

УДК 538.951

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-3-77-82

АНИЗОТРОПИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Соколов В.В., Осипов М.И.

МИРЭА – Российский технологический университет

119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, Российская Федерация

Аннотация. Использован новый подход к динамике магнитных жидкостей на основе концепции вмороженности намагниченности, чтобы описать экспериментальные результаты по анизотропии скорости ультразвука в магнитореологической жидкости. Продемонстрировано достаточно хорошее согласие экспериментальных и вычисленных результатов.

Ключевые слова: скорость ультразвука, анизотропия, магнитореологическая жидкость, вмороженная намагниченность.

ULTRASOUND VELOCITY ANISOTROPY IN A MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

V. Sokolov, M. Osipov

MIREA – Russian Technological University

prosp. Vernadskogo 78, 119454 Moscow, Russian Federation

Abstract. We have employed a new approach to the dynamics of magnetic fluids based on the concept of frozen-in magnetization to describe the experimental data for the ultrasound velocity anisotropy in a magnetorheological fluid. A sufficiently good agreement between experimental and computational results is demonstrated.

Key words: ultrasound velocity, anisotropy, magnetorheological fluid, frozen-in magnetization.

Магнитореологические жидкости (МРЖ) представляют собой суспензии магнитных частиц микронного размера в жидкости-носителе, физические свойства МРЖ могут изменяться при приложении магнитного поля, которое, в частности, приводит к значительному изменению вязкости [1]. Поэтому МРЖ широко используются в демпфирующих устройствах, муфтах, тормозах, в устройствах антисейсмической защиты и т. д. [2–4].

Целью работы является теоретическое описание экспериментальных результатов по анизотропии скорости распространения ультразвука в магнитореологической жидкости [5].

В работе [6] были выведены уравнения феррогидродинамики (ФГД) с вмороженной намагниченностью. Связь ФГД с вмороженной намагниченностью с существующими теориями была установлена в [7].

Теория распространения волн малой амплитуды в рамках ФГД с вмороженной намагниченностью была представлена в [8]. В обзоре [9] показано, что только в рамках теории [8] можно описать существующие экспериментальные результаты по анизотропии скорости ультразвука в магнитных жидкостях на различной основе. Авторы [10] также описали полученные ими экспериментальные результаты с помощью теории [8].

Гидродинамическими модами магнитной жидкости с вмороженной намагниченностью являются быстрая и медленная магнитозвуковые волны и волна альфвеновского типа. Эта волна является аналогом волны Альфвена, которая распространяется в жидкости с бесконечной проводимостью при наличии внешнего магнитного поля и в которой колеблется напряжённость магнитного поля. В волне альфвеновского типа в непроводящей магнитной жидкости колеблется намагниченность. Важно отметить, что наличие таких гидродинамических мод в непроводящей магнитной жидкости является следствием вмороженности намагниченности. Аналогичные гидродинамические моды имеются в магнитной гидродинамике (МГД), которая описывает движение жидкости с бесконечной проводимостью. Гидродинамические моды в МГД являются следствием вмороженности напряжённости магнитного поля в идеально проводящую жидкость [11].

Фазовые скорости распространения быстрой и медленной магнитозвуковых волн в ФГД с вмороженной намагниченностью определяются формулами:

$$C_{f(s)} = \frac{C_0}{\sqrt{2}} \left[1 + B_1 - A_1 \pm \sqrt{B_2 + B_3 - 2A_1 + A_2 - D} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

Знак «+» соответствует скорости быстрой магнитозвуковой волны C_f знак «-» – скорости медленной магнитозвуковой волны C_s .

