УДК 538.951

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-60-69

ВЯЗКОСТНЫЙ МЕХАНИЗМ В ТЕОРИИ АНИЗОТРОПИИ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА МАГНИТНЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

Курилов А. Д.^{1,2}, Соколов В. В.¹, Эминов П. А.³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, Российская Федерация

² Московский государственный областной университет
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20, Российская Федерация

Аннотация. Проведён сравнительный анализ классической теории вязкостного механизма поглощения звука ультрадисперсными средами и одной из доминирующих теорий анизотропии поглощения звука магнитными жидкостями на основе вязкостного механизма. Теория Такетоми, используемая многими авторами, даёт завышенные значения размеров агрегатов в магнитных жидкостях и не позволяет количественно описать экспериментальные данные. Кроме того, формула, полученная Такетоми, в предельном случае не сводится к классическому выражению поглощения ультразвука, следовательно, должна считаться ошибочной.

Ключевые слова: магнитные жидкости, коэффициент поглощения, анизотропия, агрегаты, вязкостный механизм

VISCOUS MECHANISM IN THE THEORY OF ULTRASOUND ATTENUATION ANISOTROPY BY MAGNETIC FLUIDS

A. Kurilov^{1,2}, V. Sokolov¹, P. Eminov³

¹ MIREA – Russian Technological University
prosp. Vernadskogo 78, 119454 Moscow, Russian Federation

² Moscow Region State University
ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation

³ National Research University “Higher School of Economics”
ul. Myasnitskaya 20, 101000 Moscow, Russian Federation

Abstract. We report a comparative analysis of the classical theory of the viscous mechanism of sound attenuation by ultrafine media and one of the dominant theories of sound attenuation

anisotropy by magnetic fluids on the basis of the viscous mechanism. The Taketomi theory used by many authors gives overestimated values for the size of aggregates in magnetic fluids and is not able to quantify experimental data. In addition, the formula obtained by Taketomi does not reduce to the classical expression for viscous absorption in the limiting case and, therefore, should be considered erroneous.

Keywords: magnetic fluids, attenuation coefficient, anisotropy, aggregates, viscous mechanism

I. Введение

При распространении упругих волн в ультрадисперсных средах происходит дополнительное ослабление их интенсивности, которое вызвано преимущественно вязкостным и тепловым механизмами. Вязкостный механизм обусловлен различием плотностей дисперсионной среды и дисперсной фазы, из-за чего возникает градиент скорости между компонентами системы. В результате на границе раздела фаз появляются вязкие волны, стремящиеся выровнять скорости дисперсной фазы и дисперсионной среды. Величина градиента скорости зависит от размера частиц, разности плотностей между фазами, вязкости дисперсионной среды и частоты звуковой волны.

Впервые теорию вязкостного механизма поглощения звука во взвеси твёрдых частиц в жидкости выдвинули С. М. Рытов, В. В. Владимирский и М. Д. Галанин [1]. Применимость этой теории для немагнитной магнитной жидкости проверялась в работах [2–4]. Основным параметром в данной теории является отношение радиуса частицы R к глубине проникновения вязкой волны δ_η :

$$\sqrt{\xi} = \frac{R}{\delta_\eta} = R \sqrt{\frac{\rho_1 \omega}{2\eta_1}}, \quad (1)$$

где ρ_1 – плотность несущей среды, ω – циклическая частота ультразвуковой волны, η_1 – сдвиговая вязкость несущей среды.

Допавочное поглощение, вызванное данным процессом, определяется выражением:

$$\alpha_v = \frac{2}{9} \phi a \frac{\omega}{c_1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right)^2 \frac{\xi(1 + \sqrt{\xi})}{(1 + \sqrt{\xi})^2 + \xi(1 + b\sqrt{\xi})^2}, \quad (2)$$

где c_1 – скорость звука в несущей среде, ϕ – объёмная концентрация частиц, ρ_2 – плотность частиц,

$$b = \frac{2}{9} \left(1 + 2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \right). \quad (3)$$

Для малых значений объёмной концентрации параметр $a = 1$.

