

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-130-146>



Динамика магнитных жидкостей и бидисперсных магнитных систем при колебательных сдвигах

Е. В. Шельдешова¹ ✉, П. А. Ряполов¹, А. Г. Рекс², А. В. Трепачев¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости 65, г. Минск 220013, Беларусь

✉ e-mail: blackberry__@mail.ru

Резюме

Цель. Изучить динамику магнитной жидкости и бидисперсных магнитных систем при колебательных сдвигах.

Методы. Эксперимент был проведен на установках, созданных на общеизвестных методах и оборудовании для магнитных измерений и изготовленных самостоятельно. Разработан оригинальный метод измерения вязкоупругих параметров магнитожидкостных систем. В данной работе исследовалась магнитная жидкость, где в качестве основы использовался магнетит Fe_3O_4 , в качестве стабилизатора – олеиновая кислота, жидкость-носитель – керосин. Для получения бидисперсной системы в образец МЖ-1 были добавлены частицы магнетита (размер частиц 300 нм) 1%, 5% и 10% по массе твердой фазы и получены жидкости МЖ-2 – МЖ-4 соответственно. Жидкости готовили путем механического и ультразвукового смешивания частиц магнетита с магнитной жидкостью. Еще одной важной характеристикой данных систем является зависимость вязкости от температуры. Для ее получения была существенно модернизирована установка. Вокруг измерительной ячейки был изготовлен герметичный жидкостный контур, подключенный системой силиконовых гибких трубок к термостату.

Результаты. Рассмотрены образцы с различными физическими параметрами, исследован магнитовязкий эффект. Микроструктура образца и присутствие крупных магнитных частиц влияют на динамику магнитных жидкостей, подверженных колебательным сдвигам и магнитовязким воздействиям.

Заключение. Исследована динамика магнитной жидкости и бидисперсных магнитных систем при колебательных сдвигах в сильном магнитном поле. Получена зависимость коэффициента затухания магнитной жидкости от температуры. Результаты могут найти применение в разработке экспресс-испытаний образцов магнитных жидкостей и в создании датчиков ускорения и вибрации. Результаты данного исследования также могут быть использованы для изучения агломерации наночастиц.

Ключевые слова: магнитные жидкости; бидисперсные магнитные системы; интеллектуальные материалы; магнитное поле; колебательный сдвиг; магнитовязкий эффект.

Финансирование: Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030" (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213) и в рамках реализации государственного задания (№ 0851-2020-0035).

Благодарности: Авторы выражают благодарность сотрудникам Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ: доктору физико-математических наук, профессору Кузьменко Александру Павловичу и Новикову Евгению за помощь в получении АСМ-изображений, а также ценные комментарии при обсуждении результатов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Динамика магнитных жидкостей и бидисперсных магнитных систем при колебательных сдвигах / Е. В. Шельдешова, П. А. Ряполов, А. Г. Рекс, А. В. Трепачев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 130–146. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-130-146>

Поступила в редакцию 01.08.2022

Подписана в печать 28.08.2022

Опубликована 28.09.2022

Dynamics of Magnetic Fluids and Bidisperse Magnetic Systems under Oscillatory Shifts

Elena V. Shel'deshova¹ ✉, Petr A. Ryapolov¹, Alexander G. Reks²,
Alexey V. Trepachev¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosti Ave., Minsk 220013, Belarus

✉ e-mail: blackberry__@mail.ru

Abstract

Purpose. To study the dynamics of magnetic fluid and bidisperse magnetic systems under oscillatory shifts.

Methods. The experiment was carried out on installations created on the basis of well-known methods and equipment for magnetic measurements and were made independently. An original method for measuring the viscoelastic parameters of magnetic fluid systems has been developed. In this work, a magnetic fluid was studied, where magnetite Fe_3O_4 was used as a base, oleic acid was used as a stabilizer, and kerosene was used as a carrier liquid. To obtain a bidisperse system, magnetite particles (particle size 300 nm) 1%, 5%, and 10% by weight of the solid phase were added to the MF-1 sample, and MF-2 - MF-4 liquids were obtained, respectively. Liquids were prepared by mechanical and ultrasonic mixing of magnetite particles with a ferrofluid. Another important characteristic of these systems is the dependence of viscosity on temperature. To obtain it, the installation was significantly modernized. A sealed liquid circuit was made around the measuring cell, connected by a system of silicone flexible tubes to a thermostat.

Results. Samples with different physical parameters are considered, and the magnetoviscous effect is studied. The microstructure of the sample and the presence of large magnetic particles affect the dynamics of magnetic fluids subjected to oscillatory shear and magnetoviscous effects.

Conclusion. The dynamics of a magnetic fluid and bidisperse magnetic systems under oscillatory shifts in a strong magnetic field has been studied. The temperature dependence of the damping coefficient of the magnetic fluid is obtained. The results can be used in the development of express tests of ferrofluid samples and in the creation of acceleration and vibration sensors. The results of this study can also be used to study the agglomeration of nanoparticles.

Keywords: magnetic fluids; bidisperse magnetic systems; smart materials; magnetic field; oscillatory shift; magnetoviscous effect.

Funding: The publication was carried out the part of the implementation of the program of strategic academic leadership "Priority-2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213).

Acknowledgment: The authors express their gratitude to the staff of the Regional Center for Nanotechnology of South Ural State University: Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Kuzmenko Alexander Pavlovich and Evgeny Novikov for their help in obtaining AFM images, as well as valuable comments when discussing the results.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Shel'deshova E. V., Ryapolov P. A., Reks A. G., Trepachev A. V. Dynamics of Magnetic Fluids and Bidisperse Magnetic Systems under Oscillatory Shifts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022; 12(3): 130–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-130-146>

Received 01.08.2022

Accepted 28.08.2022

Published 28.09.2022

Введение

Магнитные жидкости (МЖ) [1–3] стали популярны из-за особенного сочетания свойств и способности изменять свои физические параметры, такие как вязкость, скорость звука, светопропускаемость, под воздействием внешнего магнитного поля [4–9].

