УДК 538.951

DOI: 10.18384-2310-7251-2018-3-42-49

ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Соколов В.В.¹, Курилов А.Д.^{1,2}¹ МИРЭА – Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, Российская Федерация² Московский государственный областной университет
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
Российская Федерация

Аннотация. Впервые получены экспериментальные результаты по поглощению ультразвука в магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле. Показано, что в диапазоне частот вращения магнитного поля $f_H = 0,056 - 140$ мГц и $T = 295$ К запаздывание угловой зависимости анизотропии коэффициента поглощения ультразвука магнитной жидкостью на основе керосина не наблюдается в пределах погрешностей измерений.

Ключевые слова: магнитные жидкости, анизотропия, коэффициент поглощения, магнитное поле, жидкие кристаллы.

ABSORPTION OF ULTRASOUND BY A MAGNETIC FLUID IN A ROTATING MAGNETIC FIELD

V. Sokolov¹, A. Kurilov^{1,2}¹ MIREA – Russian Technological University
prosp. Vernadskogo 78, 119454 Moscow, Russian Federation² Moscow Region State University
ul. Very Voloshino y24, 141014 Mytishchi, Moscow region, Russian Federation

Abstract. Experimental results on the absorption of ultrasound by a magnetic fluid in a rotating magnetic field have been obtained for the first time. It is shown that the delay of the angular dependence of the anisotropy of ultrasonic absorption coefficient by a kerosene-based magnetic fluid in the range of magnetic field rotation frequencies $f_H = 0,056 - 140$ mHz and $T = 295$ K is not observed within the limits of observational errors.

Key words: magnetic fluids, anisotropy, attenuation coefficient, magnetic field, liquid crystals.

Коллоидные растворы ультрадисперсных ферромагнитных наночастиц с размером порядка 10 нм называются магнитными жидкостями (МЖ) [1]. МЖ представляют особый интерес в науке, технике и медицине благодаря своим необычным и исключительным свойствам, к которым относится термомагнитная конвекция, магнитная левитация на МЖ, магнитореологический эффект и наведение анизотропии её макроскопических свойств во внешнем магнитном поле.

Эффект увлечения магнитной жидкости вращающимся магнитным полем был обнаружен в [2]. В работе достигалась угловая скорость вращения магнитной жидкости вплоть до $3,57 \text{ с}^{-1}$ при напряжённости магнитного поля $H = 60 \text{ кА/м}$. С момента первой работы и до настоящего времени продолжают исследования во вращающихся магнитных полях. Это вызвано необходимостью подтверждения антисимметричности тензора напряжений в МЖ и определению величины вращательной вязкости. В монографии [1] показано значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями вращательной вязкости.

Понятие вращательной вязкости впервые было введено Сорокиным В.С. [3], который указал на необходимость существования силы, подобной силе трения, для описания перехода момента импульса из скрытого движения в видимое вращение жидкости. Как показано в [3], внутренний момент импульса увеличивается пропорционально угловой скорости вращения жидкости и уменьшается пропорционально своей собственной величине за промежуток времени, характеризующий переход момента импульса в видимое движение.

Авторы [4] для описания динамики полярной жидкости учитывали вращательную вязкость и диффузию внутреннего момента импульса и теоретически предсказали вращение полярной жидкости под действием однородного вращающегося электрического поля. Дальнейшие теоретические исследования в этом направлении выполнены в работах [5–7].

В известных к настоящему времени экспериментальных исследованиях вращающееся магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца, где на четыре перпендикулярные катушки подаётся синусоидальный сигнал с разностью фаз в 90° . Такая реализация вращающегося магнитного поля исключает возможность достижения необходимой выдержки в магнитном поле.

Как было показано ранее, формирование внутренней структуры в магнитных жидкостях под действием внешнего магнитного поля носит диффузионный характер [8], а время необходимой выдержки может составлять до десятков и сотен часов. Существующие теоретические исследования кинетики образования агрегатов в магнитных и магнетореологических жидкостях [9–12] не описывают трансляционный порядок агрегатов в объёме жидкости.

В работах [13; 14] восстанавливали профиль потока магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле ультразвуковым доплеровским методом. Однако для построения профиля скорости таким методом в магнитную жидкость добавлялись немагнитные микросферы, которые нарушают ориентационный порядок наночастиц.