Расчёт полного поглощения энергии упругой волны в намагнитной магнитной жидкости представляет собой существенно более сложную задачу, поскольку общее поглощение системы α будет складываться из поглощения в несущей

среде α_0 , а также вязкостного α_v , теплового α_T и магнитодинамического α_{md} механизмов поглощения [5]:

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_{md} + \alpha_T + \alpha_0. \quad (4)$$

Из многочисленных магнитооптических экспериментов известно, что под действием внешнего магнитного поля в магнитных и магнитореологических жидкостях происходит формирование внутренней структуры из частиц [6]. Индуцирование анизотропной структуры приводит к появлению зависимости коэффициента поглощения звука от угла между волновым вектором и направлением магнитного поля.

Первые попытки развития теории анизотропии поглощения звука магнитными жидкостями опирались на теории хорошо изученных к тому моменту других анизотропных жидкостей – жидких кристаллов. Это связано с тем, что молекулы нематических жидких кристаллов, как правило, представляются в виде жёстких вытянутых эллипсоидов или стержней. Под действием внешнего магнитного поля наночастицы в магнитной жидкости группируются в сферические кластеры, которые затем выстраиваются в цепочечные агрегаты вдоль силовых линий [7]. Такие агрегаты можно также представить в виде вытянутых эллипсоидов, но существенно больших размеров [8].

Проводя аналогию с жидкими кристаллами, Дж. Парсонс в своей работе разработал линейную гидродинамическую теорию магнитных жидкостей [9]. Причём в качестве директора $\mathbf{n}$, имеющего смысл преимущественной ориентации длинных осей молекул жидких кристаллов, он принял единичный вектор локальной намагниченности. Однако экспериментальные данные показали, что даже качественно угловые зависимости коэффициента поглощения ультразвука в магнитных жидкостях носят иной характер [10; 11].

После экспериментального обнаружения того, что в магнитных жидкостях могут образовываться сферические кластеры из наночастиц в присутствии внешнего магнитного поля, С. Такетоми попытался объяснить появление анизотропии коэффициента поглощения ультразвука в магнитной жидкости движением данных кластеров: вращательным и поступательным [12]. Используя теорию поглощения звука в жидких кристаллах, он получил следующее выражение для коэффициента поглощения, вызванного вращением сферических кластеров:

$$\alpha_{rot} = \frac{\omega^2}{2\rho_1 c_3^3} \left(\frac{4}{3} \eta_3 + \eta_3^* + 2\alpha_5 \cos^2 \theta + \alpha_1 \cos^4 \theta \right), \quad (5)$$

где η_3 – сдвиговая вязкость магнитной жидкости, η_3^* – объёмная вязкость магнитной жидкости, c_3 – скорость звука в магнитной жидкости, θ – угол между волновым вектором ультразвуковой волны и направлением магнитного поля, α_1, α_5 – коэффициенты Лесли [13; 14].

Для получения выражения поглощения звука, связанного с поступательным движением кластеров, им была взята модель вибрирующей сферы в вязкой жидкости. С использованием формулы Стокса для силы трения, действующей

на сферический кластер, и учитывая силу упругости цепочечных агрегатов во внешнем магнитном поле, им было получено выражение:

$$\alpha_{tr} = \frac{3\pi\eta_1 R_c \omega^3 V_c n_c (6\pi\eta_1 R_c + \rho_1 V_c \omega)}{c_3 (k \sin \theta - \rho_2 V_c \omega^2)^2 + c_3 (6\pi\eta_1 R_c \omega)^2}, \quad (6)$$

где V_c – объём кластера, n_c – число кластеров в единице объёма, R_c – радиус кластера, k – силовая константа. Общее поглощение звука в магнитной жидкости представляется суммой выражений (5) и (6).

В настоящее время теория Такетомии используется многими авторами для описания экспериментальных данных по поглощению звука магнитными жидкостями под действием внешнего магнитного поля [15–23]. Привлекательность данной теории заключается в возможности получения с её помощью многих физических характеристик магнитных жидкостей и индуцированных в ней кластеров, а также в качественном совпадении экспериментальных и теоретических угловых зависимостей поглощения звука. Однако, можно ли надёжно опираться на получаемые с её помощью численные значения?

