

УДК 541.182.022:532.135

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-16-25

НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А., Кривошапова О. В.

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

Аннотация

Цель: рассмотреть реологическое поведение магнитореологической жидкости, полученной на основе частиц магнетита в ионной жидкости.

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

Результаты. Показана связь коэффициентов реологических уравнений с характером структуры суспензии магнетита во внешнем магнитном поле.

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

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость, структурная реологическая модель, обобщённое уравнение течения, реологические кривые

A NON-NEWTONIAN FLOW OF A MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

M. Vekovichchev, E. Kirsanov, O. Krivoshchapova

*State University of Humanities and Social Studies
30 ulitsa Zelyonaya, Kolomna 14041, Moscow region, Russian Federation*

Abstract

Aim. The paper considers the rheological behavior of a magnetorheological fluid obtained on the basis of magnetite particles in an ionic liquid.

Methodology. Use is made of an approximation of the experimental data by the equations of the structural rheological model on separate intervals of the shear rate.

Results. The relationship between the coefficients of rheological equations and the nature of the structure of a magnetite suspension in an external magnetic field is demonstrated.

Research implications. Equations are proposed that are capable of approximating experimental data on separate intervals of the shear rate corresponding to a certain structural state of a magnetorheological fluid.

Keywords: magnetorheological fluid, structural rheological model, generalized flow equation, rheological curves

Введение

Магнитореологические жидкости (МР-жидкости) представляют собой суспензии микрочастиц (или наночастиц) магнитных материалов в органических жидкостях [1]. Под действием магнитного поля частицы, случайно распределённые в объёме дисперсной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля. В простейшем случае образуются цепочки из нескольких частиц, параллельные силовой линии. Магнитное взаимодействие между частицами способствует образованию агрегатов, что приводит к значительному увеличению вязкости МР-жидкости. Вязкость МР-жидкости зависит от индукции внешнего магнитного поля, материала частиц, дисперсионной среды, размеров частиц и их объёмной концентрации, а также других параметров [2; 3].

Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты частиц, что приводит к изменению магнитных, оптических и реологических свойств суспензии. Высокая чувствительность свойств вещества к внешнему полю позволяет управлять поведением магнитных жидкостей и использовать их в прикладных задачах. К настоящему времени МР-жидкости используются в клапанах, в устройствах для герметизации вводов вращающихся валов, в антифрикционных узлах, в многокоординатных акселерометрах, в демпферах различного вида, в ультразвуковой дефектоскопии для создания акустического контакта и т. п. [4].

Практически всегда МР-жидкости в присутствии внешнего магнитного поля демонстрируют неньютоновское поведение [5–7]. Для аппроксимации кривых течения $\tau(\dot{\gamma})$ обычно используют два известных реологических уравнения [1]. Уравнение Бингама имеет вид:

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где τ_y – предельное напряжение сдвига, η_p – пластическая вязкость. Это уравнение может быть получено из нескольких микрореологических моделей, причём коэффициент τ_y характеризует структуру системы, точнее, особенности агрегатов частиц. Уравнение Гершеля-Балкли имеет вид:

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n, \quad (2)$$

где τ_y – предельное напряжение сдвига, K – коэффициент консистентности, n – показатель степени, характеризующий отклонение от ньютоновского поведения, где $n=1$.

В работе [1] также отмечено, что величина τ_y получена фактически экстраполяцией к нулевой величине $\dot{\gamma}$, поэтому она не является однозначной характеристикой вещества. Известно [6; 9], что уравнение Бингама хорошо описывает только небольшой интервал высоких скоростей сдвига. Уравнение Гершеля-Балкли хорошо описывает большой интервал скоростей, в том числе, близких к нулю. Однако это эмпирическое уравнение не имеет какого-либо микрореологического обоснования.

В известных экспериментах сдвиговая вязкость η увеличивается при увеличении напряжённости магнитного поля H , при этом обычно возрастают все коэффициенты использованных уравнений [5; 9].