В конкретных условиях в МЖ происходит взаимодействие между магнитными наночастицами, образование и распад агрегатов и изменение их физических свойств [10–13]. Изучение этих процессов в МЖ затруднено, поскольку традиционные методы электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии проводятся в статических условиях, в то время как процесс агрегации зависит и от динамики магнитной жидкости, и от конфигурации магнитного поля [14–18].

Экспериментальное и теоретическое изучение вязкости магнитной жидкости в магнитном поле будет полезно для решения вышеуказанных проблем. В сдвиговых потоках твердые частицы подвергаются сильному воздействию силы, которая заставляет их вращаться. Магнитные поля направляют магнитный

момент частиц, осложняя свободное вращение частиц, когда есть связь между моментом частицы и частицей [19]. Это вызывает локальный градиент скорости жидкости-основы рядом с частицами, что усиливает эффективную вязкость МЖ.

Необходимость практики побуждает внимание к изучению магнитных, реологических и упругих свойств намагничиваемых жидких сред для разработки нового оборудования и устройств. Одним из таких важных и неизученных проблем является «магнитовязкий» эффект МЖ, совершающей колебания в магнитном поле [19–21].

В сильном магнитном поле, перпендикулярном к оси открытой с обеих сторон трубки, столбик МЖ принимает форму, близкую к цилиндрической. При осевых колебаниях столбика жидкости гидродинамические потоки сосредоточены в узкой пристеночной области, в то время как течение остальной жидкости подобно движению твердого тела носит поршневой характер.

Приобретение данных о «пристеночной вязкости» магнитной жидкости, полученных по новым методикам, варьирующим носитель, концентрацию и

размер магнитных наночастиц, было бы важно не только для решения технических задач, но и в связи с изучением механизмов перестройки структуры магнитных коллоидов.

Считается, что "магнитовязкий" эффект в тонком пристеночном слое, осциллирующем в магнитном поле, очень чувствителен к межчастичной агрегации, что еще больше расширяет диагностический потенциал этого процесса [22–24].

Одним из популярных направлений увеличения магнитовязкого эффекта является добавление в магнитную жидкость крупных магнитных частиц [21; 25–32]. Такие системы получили название бидисперсных, они обладают коллоидной стабильностью, но при этом их вязкость и теплопроводность изменяются под влиянием внешнего магнитного поля [20; 33–34]. Такие системы используются в демпферах [35], в акустических системах [36], уплотнениях [37]. Большинство работ, в которых исследуется магнитовязкий эффект в подобных системах, посвящено ротационной или капиллярной вискозиметрии [20; 21]. Однако в большинстве вариантов применения магнитожидкостных устройств, часть из которых приведена выше, активный элемент совершает колебания. Нами разработан оригинальный метод измерения вязкоупругих параметров магнитожидкостных систем [38–40] и целью данной работы является его усовершенствование и апробация на бидисперсных магнитожидкостных системах.

Материалы и методы

В данной работе мы использовали установку, показанную на рисунке 1.

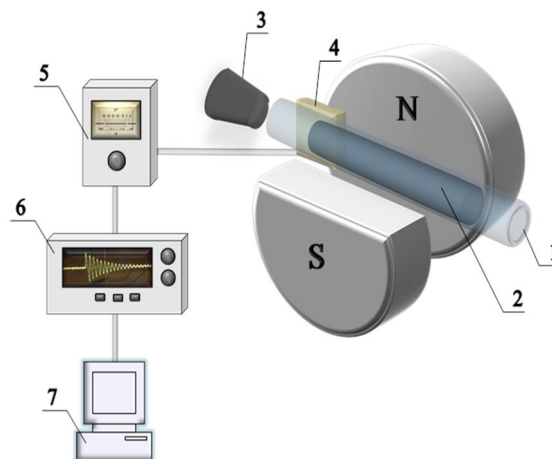


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental setup

В процессе нашего эксперимента применялся электромагнит ФЛ-1. Между полюсами размещена трубка из оргстекла 1. Трубка наполняется магнитной жидкостью 2 при напряженности поля 100 кА/м, чтобы магнитная жидкость удерживалась магнитным полем и левитировала в нем. Возбуждение колебаний осуществляется поршнем 3. Катушка индуктивности 4 стоит между трубкой и полюсами ФЛ-1. Сигнал с катушки индуктивности сначала усиливается при помощи усилителя 5 Selective Nanovoltmeter type 237, а затем поступает на осциллограф 6 GwInstek GOS-72074. Полученные осциллограммы переносятся на компьютер 7 и обрабатываются с помощью программного обеспечения NI LabView. В программе рассчитываются частота и коэффициент затухания.

В работе исследовалась магнитная жидкость, где в качестве основы использовался магнетит Fe_3O_4 , в качестве стабилизатора – олеиновая кислота, жидкость-носитель – керосин. Образец МЖ-1 получен из Ивановского государственного энергетического университета.

Для исследования зависимости вязкости от концентрации был поставлен следующий эксперимент: образец МЖ-1 объемом 10 мл разбавляли постепенно небольшим количеством керосина и измеряли ее вязкость на вискозиметре Brookfield DV2T. Полученная зависимость представлена на рисунке 2.