Поскольку теория Такетомии основана на вязкостном механизме поглощения звука, то расчётные значения радиуса и плотности агрегатов должны совпадать для обеих теорий. Поэтому целью данной работы является проверка соответствия рассматриваемых теорий посредством анализа экспериментальных данных.

II. Объект и методы исследования

Располагая большим массивом экспериментальных данных по акустическим свойствам магнитных жидкостей во внешних магнитных полях, возможно не только сопоставить результаты, получаемые с помощью теорий на основе вязкостного механизма, но также проанализировать их изменения при варьировании типа несущей среды, размеров и концентрации частиц, температуры образца, а также величин магнитного поля и частоты ультразвукового сигнала. В настоящей работе выбраны экспериментальные данные по исследованиям магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла [18; 20; 22], синтетических углеводородов [17; 21] и воды [12; 19; 23], полученные разными авторами.

Значения размера и плотности кластеров были взяты из расчётных данных по теории Такетомии и дополнены известными физическими характеристиками несущей среды и наночастиц. К сожалению, не все теплофизические параметры и кривые полидисперсности были представлены авторами работ, поэтому точно оценить вклады других механизмов поглощения звука не представляется возможным. Несмотря на это, условие $\alpha_{exp} > \alpha_v + \alpha_0$, полученное из выражения (4), всё равно должно выполняться, и любое отклонение от него будет указывать на ошибочность данных, используемых в расчётах.

III. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены диаграммы сравнения экспериментальных и расчётных значений коэффициента поглощения ультразвука в магнитных жидкостях при варьировании несущей среды и концентрации наночастиц.

Рис. 1. Диаграммы сравнения экспериментальных и расчётных согласно теории Такетоми значений коэффициента поглощения ультразвука в магнитных жидкостях при варьировании несущей среды и концентрации наночастиц.

Вклад вязкостного механизма поглощения α_v , рассчитанный по значениям, полученным из теории Такетоми, превышает экспериментально полученные для всех представленных образцов магнитных жидкостей. Причиной аномальных значений вязкостного поглощения являются завышенные размеры кластеров R_{cl} , которые в ряде случаев достигают значений в 2–3 мкм и выше. Частицы подобных размеров не только увеличивают поглощение ультразвука системой на порядки, но и вызывают его рассеяние, сопоставимое по величине с внутренним поглощением.

Значения поглощения звука магнитной жидкостью на основе воды, полученные в работе [19], существенно ниже не только расчётных данных α_v , но и значений, полученных другими авторами для образцов с меньшими концентрациями наночастиц. Ранее нами уже был указан ряд грубых ошибок в данной работе [24].

Рассмотрим подробнее выражение (6), которое представляет собой вклад только вязкостного механизма в поглощение ультразвука магнитной жидкостью. В предельном случае при $k = 0$ (случай равенства плотностей дисперсионной среды и дисперсной фазы) оно должно обращаться в нуль. Легко увидеть, что выражение (6) не удовлетворяет данному требованию, поэтому его следует считать ошибочным.

IV. Заключение

Существующие на данный момент теории жидких намагничивающихся сред не способны количественно описать поведение магнитных жидкостей во внешних магнитных полях, в особенности индуцированную анизотропию её свойств. Теория Такетоми даёт завышенные значения размера кластеров из наночастиц в магнитных жидкостях, что должно приводить к аномальному поглощению ультразвука и его рассеянию. Однако известно, что в стабильных образцах магнитной жидкости отсутствуют агрегаты микронных размеров даже в присутствии внешнего магнитного поля. Кроме того, формула, полученная Такетоми, в предельном случае не сводится к классическому выражению поглощения ультразвука, следовательно, должна считаться ошибочной.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Курилов А. Д. выражает благодарность РФФИ за поддержку данного исследования, грант № 19-32-90032 Аспиранты.