В первоначальных теоретических моделях [2; 3] агрегаты ферромагнитных сферических частиц образуют цепи во внешнем магнитном поле за счёт взаимного притяжения намагниченных частиц. В процессе сдвигового течения цепи разрываются под действием растягивающих гидродинамических сил, сходных с силой Стокса. Сила межчастичного взаимодействия равна $F_s \sim \mu_0 m^2 / r^4$, где m – магнитный момент частицы, r – радиус частицы, μ_0 – магнитная постоянная. В результате расчёта получается реологическое уравнение, сходное с уравнением Бингама:

$$\tau = \mu_0 m n H \langle \sin \alpha \rangle + \eta_0 \dot{\gamma},$$

где n – объёмная концентрация частиц, η_0 – вязкость дисперсионной среды, $\langle \sin \alpha \rangle$ – усреднённое значение ориентации цепочек в сдвиговом течении.

В других работах [8; 9] представлены сходные уравнения для магнитной силы притяжения между частицами, но во всех случаях $F_s \sim m^2$.

Рассмотрим экспериментальные результаты [6] с точки зрения структурной реологической модели [10].

Аппроксимация экспериментальных данных и обсуждение результатов

Экспериментальные данные из работы [6] используются для проверки положений структурной реологической модели [10]. Магнитореологическая жидкость (MR – жидкость) представляет собой суспензию частиц магнетита (оксид железа II, III) размером около 5 мкм, диспергированную в ионной жидкости. Ионной жидкостью называют вещество, состоящее полностью из ионов, но находящееся в жидком состоянии при температурах ниже 100°C. В данном случае используется диамагнитное органическое соединение тригексилтетрадецилфосфония хлорид (trihexyltetradecylphosphonium chloride) с температурой плавления -70°C, вязкостью 2,45 Па·с, плотностью 0,89 г/см³. Плотность магнетита находится в интервале 4,8–5,1 г/см³. Седиментация незначительна. Измерения вязкости выполнены при температуре 25°C, с помощью торсионного вискозиметра с параллельными пластинами и устройством для создания магнитного поля, перпендикулярного направлению скорости течения.

Экспериментальные данные показаны на рис. 1 для магнитореологической жидкости MRF10 с массовой концентрацией магнетита 8,5%. Очевидно, что сдвиговая вязкость η снижается с увеличением скорости сдвига $\dot{\gamma}$, т. е. наблюдается «сдвиговое разжижение». При наложении магнитного поля H значение вязкости значительно возрастает.

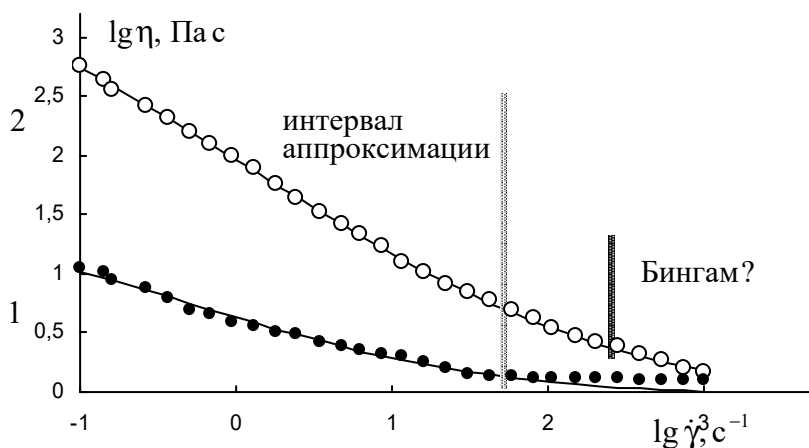


Рис. 1 / Fig. 1. Зависимость сдвиговой вязкости от скорости сдвига в магнито-реологической жидкости MRF10 с массовой концентрацией магнетита 8,5% в двойных логарифмических координатах в отсутствие магнитного поля (1) и при напряжённости магнитного поля 156 кА/м (2) / Dependence of the shear viscosity on the shear rate in a magnetorheological fluid MRF10 with a mass concentration of magnetite of 8.5% in double logarithmic coordinates in the absence of a magnetic field (1) and at a magnetic field strength of 156 kA/m (2)

Источник: [6].