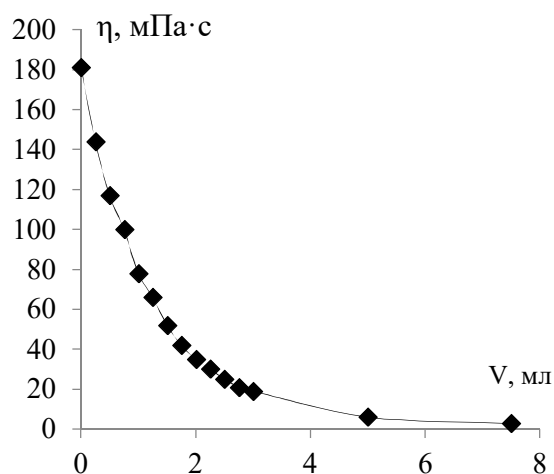


Рис. 2. Зависимость вязкости МЖ-1 от разбавления керосином

Fig. 2. The dependence of the viscosity of MF-1 on dilution with kerosene

Из представленного на рисунке 2 графика видно, что даже небольшое разбавление исходного образца вызывает значительное уменьшение его вязкости.

Сама зависимость носит экспоненциальный характер. Данный ход графика можно объяснить наличием избыточного количества поверхностно-активных веществ (ПАВ), которое сильно влияет на вязкость магнитной жидкости. Избыток ПАВ характерен для коммерческих магнитных жидкостей, к которым относится образец МЖ-1. К подобным выводам также приходят авторы в статьях [21; 25; 29], в которых исследуются как коммерческие магнитные жидкости, так и бидисперсные системы с добавлением частиц магнетита различного размера. В данных работах авторы добавляют крупные частицы без введения дополнительного ПАВ, данная методика была использована в нашей работе.

Для получения бидисперсной системы в образец МЖ-1 были добавлены частицы магнетита (размер частиц 300 нм) 1%, 5% и 10% по массе твердой фазы и получены жидкости МЖ-2 – МЖ-4 соответственно. Жидкости готовили путем механического и ультразвукового смешивания частиц магнетита с магнитной жидкостью.

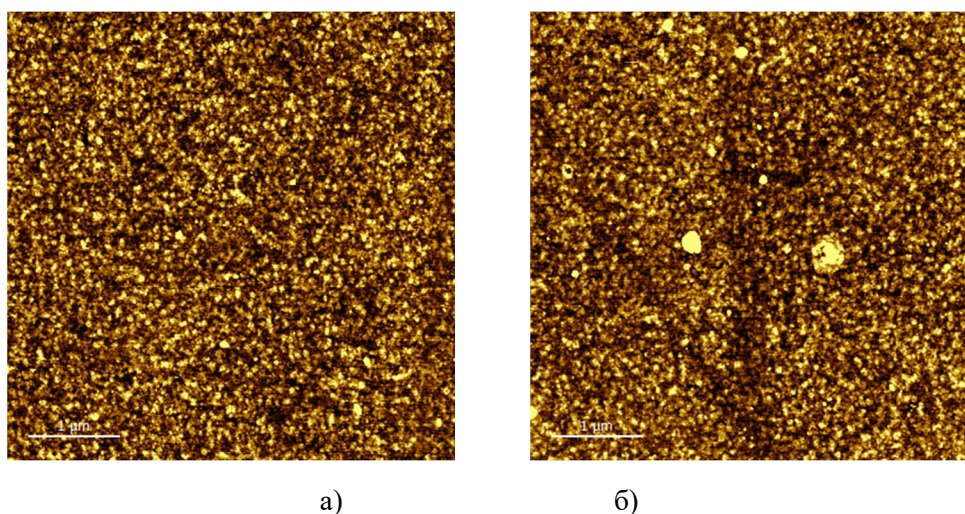
Последующий анализ показал отсутствие расслоения и образования осадка в образцах МЖ2 – МЖ4. Бидисперсные системы получились стабильные. В таблице 1 указаны физические параметры образцов. Вязкость сдвига η измерена на вискозиметре Brookfield DV2T.

Таблица 1. Физические параметры образцов МЖ**Table 1.** Physical parameters of MF samples

Образец	Плотность МЖ ρ , кг/м ³ / MF density ρ , kg/m ³	Концентрация объемная ϕ , % / Volume concentra- tion ϕ , %	Намагниченность насыщения M_s , кА/м / Saturation magneti- zation M_s , kA/m	Вязкость МЖ, мПа·с / MF viscosity, mPa·s
МЖ-1 / MF-1	1080	7,04	23,6	6,3
МЖ-2 / MF-2	1087	7,22	24,4	5,7
МЖ-3 / MF-3	1089	7,25	27,4	5,95
МЖ-4 / MF-5	1091	7,29	31,2	5,5

На рисунке 3 отображены АСМ-изображения для МЖ-1 и МЖ-4. Видно, что на рисунке 3, а частицы стандартного размера порядка 20 нм. На рисунке 3, б представлено изображение, на котором видны крупные вкрапления частиц размером 200 и 300 нм. Из представленных изображений видно, что вокруг крупных частиц имеются вкрапле-

ния мелких наночастиц, которые вместе с избыточным ПАВ образуют слой, который препятствует агломерации МЖ. Подобные структуры были впервые показаны в работах М. Лопес-Лопеса [25–27], а Р. Розенцвайг в своей последней работе [28] дал им определение "particle clouds", или "облака частиц".