Фазовая скорость волны альфвеновского типа определяется формулой:

$$C_A^2 = m_0^2 \beta_{\perp} \cos^2 \vartheta. \quad (2)$$

В формулах (1), (2) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} B_1 &= a_1 (1 + \beta) \cos^2 \vartheta, & B_2 &= [1 - a_1 (1 - \beta) \cos^2 \vartheta]^2, \\ B_3 &= a_1 (1 - \beta) \sin^2 2\vartheta, & \beta &= \beta_{\parallel} / \beta_{\perp}, & a_1 &= (m_0^2 \beta_{\perp}) / C_0^2, \\ A_1 &= 2a_2 (\sin \vartheta + \alpha \cos \vartheta) \cos \vartheta, & A_2 &= 4a_2^2 (1 + \alpha^2) \cos^2 \vartheta, \\ \alpha &= \alpha_{\parallel} / \alpha_{\perp}, & a_2 &= (\rho_0 m_0 \alpha_{\perp}) / C_0^2, \end{aligned}$$

$$D = 4a_1 a_2 (1 - \beta) (\sin \vartheta - \alpha \cos \vartheta) \cos^3 \vartheta,$$

где ϑ – угол между волновым вектором и направлением внешнего магнитного поля, m_0 – удельная намагниченность, ρ_0 – плотность магнитореологической жидкости. Феноменологические коэффициенты β_{\parallel} , β_{\perp} описывают магнитоупругие, а коэффициенты α_{\parallel} , α_{\perp} – магнитострикционные свойства. Как легко заме-

титель из формулы (1), скорость распространения быстрой магнитозвуковой волны $C(\vartheta = 90^\circ) = C_\perp$ совпадает со скоростью ультразвука в магнитной жидкости C_0 . В общем случае анизотропия скорости распространения ультразвука описывается соотношением:

$$\Delta = \frac{C(\vartheta) - C_\perp}{C_\perp}. \quad (3)$$

Для применения теории [8] к МРЖ воспользуемся экспериментальными данными, полученными авторами [5], которые впервые измерили анизотропию скорости распространения ультразвука в магнитореологической жидкости марки "MRF-132DG" фирмы "Lord" на основе углеводородного масла с объёмной концентрацией, равной 32% частиц железа. Частицы железа были полидисперсными с размерами 3–10 мкм. Плотность МРЖ составляла $3 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Скорость ультразвука измерялась импульсным методом на частоте 2 МГц. Измерительная акустическая ячейка помещалась в термостат и размещалась между полюсами электромагнита. Величина магнитного поля варьировалась от 0 до 550 мТл. Угол ϑ между направлением магнитного поля и направлением распространения ультразвуковой волны изменялся в диапазоне $0^\circ - 180^\circ$.

Анизотропия скорости ультразвука измерялась при двух значениях магнитной индукции намагничивающего поля 0,1 Тл и 0,5 Тл.

Авторы представили экспериментальные результаты по анизотропии скорости ультразвука в виде: $(C(\vartheta) - C_0)/C_0$, где $C_0 = 809,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Эти данные позволили нам определить величины $C(\vartheta)$, в том числе определить значения $C_\perp = 809,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ для магнитного поля 0,1 Тл и $C_\perp = 823,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ для магнитного поля 0,5 Тл. Отсюда следует, что в магнитном поле 0,5 Тл полученная скорость ультразвука значительно больше, чем скорость ультразвука в ненамагниченной МРЖ. По паспортным данным МРЖ были определены значения удельной намагниченности для указанных выше значений индукции магнитного поля и представлены в табл. 1.

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показано на рис. 1. Расчёт производился по формуле (3), значения феноменологических коэффициентов β_\parallel , β_\perp , α_\parallel , α_\perp подбирались таким образом, чтобы расхождение между экспериментальными и теоретическими результатами было минимальным.

Таблица 1.

Физические характеристики МРЖ и значения феноменологических коэффициентов

B, кГс	$C_0 \cdot 10^{-2}$, см · с ⁻¹	ρ_0 , г · см ⁻³	m_0 , гс · см ³ · Г ⁻¹	$\beta_\parallel \cdot 10^{-3}$, г · см ⁻³	$\beta_\perp \cdot 10^{-3}$, г · см ⁻³	$\alpha_\parallel \cdot 10^{-3}$, гс · см ³ · Г ⁻¹	$\alpha_\perp \cdot 10^{-3}$, гс · см ³ · Г ⁻¹
1	809,4	3	79,5	15	31		
5	823,8	3	159,1	7,5	36	9	20