Рассмотрим характер реологических кривых в рамках структурной реологической модели [10], используя обобщённое уравнение течения:

$$\tau^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (3)$$

Коэффициент компактности χ указывает на тенденцию к образованию бесконечно большого объединения частиц при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$. Значение коэффициента χ определяет пластичное ($\chi = 0$) или псевдопластичное ($\chi > 0$) реологическое поведение. Коэффициент агрегации $\tau_c^{1/2}$ характеризует величину агрегации частиц и пропорционален силе сцепления между частицами, т. е. силе, необходимой для разрыва контакта между частицами. Коэффициент вязкости Кэссона η_c равен вязкости дисперсной системы при полном отсутствии контактов между частицами. Аппроксимация экспериментальных данных проводится с помощью минимизации суммы квадратов разностей $СКР = \sum (\tau_i^{1/2} - \tau_{i,расч}^{1/2})^2$. Поэтому результаты аппроксимации удобно представить в корневых координатах (рис. 2 а). Интервал аппроксимации ограничен вертикальной линией. Коэффициенты уравнений приведены в табл. 1.

Подробное рассмотрение графика (рис. 2 а) позволяет выделить два интервала скоростей сдвига. На участке низких скоростей справедливо обобщённое

уравнение течения (3). На участке высоких скоростей наблюдаются отклонения, по-видимому, связанные с изменением характера структуры.

В отсутствии поля система ведёт себя как типичная суспензия с некоторой агрегацией частиц. При низких скоростях наблюдается псевдопластичное течение с $\chi = 0,36$ (сплошная линия). При высоких скоростях – пластичное течение с $\chi = 0$, $\tau_c^{1/2} = 0,36$ Па, $\eta_c^{1/2} = 1,12$ Па·с (пунктирная линия). При напряжённости магнитного поля 156 кА/м зависимость $\tau^{1/2}(\dot{\gamma}^{1/2})$ хорошо аппроксимируется уравнением (3) на интервале аппроксимации и даже возможна экстраполяция расчётной кривой на область высоких скоростей сдвига.

Отдельно рассмотрим возможность использования уравнения Бингама. Действительно, на очень малом интервале высоких скоростей (рис. 2 б) можно обнаружить «прямую Бингама» в линейных координатах. Пунктирная линия соответствует уравнению (3) и достаточно хорошо описывает весь интервал измерений.

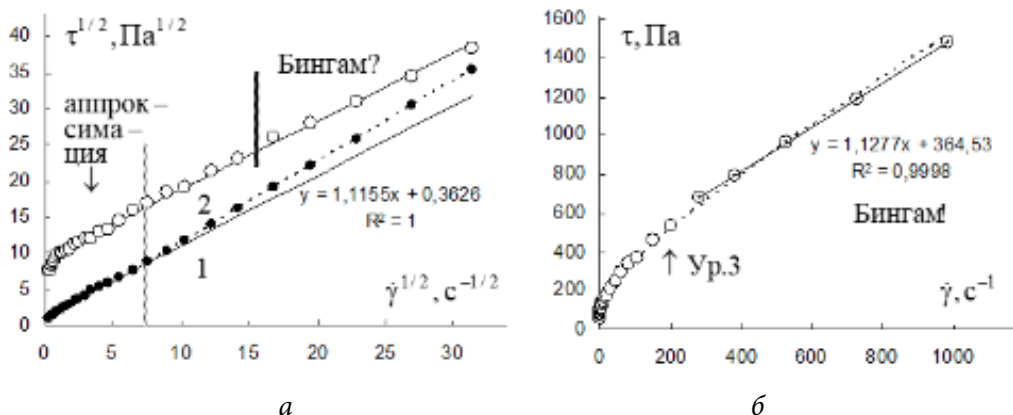


Рис. 2 / Fig. 2. Реологические кривые магнитореологической жидкости MRF10 с массовой концентрацией магнетита 8,5%:

a – в корневых координатах в отсутствии магнитного поля (1) и при напряжённости магнитного поля 156 кА/м (2); *б* – в линейных координатах при напряжённости магнитного поля 156 кА/м / Rheological curves of a magnetorheological fluid MRF10 with a mass concentration of magnetite 8.5%:

a – in root coordinates in the absence of a magnetic field (1) and at a magnetic field strength of 156 kA/m (2); *б* – in linear coordinates at a magnetic field strength of 156 kA/m

Источник: [6].

Увеличение концентрации магнетита в общем не меняет характер реологических кривых. Интервал аппроксимации уравнением (3) несколько расширяется (рис. 3 *a*).