Диапазоны используемых значений напряжённости магнитного поля H и характерной частоты его вращения f_H в данных экспериментах составляют $4 - 9 \text{ кА/м}$ и $100 - 2 \cdot 10^5 \text{ Гц}$.

Целью настоящей работы является применение акустического метода для определения вращательной вязкости магнитной жидкости. Этот метод был впервые разработан авторами [15] для измерения вращательной вязкости нематических жидких кристаллов (НЖК) во вращающемся магнитном поле по фазовой диаграмме угловой зависимости поглощения ультразвука. Данный метод на-

глядно показывает существование вращательной вязкости без дополнительной обработки экспериментальных данных.

В данной работе используется импульсный ультразвуковой метод фиксированного расстояния между пьезопреобразователями. Вращающееся магнитное поле формируется постоянным магнитом, закреплённым на вращающейся платформе. Напряжённость магнитного поля составляет 110 кА/м, что на порядок превышает значения в других экспериментальных работах с вращающимся магнитным полем, посвящённых измерению вращательной вязкости в МЖ. Акустическая камера закреплена между полюсов постоянного магнита и представляет собой цилиндр длиной $l = 9$ мм и диаметром $d = 12$ мм, выполненный из нержавеющей немагнитной стали, к торцам которого приклеены пьезопреобразователи из ниобата лития LiNbO_3 с резонансной частотой 3.4 МГц. Измерения амплитуды зондирующего импульса осуществлялись с помощью автоматического регистратора Velleman PCS10, при этом на второй канал устройства подавались контрольные метки с фотодиода через каждые 90° при вращении платформы. По контрольным меткам с фотодиода определяется начальное смещение акустической камеры θ_0 , а также угол запаздывания директора θ при исследовании НЖК. Затем определяется угловая зависимость анизотропии коэффициента поглощения ультразвука $\Delta\alpha(\varphi) = \alpha(\varphi) - \alpha(90^\circ)$. Частота заполнения импульсов задавалась $f_0 = 3,4$ МГц и соответствовала основному резонансу; амплитуда напряжения, подаваемого на пьезоизлучатель электрического сигнала, составляла 5 В.

Для калибровки экспериментальной установки была измерена фазовая характеристика анизотропии коэффициента поглощения ультразвука в жидкокристаллической смеси ЖК-440. На рис. 1 показан фазовый сдвиг директора и вектора напряжённости магнитного поля при частоте вращения магнитного поля $f_H = 12,5$ МГц и температуре $T = 295$ К.

Рис. 1. Зависимость анизотропии коэффициента поглощения ультразвука ЖК-440 от угла между внешним магнитным полем и волновым вектором ультразвуковой волны.

Объектом исследования являлась МЖ на основе керосина с объёмной концентрацией магнетита $\phi = 0,15$. Кривая намагничивания была измерена на вибрационном магнитометре VSM LakeShore 7407 и приведена на рис. 2. На основе полученной кривой намагничивания рассчитаны значения намагниченности насыщения $M_S = 51,8$ кА/м и начальной магнитной восприимчивости $\chi_0 = 1,54$ (СИ).

Рис. 2. Кривая намагничивания исследуемого образца МЖ на основе керосина.

Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты наночастиц, что приводит к возникновению удлинённых цепочечных агрегатов, вытянутых вдоль направления магнитного поля. Благодаря диполь-дипольному взаимодействию, цепочки частиц, не находящиеся на одной силовой линии, взаимно отталкиваются и стремятся равномерно распределиться в объёме жидкости. Однако с увеличением длины цепочек их движение замедляется, поэтому время установления термодинамического равновесия возрастает.

Следовательно, для получения воспроизводимых экспериментальных результатов необходимо выдерживать магнитную жидкость в постоянном поле. Время выдержки определялось экспериментально в статическом режиме путём дискретного изменения взаимной ориентации магнитного поля и волнового вектора ультразвуковой волны с шагом 5–10 градусов.

В настоящей работе акустическая камера, заполненная исследуемым образцом, выдерживалась между полюсами постоянного магнита свыше 150 часов. После образования устойчивой структуры цепочечных агрегатов производились измерения поглощения ультразвука при вариации частоты вращения постоянного магнита.

