. M., Lugo L. // *Nanofluids. Nanoscale Research Letters*. 2013. Vol. 8. Article number: 286. DOI: 10.1186/1556-276X-8-286.
  11. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М.: Техносфера, 2016. 384 с.
  12. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей. М.: Техносфера, 2022. 284 с.

## REFERENCES

1. Mahbulul I. M., Saidur R., Amalina M. A. Latest developments on the viscosity of nanofluids. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, iss. 4, pp. 874–885. DOI: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2011.10.021.
2. Rudyak V. Ya. [State-of-the-art study of nanofluid viscosity]. In: *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika* [Vestnik NSU. Series: Physics], 2015, vol. 10, no. 1, pp. 5–22.
3. Haisheng Chen, Yulong Ding, Chunqing Tan. Rheological behaviour of nanofluids. In: *New Journal of Physics*, 2007, vol. 9, pp. 367–391. DOI: 10.1088/1367-2630/9/10/367.
4. Mehrali M., Sadeghinezhad E., Tahan Latibari S., Kazi S. N., Mehrali M., Zubir M. N., Metselaar H. S. C. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. In: *Nanoscale Research Letters*, 2014, vol. 9, pp. 15–24. DOI: 10.1186/1556-276X-9-15.
5. Hasan S. M. Non-Newtonian rheological characteristics of oil-based metal oxide nanofluids: a thesis for the degree master of science. Department of Mechanical Engineering, Northern Illinois University. De Kalb, Illinois, 2017. 55 p.
6. Saeedi A. H., Akbari M., Toghraie D. An experimental study on rheological behavior of a nanofluid containing oxide nanoparticle and proposing a new correlation. In: *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2018, vol. 99, pp. 285–293. DOI: 10.1016/j.physe.2018.02.018.
7. Pastoriza-Gallego M. J., Lugo L., Legido J. L., Piñeiro M. M. Rheological non-Newtonian behaviour of ethylene glycol-based Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids. In: *Nanoscale Research Letters*, 2011, vol. 6, pp. 560–566. DOI: 10.1186/1556-276X-6-560.
8. Tseng W. J., Lin K. Rheology and colloidal structure of aqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle suspensions. In: *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 355, iss. 1–2, pp. 186–192. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00063-7.
9. He Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H. Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing through a vertical pipe. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 50, iss. 11–12, pp. 2272–2281. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024.
10. Cabaleiro D., Pastoriza-Gallego M. J., Gracia-Fernandez C., Pineiro M. M., Lugo L. Rheological and volumetric properties of TiO<sub>2</sub>-ethylene glycol nanofluids. In: *Nanofluids. Nanoscale Research Letters*, 2013, vol. 8, article number: 286. DOI: 10.1186/1556-276X-8-286.
11. Kirsanov Ye. A., Matveenko V. N. *Nen'yutonovskoe techenie dispersnykh, polimernykh i zhidkokristallicheskikh sistem. Strukturnyi podkhod* [Non-Newtonian flow of dispersed, polymeric and liquid crystal systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016. 384 p.

12. Kirsanov Ye. A., Matveyenko V. N. *Vyazkost' i uprugost' strukturirovannykh zhidkostey* [Viscosity and elasticity of structured liquids]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 284 p.
- 

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Вековищев Михаил Петрович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;  
e-mail: mpv.71@mail.ru;

*Кирсанов Евгений Александрович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;  
e-mail: Kirsanov47@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mikhail P. Vekovishchev* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., State University of Humanities and Social Studies;

e-mail: mpv.71@mail.ru;

*Evgeny A. Kirsanov* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., State University of Humanities and Social Studies;

e-mail: Kirsanov47@mail.ru.

---

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение наножидкости на основе оксида титана // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 4. С. 6–16.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-6-16.

### FOR CITATION

Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A. Non-Newtonian flow of a nanofluid based on titanium oxide. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 4, pp. 6–16.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-6-16.