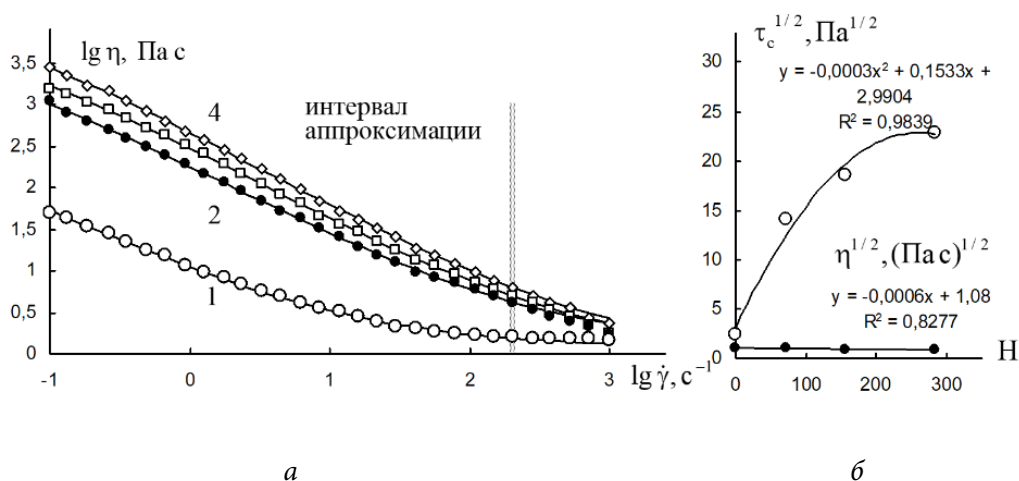


Рис. 3 / Fig. 3. Реологические характеристики магнито-реологической жидкости MRF9 с массовой концентрацией магнетита 25%:

a – зависимость сдвиговой вязкости от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах в отсутствие магнитного поля (1) и при напряжённости магнитного поля 73 кА/м (2); 156 кА/м (3); 282 кА/м (4); *б* – рассчитанная зависимость коэффициентов обобщённого уравнения течения $\tau_c^{1/2}$ (кружки) и $\eta_c^{1/2}$ (точки) от напряжённости магнитного поля H (кА/м) / Rheological characteristics of a magnetorheological fluid MRF9 with a mass concentration of magnetite 25%:

a – dependence of the shear viscosity on the shear rate in double logarithmic coordinates in the absence of a magnetic field (1) and at a magnetic field strength of 73 kA/m (2), 156 kA/m (3), and 282 kA/m (4); *б* – calculated dependence of the coefficients of the generalized flow equation (circles) and (dots) on the magnetic field strength H (kA/m)

Источник: [6].

Изменение характера реологических кривых при переходе от низких к высоким скоростям можно видеть на рис. 4 *a* в корневых координатах. Важно отметить, что значение коэффициента Кэссона $\eta_c^{1/2}$ практически не изменяется при изменении величины магнитного поля (рис. 3 *б*). Это подтверждает положение структурной модели [10] о том, что предельная вязкость при «бесконечной скорости сдвига» обусловлена только обтеканием индивидуальных частиц вязкой жидкостью – носителем. Увеличение напряжённости магнитного поля H приводит к увеличению магнитного момента m частицы магнетита, и, соответственно, силы сцепления F_s между частицами. Тогда понятно увеличение коэффициента агрегации τ_c с увеличением величины поля (рис. 4 *б*).

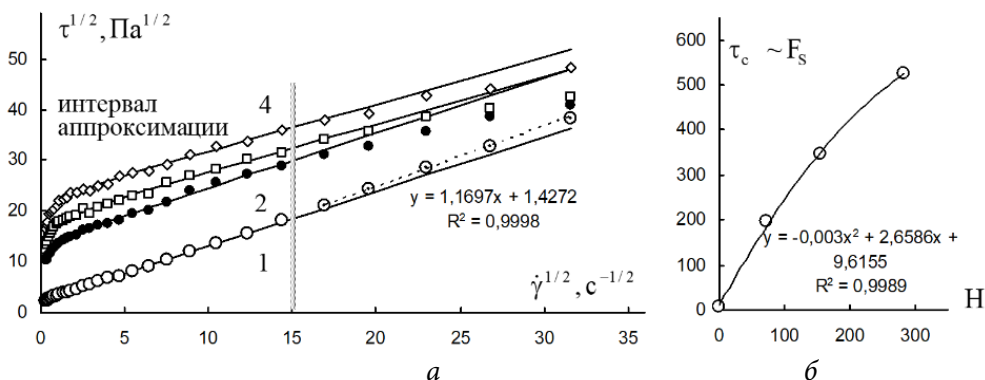


Рис. 4 / Fig. 4. Реологические характеристики магнитореологической жидкости MRF9 с массовой концентрацией магнетита 25%:

a – зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в корневых координатах в отсутствие магнитного поля (1) и при напряжённости магнитного поля 73 кА/м (2); 156 кА/м (3); 282 кА/м (4); *б* – рассчитанная зависимость коэффициента τ_c , пропорционального силе сцепления между частицами F_s , от напряжённости магнитного поля *H* / Rheological characteristics of a magnetorheological fluid MRF9 with a mass concentration of magnetite 25%:

a– dependence of the shear stress on the shear rate in root coordinates in the absence of a magnetic field (1) and at a magnetic field strength of 73 kA/m (2), 156 kA/m (3), and 282 kA/m (4); *б* – calculated dependence of the coefficient, proportional to the adhesion force between particles, on the magnetic field strength *H*

Источник: [6].

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты обобщённого уравнения течения, величина корня предельной нулевой вязкости, корень из структурной вязкости, рассчитанные для магнитореологической жидкости MRF при температуре 25° С и различной напряжённости магнитного поля /

The coefficients of the generalized flow equation, the value of the root of the limiting zero viscosity, the root of the structural viscosity, calculated for the magnetorheological fluid MRF at a temperature of 25° C and various magnetic field strengths

МР-жидкость	MRF10, C=8,5масс. %		MRF9, C=25 масс. %			
<i>H</i> , кА/м	0	156	0	73	156	282
$\tau_c^{1/2}$, Па ^{1/2}	1,51	9,54	2,42	14,05	18,58	22,94
$\eta_c^{1/2}$, (Па с) ^{1/2}	0,96	0,94	1,07	1,07	0,93	0,91
χ , с ^{-1/2}	0,36	0,11	0,072	0,145	0,148	0,125

MP-жидкость	MRF10, C=8,5масс.%		MRF9, C=25 масс. %			
	$\tau_c^{1/2} / \chi$	4,20	89,8	33,6	96,9	125,2
$\eta^{1/2}(0), (\text{Па с})^{1/2}$	5,16	90,7	34,6	98,0	126,2	185,0

Источник: по данным авторов.

Выводы

Рассмотрено реологическое поведение магнито-реологической жидкости на основе частиц магнетита в ионной жидкости в рамках структурной реологической модели. Воздействие магнитного поля приводит к увеличению уровня структурной организации, а именно, увеличению количества и размеров агрегатов магнитных частиц. Вязкость η_c , обусловленная индивидуальными, неагрегированными частицами, не зависит от величины магнитного поля. Аппроксимация уравнениями структурной реологической модели справедлива на большом интервале скоростей сдвига, начиная с низких скоростей. Коэффициент агрегации $\tau_c^{1/2}$, связанный с силой сцепления между частицами, увеличивается с увеличением напряжённости внешнего магнитного поля.

Статья поступила в редакцию 11.01.2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vékás L. Ferrofluids and Magnetorheological Fluids // *Advances in Science and Technology*. 2008. Vol. 54. P. 127–136. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.54.127.
2. Бибик Е. Е. Эффекты взаимодействия частиц при течении феррожидкости в магнитном поле // *Магнитная гидродинамика*. 1973. Т. 36. № 6. С. 25–32.
3. Шульман З. П., Кордонский В. И. Магнито-реологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
4. Suryawanshi Ravishankar, Rayappa Mahale. A study on magneto rheological fluids and their applications // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2015. Vol. 2. Iss. 4. P. 2022–2028.
5. Preparation of well-dispersed magnetorheological fluids and effect of dispersion on their magnetorheological properties / Lopez-Lopez M. T., Kuzhir P., Bossis G., Mingalyov P. // *Rheologica Acta*. 2008. Vol. 47. P. 787–796. DOI: 10.1007/s00397-008-0271-6.
6. Aspects Concerning the Fabrication of Magnetorheological Fluids Containing High Magnetization FeCo Nanoparticles / Gutiérrez J., Vadillo V., Gómez A., Berasategi J., Insausti M., Gil de Muro I., Bou-Ali M. M. // *Fluids*. 2021. Vol. 6. Iss. 3. P. 132–143. DOI: 10.3390/fluids6030132.
7. Magneto Mechanical Properties of Iron Based MR Fluids / Premalatha S. E., Chokkalingam R., Mahendran M., Rich J. P., Patrick S., Doyle P. S., McKinley G. H. // *American Journal of Polymer Science*. 2012. Vol. 2. Iss. 4. P. 50–55. DOI: 10.5923/j.ajps.20120204.01.
8. Magnetorheology in an aging, yield stress matrix fluid / Rich J. P., Doyle P. S., McKinley G. H. // *Rheologica Acta*. 2012. Vol. 51. Iss. 7. P. 579–593. DOI: 10.1007/s00397-012-0632-z.
9. An experimental evaluation of pre-yield and post-yield rheological models of magnetic field dependent smart materials / Mohammadi N., Mahjoob M. J., Kaffashi B., Malakooti S. //

