

УДК 53.098, 538.955

## **ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВСПЛЕСК КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В МАГНИТНОЙ НАНОЖИДКОСТИ EMG – 605**

**И. Э. Овчинников**

**Московский государственный университет приборостроения и информатики**

Статья получена 16 января 2014 г.

**Аннотация.** Проведен теоретический анализ экспериментальных данных для скорости и коэффициента поглощения ультразвука в магнитной жидкости на основе воды при воздействии однородного постоянного магнитного поля с величиной от нескольких до 120 кА/м. Показано, что всплеск коэффициента поглощения ультразвука можно объяснить при помощи процесса релаксации магнитного поля к своему равновесному значению в магнитной жидкости. Для магнитных полей от 30 кА/м до 120 кА/м подтверждена теоретическая зависимость: параметр магнитоупругости обратно пропорционален дифференциальной магнитной восприимчивости.

**Ключевые слова:** магнитная наножидкость, магнитные наночастицы, магнетит, магнитное поле, ультразвук.

**Abstract:** The theoretical analysis was made on the experimental data for the ultrasonic velocity and absorption coefficient in water-based magnetic nanofluid EMG – 605 when exposed to a homogeneous static magnetic field with a magnitude from a few and up to 120 kA/m. It was shown, that the ultrasonic absorption coefficient splash can be explained by a process of relaxation of the magnetic field to its equilibrium value in a magnetic fluid. For magnetic fields from 30 kA/m and up to 120 kA/m the theoretical dependence is confirmed: the magnetoelasticity parameter is inversely proportional to the differential magnetic susceptibility.

**Keywords:** magnetic nanofluid, magnetic nanoparticles, magnetite, magnetic field, ultrasonics.

## 1. Введение

Магнитные жидкости находят практическое применение в машиностроении для создания уплотнительных устройств, уменьшения трения, гибкой передачи усилий. В радиотехнике они могут представлять интерес для управляемых магнитным полем поглотителей и регуляторов. Приложение постоянного магнитного поля существенным образом влияет на распространение ультразвука в магнитной жидкости. Исследованию данного явления и посвящена настоящая статья. В работе [1] приведена система уравнений, которая описывает магнитную жидкость при учете процесса релаксации магнитного поля к своему равновесному термодинамическому значению. Магнитная жидкость состоит из жидкости-носителя (вода, додекан, керосин и др.), магнитных частиц и небольшой добавки поверхностно-активного вещества. В настоящее время принято, что магнитная наножидкость – это магнитная жидкость, в которой все магнитные частицы являются магнитными наночастицами [2]. В основном, используют магнитные наночастицы из магнетита. На поверхностях данных частиц образуется оболочка из молекул поверхностно-активного вещества, что препятствует слипанию магнитных наночастиц. Благодаря этому, магнитные наножидкости являются устойчивыми и не коагулируют. Толщина оболочки из молекул поверхностно-активного вещества может зависеть и от жидкости-носителя: в основном, магнитные наночастицы покрыты одним слоем ПАВ. Но, в частности, в магнитных наножидкостях на основе воды магнитные наночастицы покрыты двумя слоями ПАВ [2]. Воздействие магнитного поля сильно влияет на движение магнитных наночастиц, но магнитная наножидкость устойчива и является сплошной средой для процесса распространения ультразвука малой амплитуды. Значит, магнитное поле может влиять на упругость магнитной наножидкости, что подтверждено изменением скорости ультразвука в экспериментах [2]. В работе [3] были одновременно измерены скорость и коэффициент поглощения ультразвука в магнитной наножидкости EMG – 605 при воздействии различных величин магнитного поля. Значения

коэффициента поглощения ультразвука при малых величинах магнитного поля и при напряженности магнитного поля около 120 кА/м равны в пределах точности эксперимента. На интервале от 30 до 50 кА/м проявляется всплеск коэффициента поглощения ультразвука: увеличение на 21% (рис. 3 [3]), что довольно много. Целью настоящей работы является объяснение данного всплеска при помощи процесса релаксации магнитного поля к своему равновесному значению.