ACKNOWLEDGMENTS

A. D. Kurilov acknowledges the support of the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 19-32-90032, Postgraduate students).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рытов С. М., Владимирский В. В., Галанин М. Д. Распространение звука в дисперсных системах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1938. Т. 8. № 5. С. 614–626.
2. Соколов В. В., Надворецкий В. В. Вязкостный механизм поглощения ультразвука в магнитных жидкостях // Магнитная гидродинамика. 1994. Т. 30. № 5. С. 15–22.
3. Распространение ультразвука в магнитной жидкости. I. Учет агрегирования частиц / Гогосов В. В., Мартынов С. И., Пуриков С. Н., Шапошникова Г. А. // Магнитная гидродинамика. 1987. Т. 23. № 2. С. 19–27.
4. Распространение ультразвука в магнитной жидкости. II. Анализ экспериментов: определение размеров агрегатов / Гогосов В. В., Мартынов С. И., Пуриков С. Н., Шапошникова Г. А. // Магнитная гидродинамика. 1987. Т. 23. № 3. С. 15–21.
5. Надворецкий В. В. Поглощение ультразвука в магнитных жидкостях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1999. 118 с.

6. The effect of suspended Fe_3O_4 nanoparticle size on magneto-optical properties of ferrofluids / Brojabasi S., Muthukurman T., Laskar J. M., Philip J. // *Optics Communications*. 2015. Vol. 336. P. 278–285.
7. Optical evidence of magnetic field-induced ferrofluid aggregation: Comparison of cobalt ferrite, magnetite, and magnesium ferrite / Lakić M., Andjelković L., Šuljagić M., Vulić P., Perić M., Iskrenović P., Krstić I., Kuraica M. M., Nikolić A. S. // *Optical Materials*. 2019. Vol. 91. P. 279–285.
8. Надворецкий В. В., Соколов В. В. Поглощение ультразвука в магнитной жидкости с эллипсоидальными агрегатами // *Магнитная гидродинамика*. 1997. Т. 33. № 1. С. 36–41.
9. Parsons J. D. Sound velocity in a magnetic fluid // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1975. Vol. 8. No. 10. P. 1219–1226.
10. Gotoh K., Chung D. Y. Ultrasonic Attenuations in Magnetic Fluids // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1984. Vol. 53. Iss. 8. P. 2521–2528.
11. Tarapov I. Ye., Patsegon N. F., Phedonenko A. I. Some physical and mechanical phenomena in magnetizable fluids // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1983. Vol. 39. Iss. 1–2. P. 51–55.
12. Taketomi S. The Anisotropy of the Sound Attenuation in Magnetic Fluid under an External Magnetic Field // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1986. Vol. 55. Iss. 3. P. 838–844.
13. Leslie F. M. Some constitutive equations for anisotropic fluids (Continuum with director and constitutive equations for anisotropic fluids, obtaining solutions for simple shear, Poiseuille and Couette flows) // *Quarterly Journal of mechanics and applied mathematics*. 1966. Vol. 19. Iss. 3. P. 357–370.
14. Leslie F. M. Some constitutive equations for liquid crystals // *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 1968. Vol. 28. Iss. 4. P. 265–283.
15. Structure of nanoparticles in transformer oil-based magnetic fluids, anisotropy of acoustic attenuation / Kúdelčík J., Bury P., Kopčanský P., Timko M. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015. Vol. 388. P. 28–34.
16. Study of Structural Changes of Water-Based Magnetic-Fluid by Acoustic Spectroscopy / Kúdelčík J., Hardoň Љ., Bury P., Timko M., Kopčanský P. // *Acta Physica Polonica A*. 2017. Vol. 131. No. 4. P. 919–921.
17. Skumiel A., Łabowski M., Jyzefczak A. The measurements of anisotropy of ultrasound propagation and magnetic susceptibility in viscous ferrofluid // *Ultrasonics*. 2002. Vol. 40. Iss. 1–8. P. 341–344.
18. Influence of nanoparticles diameter on structural properties of magnetic fluid in magnetic field / Kúdelčík J., Bury P., Hardoň Š., Kopčanský P., Timko M. // *Journal of Electrical Engineering*. 2015. Vol. 66. Iss. 4. P. 231–234.
19. Parekh K., Upadhyay R. V. The effect of magnetic field induced aggregates on ultrasound propagation in aqueous magnetic fluid // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 431. P. 74–78.
20. Temperature effect on anisotropy of acoustic attenuation in magnetic fluids based on transformer oil / Kudelcik J., Bury P., Kopcansky P., Timko M. // *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2014. Vol. 16. No. 1. P. 33–38.
21. Magnetic properties and anisotropy of ultrasound attenuation in APG-832 magnetic liquid / Regulska P., Skumiel A., Hornowski T., Jyzefczak A. // *Archives of Acoustics*. 2007. Vol. 32. No. 4 (S). P. 95–100.
22. Acoustic spectroscopy of magnetic fluids based on transformer oil / Kúdelčík J., Hardoň Љ., Bury P., Kopčanský P., Timko M. // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016. Vol. 27. Iss. 7. P. 935–943.