Journal of Mechanical Science and Technology. 2010. Vol. 24. Iss. 9. P. 1829–1837.
DOI: 10.1007/s12206-010-0607-x.

10. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход; монография М.: Техносфера, 2016. 384 с.

REFERENCES

1. Vékás L. Ferrofluids and Magnetorheological Fluids. In: *Advances in Science and Technology*, 2008, vol. 54, pp. 127–136. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.54.127.
2. Bibik E. E. [Effects of particle interaction during ferrofluid flow in a magnetic field]. In: *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetic hydrodynamics], 1973, vol. 36, no. 6, pp. 25–32.
3. Shul'man Z. P., Kordonskii V. I. *Magnito-reologicheskii effekt* [Magneto-rheological effect]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 184 p.
4. Suryawanshi Ravishankar, Rayappa Mahale. A study on magneto rheological fluids and their applications. In: *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2015, vol. 2, iss. 4, pp. 2022–2028.
5. Lopez-Lopez M. T., Kuzhir P., Bossis G., Mingalyov P. Preparation of well-dispersed magnetorheological fluids and effect of dispersion on their magnetorheological properties. In: *Rheologica Acta*, 2008, vol. 47, pp. 787–796. DOI: 10.1007/s00397-008-0271-6.
6. Gutiérrez J., Vadillo V., Gómez A., Berasategi J., Insausti M., Gil de Muro I., Bou-Ali M. M. Aspects Concerning the Fabrication of Magnetorheological Fluids Containing High Magnetization FeCo Nanoparticles. In: *Fluids*, 2021, vol. 6, iss. 3, pp. 132–143. DOI: 10.3390/fluids6030132.
7. Premalatha S. E., Chokkalingam R., M. Mahendran M., Rich J. P., Patrick S., Doyle P. S., McKinley G. H. Magneto Mechanical Properties of Iron Based MR Fluids. In: *American Journal of Polymer Science*, 2012, vol. 2, iss. 4, pp. 50–55. DOI: 10.5923/j.ajps.20120204.01.
8. Rich J. P., Doyle P. S., McKinley G. H. Magnetorheology in an aging, yield stress matrix fluid. In: *Rheologica Acta*, 2012, vol. 51, iss. 7, pp. 579–593. DOI: 10.1007/s00397-012-0632-z.
9. Mohammadi N., Mahjoob M. J., Kaffashi B., Malakooti S. An experimental evaluation of pre-yield and post-yield rheological models of magnetic field dependent smart materials. In: *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, vol. 24, iss. 9, pp. 1829–1837. DOI: 10.1007/s12206-010-0607-x.
10. Kirsanov E. A., Matveenko V. N. *Nen'yutonovskoe techenie dispersnykh, polimernykh i zhidkokristallicheskikh system. Strukturnyi podhod* [Non-Newtonian flow of dispersed, polymer and liquid crystal systems. Structural approach]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016. 384 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

Кривошапова Ольга Владимировна – старший преподаватель кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;
e-mail: o.krivoshchapova.moscow@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail P. Vekovichchev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;
e-mail: mpv.71@mail.ru;

Evgeny A. Kirsanov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;
e-mail: Kirsanov47@mail.ru;

Olga V. Krivoshchapova – Senior lecturer, Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;
e-mail: o.krivoshchapova.moscow@mail.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А., Кривошапова О. В. Неньютоновское течение магнито-реологической жидкости // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 1. С. 16–25.
DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-16-25.

FOR CITATION

Vekovichchev M. P., Kirsanov E. A., Krivoshchapova O. V. A non-Newtonian flow of a magnetorheological fluid. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 1, pp. 16–25.
DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-16-25.