## 2. Теоретический анализ экспериментальных данных по распространению ультразвука в магнитной наножидкости EMG – 605

В работе [4] было рассмотрено распространение звука в магнитных жидкостях параллельно внешнему однородному стационарному магнитному полю согласно теоретическим положениям о релаксации магнитного поля к своему равновесному значению [1,2]. В [3] получены экспериментальные данные по скорости и коэффициенту поглощения для распространения ультразвука тоже параллельно внешнему однородному стационарному магнитному полю. В [4] распространение ультразвука описывается дисперсионным уравнением для быстрой магнитогидродинамической волны, из которого следует система двух действительных уравнений для двух неизвестных параметра магнитоупругости  $\beta_{||}$  и времени релаксации магнитного поля  $\tau^*$ :

$$u_0^2 + m_0^2 \beta_{||} - \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} = \frac{2(\beta_{||} + 4\pi\rho_0)k\alpha_r\omega}{(k^2 + \alpha_r^2)^2 \rho_0 \tau^*},$$

$$\left( \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} - u_0^2 \right) \frac{\beta_{||} + 4\pi\rho_0}{\rho_0} - 4\pi m_0^2 \beta_{||} = \frac{2k\alpha_r\omega^3 \tau^*}{(k^2 + \alpha_r^2)^2},$$
(1)

где  $\rho_0$  – равновесное значение плотности магнитной жидкости,  $m_0$  – равновесное значение удельной намагниченности магнитной жидкости,  $\omega$  – круговая частота ультразвука,  $k = \omega/u$  – волновое число,  $\alpha_r = \alpha - \alpha_0$ ,  $\alpha$  – коэффициент поглощения ультразвука в магнитной жидкости при воздействии

однородного постоянного магнитного поля,  $\alpha_0$  – коэффициент поглощения ультразвука в магнитной жидкости без воздействия внешнего магнитного поля,  $u$  – скорость ультразвука в магнитной жидкости при воздействии однородного постоянного магнитного поля,  $u_0$  – скорость ультразвука в магнитной жидкости без воздействия внешнего магнитного поля.

Из системы (1) получаются выражения для  $\beta_{||}$  и  $\tau^*$ :

$$\beta_{||} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2)$$

$$\tau^* = \frac{2(\beta_{||} + 4\pi\rho_0)\omega k\alpha_r}{\left[ (k^2 + \alpha_r^2)^2 (u_0^2 + m_0^2\beta_{||}) - \omega^2 (k^2 - \alpha_r^2) \right] \rho_0}, \quad (3)$$

где  $a = \left( \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} - u_0^2 - 4\pi m_0^2 \rho_0 \right) m_0^2$ ,

$$b = \left( \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} - u_0^2 \right) 8\pi m_0^2 \rho_0 - \left( \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} - u_0^2 \right)^2 - \left( \frac{2\omega^2 k\alpha_r}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} \right)^2,$$

$$c = -4\pi\rho_0 \left[ \left( \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} - u_0^2 \right)^2 + \left( \frac{2\omega^2 k\alpha_r}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} \right)^2 \right].$$

Для применения формул (2-3) необходимо выполнение двух строгих неравенств:

$$c_f^2 > \frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\omega^2 (k^2 - \alpha_r^2)}{(k^2 + \alpha_r^2)^2} > v_e^2. \quad (5)$$

где скорость быстрой магнитозвуковой волны в идеальной магнитной жидкости с замороженной намагниченностью равна [2]:

$$c_f = \sqrt{u_0^2 + m_0^2 \beta_{\parallel}}, \quad (6)$$

скорость магнитогидродинамической волны в идеальной магнитной жидкости с равновесной намагниченностью равна [5]:

$$v_e = \sqrt{u_0^2 + \frac{4\pi\beta_{\parallel}\rho_0}{\beta_{\parallel} + 4\pi\rho_0}}, \quad (7)$$

В работе [3] использовалась магнитная жидкость на основе воды EMG – 605, которая является магнитной наножидкостью, т.к. средний диаметр частиц магнетита равен  $d = 10$  нм, а плотность равна  $\rho_0 = 1.18$  г/см<sup>3</sup>. Образец магнитной жидкости находился в измерительной ячейке при температуре 50°С. Результаты в [3] были получены при частоте ультразвука  $\omega = 1.18$  МГц. На рис. 3 [3] находятся 13 экспериментальных точек для скорости и 13 экспериментальных точек для коэффициента поглощения ультразвука в зависимости от 13 значений напряженности магнитного поля, которое изменялось от нескольких до 120 кА/м.