23. Jyzefczak A., Skumiel A. Field-induced aggregates in a bilayer ferrofluid characterized by ultrasound spectroscopy // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2006. Vol. 18. No. 6. P. 1869.
24. Sokolov V. V. Comment on: "The effect of magnetic field induced aggregates on ultrasound propagation in aqueous magnetic fluid" [J. Magn. Magn. Mater. 431 (2017) 74–78] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 475. P. 794–795.

REFERENCES

1. Rytov S. M., Vladimirskii V. V., Galanin M. D. [Sound propagation in dispersed systems]. In: *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1938, vol. 8, no. 5, pp. 614–626.
2. Sokolov V. V., Nadvoret'skii V. V. [Viscous mechanism of ultrasound absorption in magnetic fluids]. In: *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetohydrodynamics], 1994, vol. 30, no. 5, pp. 15–22.
3. Gogosov V. V., Martynov S. I., Tsurikov S. N., Shaposhnikova G. A. [The propagation of ultrasound in a magnetic fluid. I. Accounting for particle aggregation]. In: *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetohydrodynamics], 1987, vol. 23, no. 2, pp. 19–27.
4. Gogosov V. V., Martynov S. I., Tsurikov S. N., Shaposhnikova G. A. [The propagation of ultrasound in a magnetic fluid. II. Analysis of experiments: determining the aggregate size]. In: *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetohydrodynamics], 1987, vol. 23, no. 3, pp. 15–21.
5. Nadvoret'skii V. V. *Pogloshchenie ul'trazvuka v magnitnykh zhidkostyakh: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [The absorption of ultrasound in magnetic fluids: PhD thesis in Physical and Mathematical Sciences]. Moscow, 1999. 118 p.
6. Brojabasi S., Muthukurman T., Laskar J. M., Philip J. The effect of suspended Fe₃O₄ nanoparticle size on magneto-optical properties of ferrofluids. In: *Optics Communications*, 2015, vol. 336, pp. 278–285.
7. Lakić M., Andjelković L., Šuljagić M., Vulić P., Perić M., Iskrenović P., Krstić I., Kuraica M. M., Nikolić A. S. Optical evidence of magnetic field-induced ferrofluid aggregation: Comparison of cobalt ferrite, magnetite, and magnesium ferrite. In: *Optical Materials*, 2019, vol. 91, pp. 279–285.
8. Nadvoret'skii V. V., Sokolov V. V. [The absorption of ultrasound in a magnetic fluid with an ellipsoidal aggregates]. In: *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetohydrodynamics], 1997, vol. 33, no. 1, pp. 36–41.
9. Parsons J. D. Sound velocity in a magnetic fluid. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1975, vol. 8, no. 10, pp. 1219–1226.
10. Gotoh K., Chung D. Y. Ultrasonic Attenuations in Magnetic Fluids. In: *Journal of the Physical Society of Japan*, 1984, vol. 53, iss. 8, pp. 2521–2528.
11. Tarapov I. Ye., Patsegon N. F., Phedonenko A. I. Some physical and mechanical phenomena in magnetizable fluids. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1983, vol. 39, iss. 1–2, pp. 51–55.
12. Taketomi S. The Anisotropy of the Sound Attenuation in Magnetic Fluid under an External Magnetic Field. In: *Journal of the Physical Society of Japan*, 1986, vol. 55, iss. 3, pp. 838–844.
13. Leslie F. M. Some constitutive equations for anisotropic fluids (Continuum with director and constitutive equations for anisotropic fluids, obtaining solutions for simple shear, Poiseuille and Couette flows). In: *Quarterly Journal of mechanics and applied mathematics*, 1966, vol. 19, iss. 3, pp. 357–370.
14. Leslie F. M. Some constitutive equations for liquid crystals. In: *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1968, vol. 28, iss. 4, pp. 265–283.