Для различных частот вращения магнитного поля получены угловые зависимости $\Delta\alpha(\varphi)$, представленные на рис. 3. Увеличение частоты вращения магнитного поля приводит к качественному изменению угловой зависимости $\Delta\alpha(\varphi)$, а также спаду максимального значения $\Delta\alpha$ на 30%. Переходный режим наблюдается в диапазоне от 0,14 мГц до 5,56 мГц, при этом максимум анизотропии коэффициента поглощения смещается в окрестность 50° .

Рис. 3. Угловая зависимость анизотропии коэффициента поглощения ультразвука МЖК при разных частотах вращения внешнего магнитного поля.

Возможное объяснение этого заключается в структурных перестройках, связанных с уменьшением длины иглообразных агломератов в соответствии со скейлинговым законом. Дальнейшее увеличение частоты вращения магнитного поля вплоть до $f_H = 0,14$ Гц не приводит к существенным изменениям угловой зависимости $\Delta\alpha(\varphi)$.

Вектор намагниченности магнитной жидкости вращается с той же угловой скоростью, что и магнитное поле. Экспериментальные данные показывают, что данные векторы параллельны, т.е. фазовый сдвиг между ними отсутствует в исследуемом частотном диапазоне. Это говорит о том, что вращающееся магнитное поле увлекает магнитную жидкость как целое благодаря устойчивой ориентационной упорядоченности иглообразных агломератов наночастиц.

Более наглядно отсутствие фазового сдвига при $f_H = 0,14$ Гц показано на исходных данных автоматического регистратора, т.е. временной зависимости амплитуды зондирующего импульса, представленных на рис. 4. Пунктирными линиями на рисунке показаны контрольные метки.

Рис. 4. Временная зависимость амплитуды ультразвукового импульса, прошедшего через МЖК при частоте вращения внешнего магнитного поля $f_H = 70$ МГц; пунктирными линиями обозначены метки, идущие через $\pi/2$.

Представленные результаты подтверждают вывод об увлечении МЖ вращающимся магнитным полем как целого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics. Mineola, New York: Dover Publications Inc., 2014. 612 p.
2. Moskowitz R., Rosensweig R.E. Nonmechanical torque-driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field // Applied Physics Letters. 1967. Vol. 11. Iss. 10. P. 301–303.
3. Сорокин В.С. О внутреннем трении жидкостей и газов, обладающих скрытым моментом импульса // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1943. Т. 13. Вып. 7–8. С. 306–312.
4. Condiff D.W., Dahler J.S. Fluid mechanical aspects of antisymmetric stress // The Physics of Fluids. 1964. Vol. 7. Iss. 6. P. 842–854.
5. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1967. Vol. 24. No. 1. P. 173–177.
6. Shliomis M.I. Equations of motion of a fluid with hydromagnetic properties // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1968. Vol. 26. No. 3. P. 665–669.
7. Zaitsev V.M., Shliomis M.I. Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1969. Vol. 10. Iss. 5. P. 696–700.
8. Sokolov V.V. Wave propagation in magnetic nanofluids (A review) // Acoustical Physics. 2010. Vol. 56. Iss. 6. P. 972–988.
9. Two-stage kinetics of field-induced aggregation of medium-sized magnetic nanoparticles / Ezzaier H., Alves Marins J., Razvin I., Abbas M., Ben Haj Amara A., Zubarev A., Kuzhir P. // The Journal of Chemical Physics. 2017. Vol. 146. Iss. 11. P. 114902.
10. Odenbach S. Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials // Archive of Applied Mechanics. 2016. Vol. 86. No. 1–2. P. 269–279.

11. Dynamical pattern formation in a low-concentration magnetorheological fluid under two orthogonal sinusoidal fields / Ўйпез L.D., Carrillo J.L., Donado F., Sausedo-Solorio J.M., Miranda-Romagnoli P. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. Vol. 408. P. 321–329.
12. Fernández-Toledano J.C., Ruiz-Lopez J.A., Hidalgo-Elvarez R., Vicente J. de. Simulations of polydisperse magnetorheological fluids: A structural and kinetic investigation // *Journal of Rheology*. 2015. Vol. 59. Iss. 2. P. 475–498.
13. Torres-Дназ I., Rinaldi C., Khushrushahi S., Zahn M. Observations of ferrofluid flow under a uniform rotating magnetic field in a spherical cavity // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 111. Iss. 7. P. 07B313.
14. Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under traveling magnetic fields / Mao L., Elborai S., He X., Zahn M., Koser H. // *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. Iss. 10. P. 104431.
15. Богданов Д.Л., Геворкян Э.В., Лагунов А.С. Акустические свойства жидких кристаллов во вращающемся магнитном поле // *Акустический журнал*. 1980. Т. 26. Вып. 1. С. 28–34.