Значение удельной намагниченности вычислялось по формуле [2]

$$m_0 = \frac{\varphi M_s L(\xi)}{\rho_0},$$

где  $\varphi = 0.0357$  – объемная доля магнитных наночастиц [3],  $M_s = 480$  Гс – намагниченность насыщения магнетита,  $L(\xi) = \left( \frac{e^{\xi} + e^{-\xi}}{e^{\xi} - e^{-\xi}} \right) - \xi^{-1}$  – функция Ланжевена,  $\xi = M_s V_p H / k_B T$ ,  $V_p = \pi d^3 / 6$  – средний объем магнитной наночастицы,  $k_B = 1.38 \cdot 10^{16}$  эрг / К° – константа Больцмана,  $T = 323$  К° – температура магнитной наножидкости [3]. Значения напряженности магнитного поля  $H$ , скорости  $u$  и коэффициента поглощения ультразвука  $\alpha$  определялись из рис. 3 [3] для каждой экспериментальной точки.

При проведении расчетов было установлено: если напряженность магнитного поля менее 30 кА/м, то вычисленные значения  $\beta_{\parallel}$  и  $\tau^*$

чувствительно зависят от численных значений скорости звука  $u_0$  и коэффициента поглощения  $\alpha_0$  в магнитной жидкости без воздействия внешнего магнитного поля. Поэтому на рис. 1-4 изображены по два графика: 1) треугольниками и 2) кругами, т.к. в первом случае были применены значения  $u_{01} = 145094.0$  см/с и  $\alpha_{01} = 0.151212$  см<sup>-1</sup>, которые были вычислены из

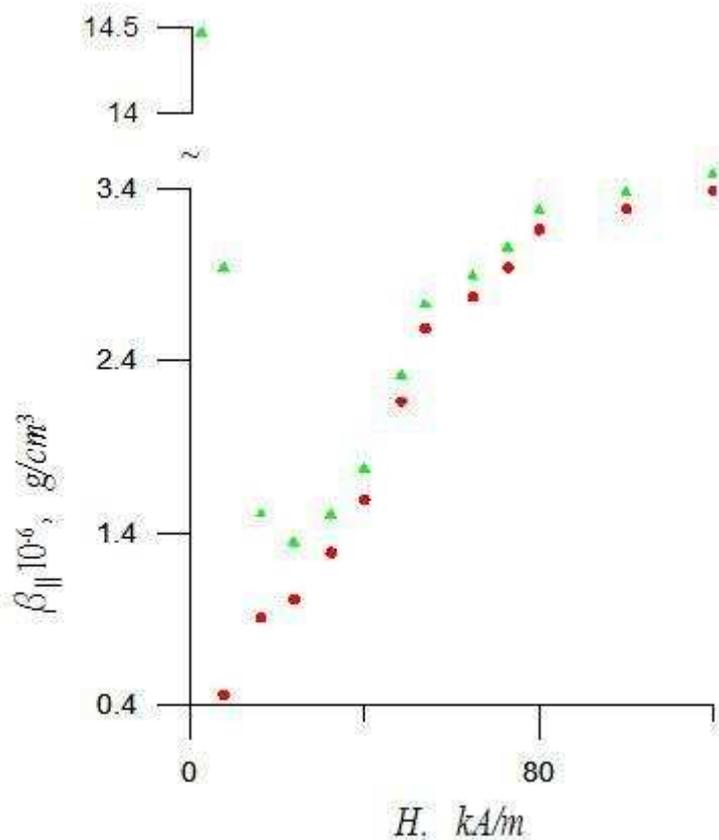


Рис. 1. Зависимость параметра магнитоупругости  $\beta_{||}$  от напряженности магнитного поля по формуле (2) и экспериментальным данным [3].

экспериментальных данных рис. 3 [3] при помощи экстраполяции, а во втором – были равны значениям  $u_{02} = 145150.0$  см/с и  $\alpha_{02} = 0.1515$  см<sup>-1</sup> при самом малом значении напряженности магнитного поля. Поэтому в другом случае получилось 12 значений, т. е. на одну точку меньше на каждом рисунке. Во втором случае (круги) на рис. 1 зависимость  $\beta_{||}$  от напряженности магнитного поля может быть приближенно объяснена при помощи производной функции Ланжевена по напряженности магнитного поля  $H$ . При

напряженностях магнитного поля более 50 кА/м вычисленные значения  $\beta_{||}$  и  $\tau^*$  для двух случаев практически совпадают. Численные расчеты показали, что строгие неравенства (4-7) верны для каждой экспериментальной точки.