**Рис. 3.** АСМ-изображения: а – МЖ-1; б – МЖ-4**Fig. 3.** AFM images: а – MF-1; б – MF-4

Результаты и их обсуждение

В работе [39] предложено выражение для определения вязкости магнитной жидкости в пристеночном слое при колебательных сдвигах в магнитном поле:

$$\eta_H = \frac{1}{v^3} \left[\frac{\mu_0 d \cdot M_x}{4b\pi\sqrt{\pi\rho}} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} \right)_{z=b/2} - \frac{\sqrt{\pi\rho} \cdot d \cdot v^2}{2} \right]^2, \quad (1)$$

где в скобках уменьшаемое – магнитная составляющая системы, вычитаемое – упругая составляющая системы. Запишем уравнение (1) следующим образом:

$$\eta_H = 1/v^3 [B - C]^2, \quad (2)$$

$$\text{где } B = \frac{\mu_0 d \cdot M_x}{4b\pi\sqrt{\pi\rho}} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} \right)_{z=b/2},$$

$$\text{а } C = \frac{\sqrt{\pi\rho} \cdot d \cdot v^2}{2}.$$

Зависимость параметров B и C от напряженности магнитного поля находили, используя данные по градиенту внешнего магнитного поля, частоты колебаний и геометрических размеров магнитной жидкости. Поскольку различия в этих параметрах сильно ограничивают ошибку в вычислении вязкости, мы будем применять линейное приближение [39] для определения зависимости вязкости от магнитного поля.

Зависимость вязкости образцов МЖ-1 – МЖ-4 по предложенному методу представлена на рисунке 4. Погрешность измерения вязкости по предложенному методу составляет 10%.

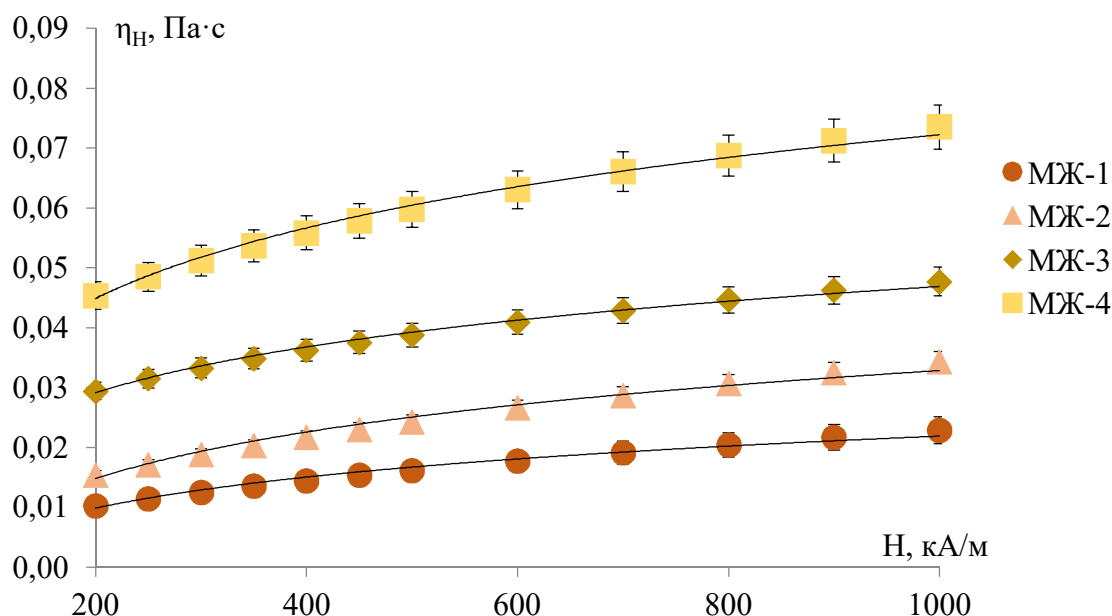


Рис. 4. Зависимость вязкости от напряженности магнитного поля для образцов МЖ-1 – МЖ-4

Fig. 4. Dependence of viscosity on magnetic field strength for samples MF-1 – MF-4

Полученные зависимости вязкости для МЖ-1 – МЖ-4 показывают увеличение значения вязкости в зависимости от количества частиц железа, содержащихся в магнитной жидкости. Чем больше содержание массовой доли крупных частиц магнетита, тем выше вязкость в пристеночном слое.

По мере увеличения концентрации магнитных наночастиц в магнитной жидкости связи между частицами становятся сильнее, и пристеночная вязкость увеличивается.

Еще одной важной характеристикой данных систем является зависимость вязкости от температуры. Для ее получения была существенно модернизирована установка, схема которой представлена на рисунке 5. Вокруг измерительной ячейки был изготовлен герметичный жидкостный контур, подключенный системой силиконовых гибких трубок к термостату КРИО-ВТ-12-1 – 8 (рис. 5).

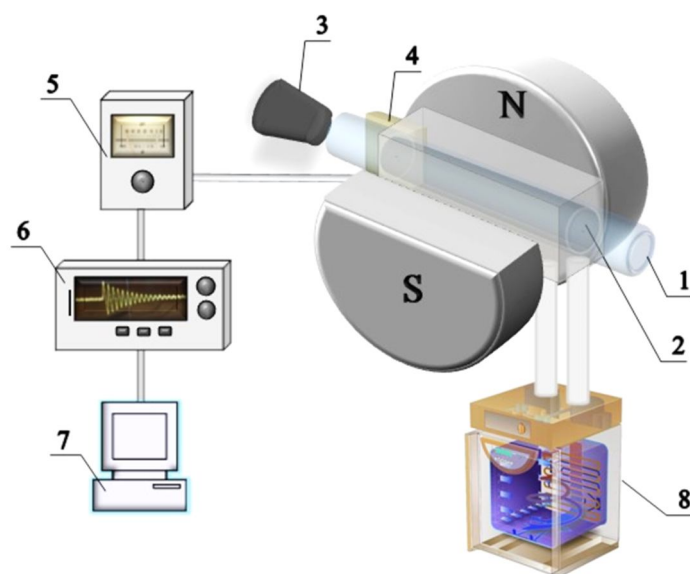


Рис. 5. Схема экспериментальной установки с термостатом

Fig. 5. Scheme of the experimental setup with a thermostat

В процессе эксперимента в измерительной ячейке устанавливалась необходимая температура, которая выдерживалась 10–20 минут для стабилизации системы, и затем измерялись частота и коэффициент затухания путем изменения напряженности магнитного поля.