REFERENCES

1. Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics*. Mineola, New York: Dover Publications Inc., 2014. 612 p.
2. Moskowitz R., Rosensweig R.E. Nonmechanical torque-driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field. In: *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, iss. 10, pp. 301–303.
3. Sorokin V.S. [On internal friction of liquids and gases with a latent momentum]. In: *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1943, vol. 13, no. 7–8, pp. 306–312.
4. Condiff D.W., Dahler J.S. Fluid mechanical aspects of antisymmetric stress. In: *The Physics of Fluids*, 1964, vol. 7, iss. 6, pp. 842–854.
5. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation. In: *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1967, vol. 24, no. 1, pp. 173–177.
6. Shliomis M.I. Equations of motion of a fluid with hydromagnetic properties. In: *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1968, vol. 26, no. 3, pp. 665–669.
7. Zaitsev V.M., Shliomis M.I. Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field. In: *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1969, vol. 10, iss. 5, pp. 696–700.
8. Sokolov V.V. Wave propagation in magnetic nanofluids (A review). In: *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, iss. 6, pp. 972–988.
9. Ezzaier H., Alves Marins J., Razvin I., Abbas M., Ben Haj Amara A., Zubarev A., Kuzhir P. Two-stage kinetics of field-induced aggregation of medium-sized magnetic nanoparticles. In: *The Journal of Chemical Physics*, 2017, vol. 146, iss. 11, pp. 114902.
10. Odenbach S. Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials. In: *Archive of Applied Mechanics*, 2016, vol. 86, no. 1–2, pp. 269–279.
11. Ўйпез L.D., Carrillo J.L., Donado F., Sausedo-Solorio J.M., Miranda-Romagnoli P. Dynamical pattern formation in a low-concentration magnetorheological fluid under two orthogonal sinusoidal fields. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 408, pp. 321–329.
12. Fernández-Toledano J.C., Ruiz-Lopez J.A., Hidalgo-Elvarez R., Vicente J. de. Simulations of polydisperse magnetorheological fluids: A structural and kinetic investigation. In: *Journal of Rheology*, 2015, vol. 59, iss. 2, pp. 475–498.

13. Torres-Díaz I., Rinaldi C., Khushrushahi S., Zahn M. Observations of ferrofluid flow under a uniform rotating magnetic field in a spherical cavity. In: *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, iss. 7, pp. 07B313.
14. Mao L., Elborai S., He X., Zahn M., Koser H. Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under traveling magnetic fields. In: *Physical Review B*, 2011, vol. 84, iss. 10, pp. 104431.
15. Bogdanov D.L., Gevorkyan E.V., Lagunov A.S. [Acoustic properties of liquid crystals in a rotating magnetic field]. In: *Akusticheskii zhurnal* [Acoustic Journal], 1980, vol. 26, no. 1, pp. 28–34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Виктор Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, советник по научной работе МИРЭА – Российского технического университета;
e-mail: vvs195326@gmail.com;

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victor V. Sokolov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of Higher Mathematics, science advisor, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: vvs195326@gmail.com;

Alexander D. Kurilov – postgraduate student at the Department of Higher Mathematics, MIREA – Russian Technological University; master of industrial training, educational and research laboratory of theoretical and applied nanotechnology, Moscow Region State University;
e-mail: ad.kurilov@gmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Соколов В.В., Курилов А.Д. Поглощение ультразвука магнитной жидкостью во вращающемся магнитном поле // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2018. № 3. С. 42-49.
DOI: 10.18384-2310-7251-2018-3-42-49

FOR CITATION

Sokolov V.V., Kurilov A.D. Absorption of ultrasound by a magnetic fluid in a rotating magnetic field. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 3, pp. 42-49.
DOI: 10.18384-2310-7251-2018-3-42-49