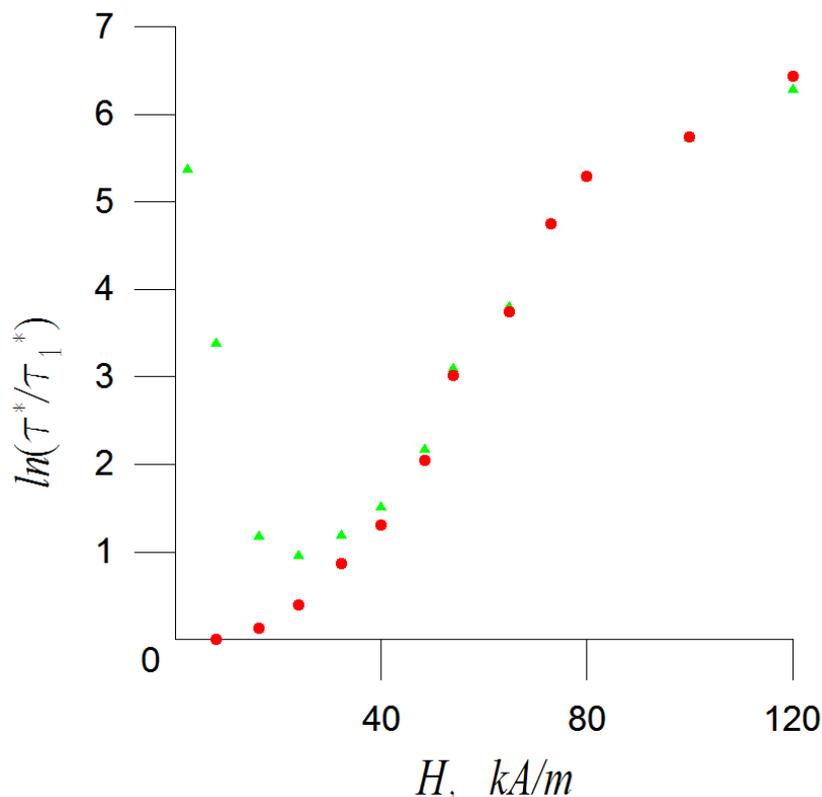


Рис. 2. Зависимость натурального логарифма относительного времени релаксации от напряженности магнитного поля по формуле (3) и экспериментальным данным [3].

На рис. 2 показана зависимость  $\ln(\tau^*/\tau_1^*)$  от напряженности магнитного поля, где  $\tau^*$  – время релаксации для каждого значения напряженности магнитного поля в экспериментах, а  $\tau_1^* = 0.266$  секунды – время релаксации для первой точки (круги), которая является второй экспериментальной точкой. Магнитная наножидкость является сложной системой, поэтому время релаксации магнитного поля к своему равновесному значению может зависеть от многих параметров, и от условий проведения эксперимента. Время релаксации при напряженности магнитного поля 120 кА/м достигает около

двух с половиной минут рис. 2, что приблизительно равно времени установления стабильного сигнала ультразвука при данных значениях магнитного поля. В одной из пионерских работ [6] было показано, что время установления стабильного сигнала ультразвука в магнитной жидкости зависит от величины магнитного поля и может составлять почти минуту. В экспериментах [7] ждали несколько минут установления стабильного сигнала ультразвука. Вполне логично, что если поле намагниченности заморожено в вещество, тогда данные времена могут быть одного порядка.

На рис. 3 показано, что скорость быстрой магнитозвуковой волны в идеальной магнитной жидкости с замороженной намагниченностью (4) превышает экспериментальные значения скорости ультразвука  $u$  для каждой точки. Является интересным, что максимум этого превышения находится около 38-42 кА/м, что близко к максимуму всплеска коэффициента поглощения ультразвука  $\alpha$  в экспериментальных данных на рис. 3 [3].