На рисунке 6 представлена зависимость коэффициента затухания от напряженности магнитного поля для

МЖ-1. На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента затухания от температуры для МЖ-1. Как видно, коэффициент затухания зависит как от напряженности магнитного поля, так и от температуры. В дальнейшем мы собираемся использовать эти данные и выйти на теоретическую оценку вязкости магнитной жидкости.

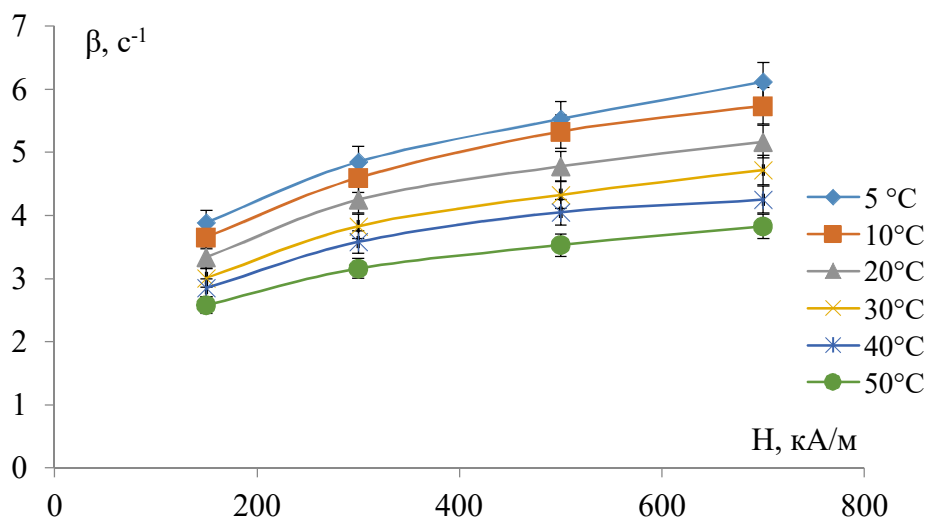


Рис. 6. Зависимость коэффициента затухания от напряженности магнитного поля для МЖ-1

Fig. 6. Dependence of the attenuation coefficient on the severity of the magnetic field for MF-1

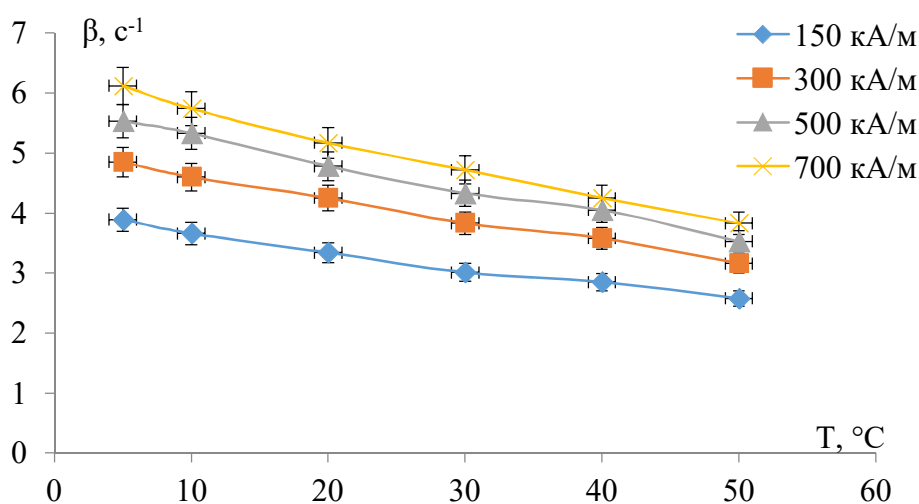


Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания от температуры для МЖ-1

Fig. 7. Temperature dependence of damping coefficient for MF-1

Закключение

Рассмотрены образцы с различными физическими параметрами, исследован магнитовязкий эффект. Микроструктура образца и присутствие крупных магнитных частиц влияют на динамику магнитных жидкостей, подверженных колебательным сдвигам и магнитовязким воздействиям.

Результаты могут найти применение в разработке экспресс-испытаний образцов магнитных жидкостей и в создании датчиков ускорения и вибрации. Результаты данного исследования также могут быть использованы для изучения агломерации наночастиц.