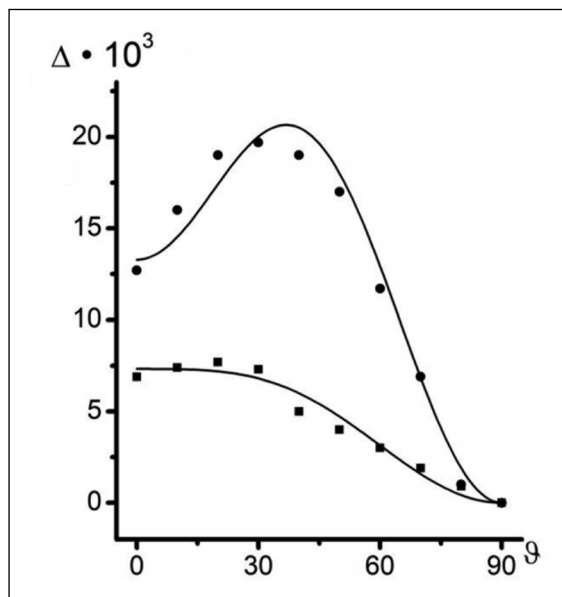


Рис. 1. Анизотропия скорости ультразвука в МРЖ

На этом рисунке сплошные линии соответствуют теоретическим результатам, экспериментальные результаты обозначены квадратами для магнитного поля 0,1 Тл, а кружками – для магнитного поля 0,5 Тл.

Приведённая выше таблица 1 позволяет восстановить теоретические кривые.

Используя классификацию характерных зависимостей анизотропии скорости ультразвука в магнитных жидкостях [8], можно сделать следующие выводы. При магнитном поле 0,1 Тл анизотропия скорости ультразвука обусловлена только анизотропией магнитоупругих свойств МРЖ. При магнитном поле 0,5 Тл анизотропия скорости ультразвука обусловлена как анизотропией магнитоупругих свойств, так и анизотропией магнитострикционных свойств МРЖ. Важно отметить, что ранее подобное влияние магнитного поля на анизотропию скорости ультразвука было обнаружено в магнитной жидкости [12].

Статья поступила в редакцию 07.08.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Rodriguez-Lopez J. et al. Colloidal stability and magnetic field-induced ordering of magnetorheological fluids studied with a quartz crystal microbalance / Rodriguez-Lopez J., Castro P., Vicente J. de, Johannsmann D., Elvira L., Morillas J.R., Espinosa F.M. de // Sensors. 2015. Vol. 15. No. 12. P. 30443–30456.
- Jiang W. et al. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties / Jiang W., Zhang Y., Xuan S., Guo C., Gong X. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2011. Vol. 323. No. 24. P. 3246–3250.
- Spaggiari A. Properties and applications of magnetorheological fluids // Frattura ed Integrita Strutturale. 2013. Vol. 7. No. 23. P. 48–61.

4. Kumbhar B.K., Patil S.R., Sawant S.M. Synthesis and characterization of magnetorheological (MR) fluids for MR brake application // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015. Vol. 18. Iss. 3. P. 432–438.
5. Bramantya M.A., Motozawa M., Sawada T. Ultrasonic propagation velocity in magnetic and magnetorheological fluids due to an external magnetic field // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2010. Vol. 22. No. 32. P. 324102.
6. Sokolov V., Tolmachev V. Employment of the generalized virtual work principle in ferrohydrodynamics. 2. Magnetic fluid with frozen magnetization // *Magneto hydrodynamics*. 1996. Vol. 32. P. 291–294.
7. Felderhof U., Sokolov V., Eminov P.A. Ferrofluid dynamics, magnetic relaxation, and irreversible thermodynamics // *The Journal of Chemical Physics*. 2010. Vol. 132. No. 18. P. 184907.
8. Соколов В.В., Толмачев В.В. Анизотропия скорости распространения звука в магнитной жидкости // *Акустический журнал*. 1997. Т. 43. № 1. С. 106–109.
9. Sokolov V.V. Wave propagation in magnetic nanofluids (a review) // *Acoustical Physics*. 2010. Vol. 56. Iss. 6. P. 972–988.
10. Jyzefczak A. et al. Acoustic wave in a suspension of magnetic nanoparticle with sodium oleate coating / Józefczak A., Hornowski T., Závěšová V., Skumiel A., Kubovčíková M., Timko M. // *Journal of Nanoparticle Research*. 2014. Vol. 16. No. 3. P. 2271.
11. Schnack D.D. Lectures in magneto hydrodynamics: With an appendix on extended MHD. Berlin-Heidelberg: Springer, 2009. 340 p.
12. Motozawa M., Sawada T. Influence of magnetic field on ultrasonic propagation velocity in magnetic fluids // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2005. Vol. 289. P. 66–69.