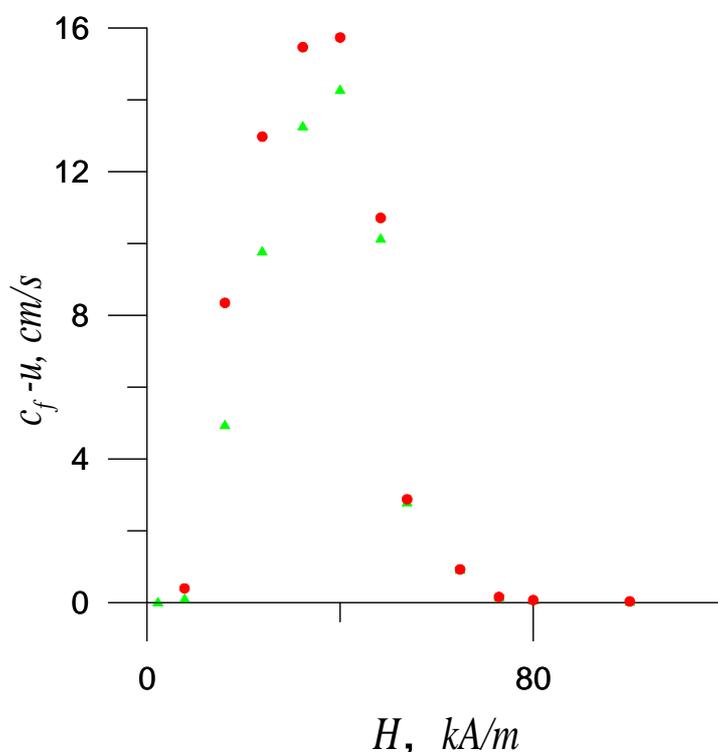


Рис. 3. Зависимость разности между скоростью по формуле (6) и скоростью ультразвука в магнитной жидкости по экспериментальным данным [3] от напряженности магнитного поля.

В работах [2,4,5,8]  $\beta_{\parallel}$  являлся подгоночным параметром при сравнении теоретических расчетов с экспериментальными данными. В работе [8] было показано, что для данного параметра верна теоретическая зависимость  $\beta_{\parallel} \sim 1/\chi_d$ .

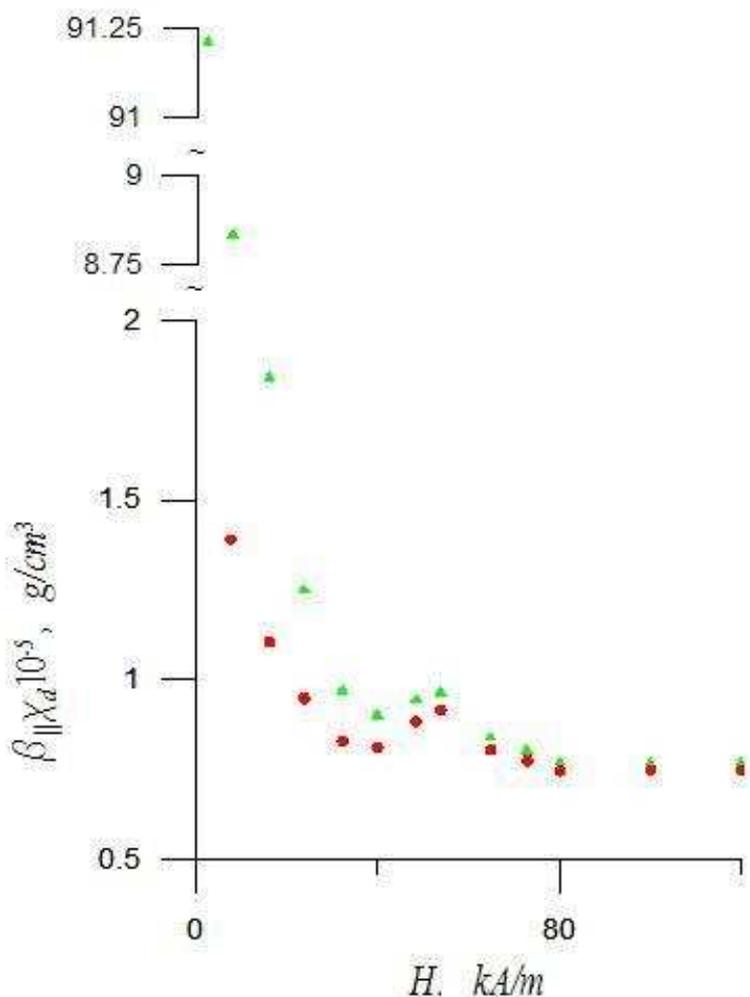


Рис. 4. Зависимость произведения параметра магнитоупругости  $\beta_{\parallel}$  на дифференциальную магнитную восприимчивость  $\chi_d$  от напряженности магнитного поля по формуле (2) и экспериментальным данным [3,9].