Список литературы

1. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. М.: Мир, 1993. 272 с.
2. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge, ets.: Cambridge University Press, 1985. 344 p.
3. Ferrofluids and bio-ferrofluids: looking back and stepping forward / V. Socoliuc, M. V. Avdeev, V. Kuncser, R. Turcu, E. Tombácz, L. Vekas // *Nanoscale*. 2022. Vol. 14, no. 13. P. 4786–4886.
4. On the theory of magnetoviscous effect in magnetorheological suspensions / A. Zubarev, L. Iskakova, M. Lopez-Lopez, P. Kuzhir, G. Bossis // *Journal of rheology*. 2014. Vol. 58, no. 6. P. 1673–1692.
5. Исследование размагничивающего поля, индуцированного звуковой волной / В. М. Полуниин, А. О. Танцюра, А. М. Стороженко, П. А. Ряполов // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59, № 6. С. 709.
6. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Dynamics of magnetophoresis in dilute magnetic fluids // *Magnetohydrodynamics*. 2010. Vol. 46, no. 2. P. 125–136.
7. Ерин К. В., Диканский Ю. И. Применение эффекта электрического двойного лучепреломления для исследования процессов релаксации заряда в коллоидных растворах магнетита // *Письма в Журнал технической физики*. 2009. Т. 35, № 10. С. 58–65.
8. Хохрякова К. А., Колесниченко Е. В. Волны на свободной поверхности магнитной жидкости на жидкой подложке, возбуждаемые вертикальным переменным магнитным полем // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 12, № 2. С. 96–110.
9. Косков М. А. Конвекция феррожидкости в замкнутом контуре: анализ температурного поля // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 12, № 2. С. 166–182.
10. Yerin C. V. Particles size distribution in diluted magnetic fluids // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 431. P. 27–29.
11. Ерин К. В. Магнитооптические исследования агрегатов наночастиц в коллоидных растворах магнетита // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 106, № 6. С. 945–949.
12. Pshenichnikov A. F., Ivanov A. S. Magnetophoresis of particles and aggregates in concentrated magnetic fluids // *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2012. Vol. 86, no. 5. P. 051401.
13. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Vortex flows induced by drop-like aggregate drift in magnetic fluids // *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26, no. 1. P. 012002.

14. Nanoparticle sizing: a comparative study using atomic force microscopy, transmission electron microscopy, and ferromagnetic resonance / L. M. Lacava, B. M. Lacava, R. B. Azevedo, Z. G. M. Lacava, N. Buske, A. L. Tronconi, P. C. Morais // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001. Vol. 225, no. 1-2. P. 79–83.
15. Atomic force microscopy and magnetization investigation of a water-based magnetic fluid / P. C. Morais, B. M. Lacava, A. F. Bakuzis, L. M. Lacava, L. P. Silva, R. B. Azevedo, Z. G. M. Lacava, N. Buske, W. C. Nunes, M. A. Novak // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2001. Vol. 226. P. 1899–1900.
16. Raşa M., Kuipers B. W. M., Philipse A. P. Atomic force microscopy and magnetic force microscopy study of model colloids // *Journal of colloid and interface science*. 2002. Vol. 250, no. 2. P. 303–315.
17. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy / K. Butter, P. H. H. Bomans, P. M. Frederik, G. J. Vroege, A. P. Philipse // *Nature materials*. 2003. Vol. 2, no. 2. P. 88–91.
18. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy / K. Butter, P. H. H. Bomans, P. M. Frederik, G. J. Vroege, A. P. Philipse // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003. Vol. 15, no. 15. P. S1451.
19. Odenbach S. Magnetic fluids-suspensions of magnetic dipoles and their magnetic control // *Journal of physics: condensed matter*. 2003. Vol. 15, no. 15. P. S1497.
20. Rotational viscosity in ferrofluids / O. Ambacher, S. Odenbach, K. Stierstadt // *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. 1992. Vol. 86, no. 1. P. 29–32.
21. Magnetoviscous effect in ferrofluids diluted with sheep blood / J. Nowak, D. Borin, S. Haefner, A. Richter, S. Odenbach // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 442. P. 383–390.
22. Динамика магнитных жидкостей, подвергающихся колебательному сдвигу / Е. В. Шельдешова, А. А. Чураев, И. А. Шабанова, П. А. Ряполов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 4. С. 137–148.
23. On the dissipation processes in the oscillating system with a magneto-liquid element / G. V. Karpova, A. N. Kutuev, P. A. Ryapolov, V. M. Polunin, E. K. Zubarev, V. V. Kovarda // *Magnetohydrodynamics*. 2009. Vol. 45, no. 1. P. 85–93.
24. Свободные колебания магнитной жидкости в сильном магнитном поле / В. М. Полуниин, П. А. Ряполов, В. Б. Платонов, А. Е. Кузько // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62, № 3. С. 302.
25. Preparation of stable magnetorheological fluids based on extremely bimodal iron–magnetite suspensions / M. T. López-López, J. De Vicente, G. Bossis, F. González-Caballero, J. D. G. Durán // *Journal of materials research*. 2005. Vol. 20, № 4. P. 874–881.

26. Dynamic characterization of extremely bidisperse magnetorheological fluids / G. R. Iglesias, M. T. López-López, J. D. G. Duran, F. González-Caballero, A. V. Delgado // *Journal of colloid and interface science*. 2012. Vol. 377, no. 1. P. 153–159.
27. Preparation and sedimentation behavior in magnetic fields of magnetite-covered clay particles / C. Galindo-Gonzalez, J. De Vicente, M. M. Ramos-Tejada, M. T. Lopez-Lopez, F. Gonzalez-Caballero, J. D. G. Duran // *Langmuir*. 2005. Vol. 21, no. 10. P. 4410–4419.
28. Rosensweig R. E. Magnetorheological particle clouds // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 479. P. 301–306.
29. From high colloidal stability ferrofluids to magnetorheological fluids: tuning the flow behavior by magnetite nanoclusters / D. Susan-Resiga, V. Socoliuc, A. Bunge, R. Turcu, L. Vékás // *Smart Materials and Structures*. 2019. Vol. 28, no. 11. P. 115014.
30. Rheological investigations on the theoretical predicted “Poisoning” effect in bidisperse ferrofluids / E. Siebert, V. Dupuis, S. Neveu, S. Odenbach // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015. Vol. 374. P. 44–49.
31. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids / M. T. López-López, P. Kuzhir, S. Lacis, G. Bossis, F. González-Caballero, J. D. Durán // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2006. Vol. 18, no. 38. P. S2803.
32. McTague J. P. Magnetoviscosity of magnetic colloids // *The Journal of Chemical Physics*. 1969. Vol. 51, no. 1. P. 133–136.
33. Krichler M., Odenbach S. Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 326. P. 85–90.
34. Thermal conductivity measurements on ferrofluids / J. Popplewell, A. Al-Qenaie, S. W. Charles, R. Moskowitz, K. Raj // *Colloid and Polymer Science*. 1982. Vol. 260, no. 3. P. 333–338.
35. Raj K., Moskowitz B., Casciari R. Advances in ferrofluid technology // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 1995. Vol. 149, no. 1-2. P. 174–180.
36. Bottenberg W., Melillo L., Raj K. The dependence of loudspeaker design parameters on the properties of magnetic fluids // *Journal of the Audio Engineering Society*. 1980. Vol. 28, no. 1/2. P. 17–25.
37. Scherer C., Figueiredo Neto A. M. Ferrofluids: properties and applications // *Brazilian journal of physics*. 2005. Vol. 35. P. 718–727.
38. Динамическая упругость столбика магнитной жидкости в сильном магнитном поле / В. М. Полуниин, П. А. Ряполов, Е. В. Шельдешова, А. Е. Кузько, И. М. Арефьев // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2017. Т. 60, № 3. С. 3–10.