REFERENCES

1. Rodriguez-Lypez J., Castro P., Vicente J. de, Johannsmann D., Elvira L., Morillas J.R., Espinosa F.M. de. Colloidal stability and magnetic field-induced ordering of magnetorheological fluids studied with a quartz crystal microbalance. In: *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 12, pp. 30443–30456.
2. Jiang W., Zhang Y., Xuan S., Guo C., Gong X. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, vol. 323, no. 24, pp. 3246–3250.
3. Spaggiari A. Properties and applications of magnetorheological fluids. In: *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2013, vol. 7, no. 23, pp. 48–61.
4. Kumbhar B.K., Patil S.R., Sawant S.M. Synthesis and characterization of magnetorheological (MR) fluids for MR brake application. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, vol. 18, iss. 3, pp. 432–438.
5. Bramantya M.A., Motozawa M., Sawada T. Ultrasonic propagation velocity in magnetic and magnetorheological fluids due to an external magnetic field. In: *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2010, vol. 22, no. 32, pp. 324102.
6. Sokolov V., Tolmachev V. Employment of the generalized virtual work principle in ferrohydrodynamics. 2. Magnetic fluid with frozen magnetization. In: *Magneto hydrodynamics*, 1996, vol. 32, pp. 291–294.
7. Felderhof U., Sokolov V., Eminov P.A. Ferrofluid dynamics, magnetic relaxation, and irreversible thermodynamics. In: *The Journal of Chemical Physics*, 2010, vol. 132, no. 18, pp. 184907.
8. Sokolov V.V., Tolmachev V.V. [Anisotropy of sound propagation velocity in a magnetic fluid]. In: *Akusticheskii zhurnal* [Acoustic Journal], 1997, vol. 43, no. 1, pp. 106–109.

9. Sokolov V.V. Wave propagation in magnetic nanofluids (A review). In: *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, iss. 6, pp. 972–988.
10. Jyzefczak A., Hornowski T., Závıšová V., Skumiel A., Kubovčíková M., Timko M. Acoustic wave in a suspension of magnetic nanoparticle with sodium oleate coating. In: *Journal of Nanoparticle Research*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 2271.
11. Schnack D.D. Lectures in magnetohydrodynamics: With an appendix on extended MHD. Berlin-Heidelberg, Springer Publ., 2009. 340 p.
12. Motozawa M., Sawada T. Influence of magnetic field on ultrasonic propagation velocity in magnetic fluids. In: *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2005, vol. 289, pp. 66–69.

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: v_sokolov@mirea.ru;

Осипов Михаил Иванович – аспирант кафедры высшей математики МИРЭА – Российского технического университета;
e-mail: osipov.m.i@edu.mirea.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Sokolov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of Higher Mathematics, science advisor, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: v_sokolov@mirea.ru;

Mikhail I. Osipov – postgraduate student at the Department of Higher Mathematics, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: osipov.m.i@edu.mirea.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Соколов В.В., Осипов М.И. Анизотропия скорости ультразвука в магнито-реологической жидкости // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2018. № 3. С. 77–82.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-3-77-82

FOR CITATION

Sokolov V.V., Osipov M.I. Ultrasound velocity anisotropy in a magnetorological fluid. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018. no. 3. pp. 77–82.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-3-77-82