На рис. 4 показана зависимость произведения параметра магнитоупругости на дифференциальную магнитную восприимчивость  $\beta_{\parallel} \chi_d$  от напряженности магнитного поля. Значения  $\beta_{\parallel}$  взяты из рис. 1. Экспериментальные значения дифференциальной магнитной восприимчивости

$\chi_d = \partial M / \partial H$  были взяты из рис. 1 [9]. Эта величина изменяется в диапазоне: для первой точки на рис. 3 [3] при самом малом значении магнитного поля  $\chi_d = 0.63$ , а при напряженности магнитного поля 120 кА/м  $\chi_d = 0.022$ . Результаты в [9] были получены для этой же магнитной наножидкости EMG – 605 при другой частоте ультразвука 3.6 МГц, но зависимость от величины магнитного поля может быть одинаковой для разных частот. На рис. 4 очевидно, что произведение  $\beta_{\parallel} \chi_d$  становится практически постоянным при значениях напряженности магнитного поля от 30 кА/м до 120 кА/м. Данный результат подтверждает теоретическую зависимость  $\beta_{\parallel} \sim 1/\chi_d$ .

### 3. Выводы

Итак, в настоящей статье показано, что теоретические положения работ [1,2] позволяют объяснить всплеск коэффициента поглощения ультразвука в магнитной наножидкости EMG – 605 при помощи процесса релаксации магнитного поля к своему равновесному значению. На интервале для напряженности магнитного поля от 30 кА/м до 120 кА/м с хорошей точностью вычисляется теоретический параметр магнитоупругости  $\beta_{\parallel}$ . При значениях напряженности магнитного поля менее 30 кА/м наблюдается некоторая двойственность при определении данного параметра. Данные вопросы могут быть исследованы в новых экспериментах по воздействию магнитного поля на магнитные наножидкости.

### Литература

- [1] V.V. Sokolov, V.V. Tolmachev, “Propagation of Shear Waves in a Magnetic Liquid with Frozen-in Magnetization”, // Tech. Phys. Lett. 1997. Vol. 23, No. 1 p. 5-6. DOI: [10.1134/1.1261628](https://doi.org/10.1134/1.1261628)
- [2] V.V. Sokolov, “Wave Propagation in Magnetic Nanofluids (A Reiew)”, // Acoustical Physics. 2010. Vol. 56. No. 6. p. 972-988. DOI : [10.1134/S1063771010060229](https://doi.org/10.1134/S1063771010060229)

- [3] T. Hornowski, “Ultrasonic Properties of EMG-605 Magnetic Liquid”, // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5828. p. 205-212. <http://dx.doi.org/10.1117/12.612810>
- [4] И.Э. Овчинников. Влияние постоянного магнитного поля на распространение ультразвука в магнитных жидкостях. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. N1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/12/text.pdf>
- [5] I.E. Ovchinnikov, V.V. Sokolov, “Waves in Magnetic Fluids with Equilibrium and Frozen-In Magnetizations”, // Acoustical Physics, 2013. Vol. 59, No. 1, p. 51-55. DOI: [10.1134/S1063771012060115](https://doi.org/10.1134/S1063771012060115)
- [6] A.V. Narasimham, “Direct Observation of Ultrasonic Relaxation Times in Ferrofluids under the Action of a Magnetic Field”, // Indian J. Pure & Appl. Phys. 1981. Vol. 19. No. 11. p. 1094-1097.
- [7] M. Motozawa, Y. Matsumoto and T. Sawada, “Properties of Ultrasonic Propagation in Functional Fluids under Magnetic Fields”, // Int. J. Modern Phys. B 2007. Vol. 21. Nos. 28-29. p. 4914-4921.
- [8] V.V. Sokolov, V.V. Tolmachev, Anisotropy of Sound Propagation in a Magnetic Fluid // Acoustical Physics. 1997. Vol.43. No. 1. p.92-95.
- [9] A. Skumiel, A. Jozefczak, T. Hornowski, M. Kaczmarek, “The Effect of the Concentration of Ferroparticles in a Magnetic Fluid on its Acoustic and Magnetic Properties”, // Molecular and Quantum Acoustics. 2002. Vol. 23. p. 389-396.