39. Ryapolov P. A., Polunin V. M., Shel'deshova E. V. An alternative way to study magnetic fluid magnetization and viscosity // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 496. P. 165924.

40. Вязкость магнитной жидкости при колебаниях в сильном магнитном поле / В. М. Полунин, П. А. Ряполов, А. И. Жакин, Е. В. Шельдешова // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65, № 4. С. 477–483.

References

1. Taketomi S., Chikazumi S. *Magnitnye zhidkosti [Magnetic fluids]*. Moscow, Mir Publ., 1993. 272 p.

2. Rosensweig, R. E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge, ets.: Cambridge University Press, 1985. 348 p.

3. Socoliuc V., Avdeev M. V., Kuncser V., Turcu R., Tombácz E., Vekas L. Ferrofluids and bio-ferrofluids: looking back and stepping forward. *Nanoscale*, 2022, vol. 14, no. 13, pp. 4786–4886.

4. Zubarev A., Iskakova L., Lopez-Lopez M., Kuzhir P., Bossis G. On the theory of magnetoviscous effect in magnetorheological suspensions. *Journal of rheology*, 2014, vol. 58. no. 6, pp. 1673–1692.

5. Polunin V. M., Tantsyura A. O., Storozhenko A. M., Ryapolov P. A. Issledovanie razmagnichivayushchego polya, indutsirovannogo zvukovoi volnoi [Study of demagnetizing field induced by a sound]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustical Physics*, 2013, vol. 59, no. 6, pp. 662–666.

6. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Dynamics of magnetophoresis in dilute magnetic fluids. *Magnetohydrodynamics*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 125–136.

7. Erin K. V., Dikansky Yu. I. Primenenie effekta elektricheskogo dvojnogo lucheprelomleniya dlya issledovaniya protsessov relaksatsii zaryada v kolloidnykh rastvorakh magnetita [Application of the effect of electric birefringence to study the processes of charge relaxation in colloidal solutions of magnetite]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Letters to the Journal of Technical Physics*, 2009, vol. 35, no. 10, pp. P. 58–65.

8. Khokhryakova K. A., Kolesnichenko E. V. Volny na svobodnoi poverkhnosti magnitnoi zhidkosti na zhidkoi podlozhke, vzbuzhdaemye vertikal'nym peremennym magnitnym polem [Waves on the free surface of a magnetic fluid on a liquid substrate, excited by a vertical variable magnetic field]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 96–110.

9. Koskov M. A. Konvektsiya ferrozhidkosti v zamknutom konture: analiz temperaturnogo polya [Convection of a ferrofluid in a closed circuit: analysis of the temperature field]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 166–182.
10. Yerin C. V. Particles size distribution in diluted magnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 431, pp. 27–29.
11. Erin K. V. Magnitoopticheskie issledovaniya agregatov nanochastits v kolloidnykh rastvorakh magnetita [Magneto-optical studies of nanoparticle aggregates in colloidal solutions of magnetite]. *Optika i spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*, 2009, vol. 106, no. 6, pp. 945–949.
12. Pshenichnikov A. F., Ivanov A. S. Magnetophoresis of particles and aggregates in concentrated magnetic fluids. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2012, vol. 86, no. 5, pp. 051401.
13. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Vortex flows induced by droplike aggregate drift in magnetic fluids. *Physics of Fluids*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 012002.
14. Lacava L. M., Lacava B. M., Azevedo R. B., Lacava Z. G. M., Buske N., Tronconi A. L., Morais P. C. Nanoparticle sizing: a comparative study using atomic force microscopy, transmission electron microscopy, and ferromagnetic resonance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 225, no. 1-2, pp. 79–83.
15. Morais P. C., Lacava B. M., Bakuzis A. F., Lacava L. M., Silva L. P., Azevedo R. B., Lacava Z. G. M., Buske N., Nunes W. C., Novak M. A. Atomic force microscopy and magnetization investigation of a water-based magnetic fluid. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2001, vol. 226, pp. 1899–1900.
16. Raşa M., Kuipers B. W. M., Philipse A. P. Atomic force microscopy and magnetic force microscopy study of model colloids. *Journal of colloid and interface science*, 2002, vol. 250, no. 2, pp. 303–315.
17. Butter K., Bomans P. H. H., Frederik P. M., Vroege G. J., Philipse A. P. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy. *Nature materials*, 2003, vol. 2, no. 2, pp. 88–91.
18. Butter K., Bomans P. H. H., Frederik P. M., Vroege G. J., Philipse A. P. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2003, vol. 15, no. 15, pp. S1451.
19. Odenbach S. Magnetic fluids-suspensions of magnetic dipoles and their magnetic control. *Journal of physics: condensed matter*, 2003, vol. 15, no. 15, pp. S1497.
20. Ambacher O., Odenbach S., Stierstadt K. Rotational viscosity in ferrofluids. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 1992, vol. 86, no. 1, no. 29–32.