15. Kúdelčík J., Bury P., Kopčanský P., Timko M. Structure of nanoparticles in transformer oil-based magnetic fluids, anisotropy of acoustic attenuation. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 388, pp. 28–34.
16. Kúdelčík J., Hardoň Љ., Bury P., Timko M., Kopčanský P. Study of Structural Changes of Water-Based Magnetic-Fluid by Acoustic Spectroscopy. In: *Acta Physica Polonica A*, 2017, vol. 131, no. 4, pp. 919–921.
17. Skumiel A., Łabowski M., Jyzefczak A. The measurements of anisotropy of ultrasound propagation and magnetic susceptibility in viscous ferrofluid. In: *Ultrasonics*, 2002, vol. 40, iss. 1–8, pp. 341–344.
18. Kúdelčík J., Bury P., Hardoň Š., Kopčanský P., Timko M. Influence of nanoparticles diameter on structural properties of magnetic fluid in magnetic field. In: *Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 66, iss. 4, pp. 231–234.
19. Parekh K., Upadhyay R. V. The effect of magnetic field induced aggregates on ultrasound propagation in aqueous magnetic fluid. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 431, pp. 74–78.
20. Kudelcik J., Bury P., Kopcansky P., Timko M. Temperature effect on anisotropy of acoustic attenuation in magnetic fluids based on transformer oil. In: *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 33–38.
21. Regulska P., Skumiel A., Hornowski T., Jyzefczak A. Magnetic properties and anisotropy of ultrasound attenuation in APG-832 magnetic liquid. In: *Archives of Acoustics*, 2007, vol. 32, no. 4 (S), pp. 95–100.
22. Kúdelčík J., Hardoň Љ., Bury P., Kopčanský P., Timko M. Acoustic spectroscopy of magnetic fluids based on transformer oil. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, vol. 27, iss. 7, pp. 935–943.
23. Jyzefczak A., Skumiel A. Field-induced aggregates in a bilayer ferrofluid characterized by ultrasound spectroscopy. In: *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, vol. 18, no. 6, pp. 1869.
24. Sokolov V. V. Comment on: “The effect of magnetic field induced aggregates on ultrasound propagation in aqueous magnetic fluid” [J. Magn. Magn. Mater. 431 (2017) 74–78]. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 475, pp. 794–795.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курилов Александр Дмитриевич – аспирант кафедры высшей математики МИРЭА – Российского технологического университета; мастер производственного обучения учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;
e-mail: ad.kurilov@gmail.com

Соколов Виктор Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, советник по научной работе МИРЭА – Российского технологического университета;
e-mail: vvs1953@rambler.ru

Эминов Павел Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор департамента прикладной математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;
e-mail: peminov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander D. Kurilov – postgraduate student at the Department of Higher Mathematics, MIREA – Russian Technological University; master of industrial training at the Educational and Research Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;

e-mail: ad.kurilov@gmail.com

Victor V. Sokolov – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, science advisor, MIREA – Russian Technological University;

e-mail: vvs1953@rambler.ru

Pavel A. Eminov – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Applied Mathematics, National Research University “Higher School of Economics”;

e-mail: peminov@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Курилов А. Д., Соколов В. В., Эминов П. А. Вязкостный механизм в теории анизотропии поглощения ультразвука магнитными жидкостями // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2019. № 4. С. 60–69.

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-60-69

FOR CITATION

Kurilov A. D., Sokolov V. V., Eminov P. A. Viscous mechanism in the theory of ultrasound attenuation anisotropy by magnetic fluids. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 4, pp. 60–69.

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-60-69