21. Nowak J., Borin D., Haefner S., Richter A., Odenbach S. Magnetoviscous effect in ferrofluids diluted with sheep blood. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 442, pp. 383–390.
22. Sheldeshova E. V., Churaev A. A., Shabanova I. A., Ryapolov P. A. Dinamika magnitnykh zhidkostei, podvergayushchikhsya kolebatel'nomu sdvigu [Dynamics of magnetic fluids subjected to oscillatory shear]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 137–148.
23. Karpova G. V., Kutuev A. N., Ryapolov P. A., Polunin V. M., Zubarev E. K., Kovarda V. V. On the dissipation processes in the oscillating system with a magneto-liquid element. *Magnetohydrodynamics*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 85–93.
24. Polunin V. M., Ryapolov P. A., Platonov V. B., Kuz'ko A. E. Svobodnye kolebaniya magnitnoi zhidkosti v sil'nom magnitnom pole [Free oscillations of magnetic fluid in strong magnetic field]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 313–318.
25. López-López M. T., De Vicente J., Bossis G., González-Caballero F., Durán J. D. G. Preparation of stable magnetorheological fluids based on extremely bimodal iron–magnetite suspensions. *Journal of materials research*, 2005, vol. 20, no. 4, pp. 874–881.
26. Iglesias G. R., López-López M. T., Duran J. D. G., González-Caballero F., Delgado A. V. Dynamic characterization of extremely bidisperse magnetorheological fluids. *Journal of colloid and interface science*, 2012, vol. 377, no. 1, pp. 153–159.
27. Galindo-Gonzalez C., De Vicente J., Ramos-Tejada M. M., Lopez-Lopez M. T., Gonzalez-Caballero F., Duran J. D. G. Preparation and sedimentation behavior in magnetic fields of magnetite-covered clay particles. *Langmuir*, 2005, vol. 21, no. 10, pp. 4410–4419.
28. Rosensweig R. E. Magnetorheological particle clouds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 479, pp. 301–306.
29. Susan-Resiga D., Socoliuc V., Bunge A., Turcu R., Vékás L. From high colloidal stability ferrofluids to magnetorheological fluids: tuning the flow behavior by magnetite nanoclusters. *Smart Materials and Structures*, 2019, vol. 28, no. 11, pp. 115014.
30. Siebert E., Dupuis V., Neveu S., Odenbach S. Rheological investigations on the theoretical predicted “Poisoning” effect in bidisperse ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 374, pp. 44–49.
31. López-López M. T., Kuzhir P., Lacis S., Bossis G., González-Caballero F., Durán J. D. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, vol. 18, no. 38, pp. S2803.

32. McTague J. P. Magnetoviscosity of magnetic colloids. *The Journal of Chemical Physics*, 1969, vol. 51, no. 1, pp. 133–136.
33. Krichler M., Odenbach S. Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, vol. 326, pp. 85–90.
34. Popplewell J., Al-Qenaie A., Charles S. W., Moskowitz R., Raj K. Thermal conductivity measurements on ferrofluids. *Colloid and Polymer Science*, 1982, vol. 260, no. 3, pp. 333–338.
35. Raj K., Moskowitz B., Casciari R. Advances in ferrofluid technology. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 1995, vol. 149, no. 1-2, pp. 174–180.
36. Bottenberg W., Melillo L., Raj K. The dependence of loudspeaker design parameters on the properties of magnetic fluids. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1980, vol. 28, no. 1/2, pp. 17–25.
37. Scherer C., Figueiredo A. M. Neto Ferrofluids: properties and applications. *Brazilian Journal of Physics*, 2005, vol. 35, pp. 718–727.
38. Polunin V. M., Ryapolov P. A., Shel'deshova E. V., Kuz'ko A. E., Aref'ev I. M. Dinamicheskaya uprugost' stolbika magnitnoi zhidkosti v sil'nom magnitnom pole [Dynamic Elasticity of a magnetic fluid column in a strong magnetic field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 381–388.
39. Ryapolov P. A., Polunin V. M., Shel'deshova E. V. An alternative way to study magnetic fluid magnetization and viscosity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 496, pp. 165924.
40. Polunin V. M., Ryapolov P. A., Zhakin A. I., Sheldeshova E. V. Vyazkost' magnitnoi zhidkosti pri kolebaniyakh v sil'nom magnitnom pole [Viscosity of a Magnetic Fluid in a Strong Magnetic Field]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 379–384.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шельдешова Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: blackberry__@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1673-8144

Elena V. Shel'deshova, Senior Lecturer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: blackberry__@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1673-8144

Ряполов Петр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, декан естественно-научного факультета, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: r-piter@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7712-0682

Рекс Александр Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры ЮНЕСКО "Энергосбережение и возобновляемые источники энергии", Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, e-mail: reks@bntu.by

Трепачев Алексей Витальевич, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: a.v.trepachev@gmail.com

Petr A. Ryapolov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: r-piter@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7712-0682

Alexander G. Reks, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the UNESCO Chair "Energy Saving and Renewable Energy Sources", Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: reks@bntu.by

Alexey V. Trepachev, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: a.v.trepachev@gmail.com