

УДК 537.63
PACS 75.50.Mm, 75.78.-n

Изменение релаксационных спектров магнитной жидкости в подмагничивающем поле

А. В. Лебедев

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Королева, 1
email: lav@icmm.ru

Измерена динамическая восприимчивость магнитной жидкости в зависимости от внешнего постоянного поля. В экспериментах использовался образец жидкости с высоким уровнем межчастичных взаимодействий, полученный путем центрифугирования. Величина внешнего подмагничивающего поля менялась в пределах от 0 до 25 кА/м. Динамическая восприимчивость измерялась мостом взаимной индуктивности в диапазоне зондирующих частот от 4.11 Гц до 81 кГц для пяти различных температур: -25 , 0 , 25 , 50 , 75°C . На диаграммах Коул–Коула полученные результаты имеют вид плавных дуг, смыкающихся в области высоких частот. При этом полученное экстраполяцией значение высокочастотной восприимчивости не зависит от температуры. С ростом поля уменьшаются как ширина дебаевской дуги на диаграмме Коул–Коула, так и высокочастотная компонента восприимчивости. При этом ширина дуги убывает быстрее. Таким образом, наблюдается парадоксальное противоречие между зависимостью высокочастотной восприимчивости от поля и ее постоянством с температурой.

Ключевые слова: магнитная жидкость; центрифугирование; подмагничивающее поле; динамическая восприимчивость; диаграмма Коул–Коула

Поступила в редакцию 30.04.2019; принята к опубликованию 23.05.2019

Changes in the relaxation spectra of a magnetic fluid in a magnetizing field

A. V. Lebedev

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
614013, Korolev St. 1, Perm
email: lav@icmm.ru

The dynamic susceptibility of a magnetic fluid was measured as a function of an external constant field. In the experiments, a sample of a liquid with a high level of interparticle interactions, obtained by centrifugation, was used. The magnitude of the external magnetic field varied from 0 to 25 kA/m. Dynamic susceptibility was measured by a mutual inductance bridge in the range of probe frequencies from 4.11 Hz to 81 kHz for five different temperatures: -25 , 0 , 25 , 50 , 75°C . On the Cole-Cole diagrams, the results obtained have the form of smooth arcs intertwining in the high-frequency region. In this case, the extrapolation value of the high-frequency susceptibility does not depend on temperature. As the field grows, both the width of the Debye arc in the Kolu-Cole diagram and the high-frequency component of susceptibility decrease. But, the width of the arc de-

creases faster. Thus, there is a paradoxical contradiction between the dependence of the high-frequency susceptibility on the field and its constancy with temperature.

Keywords: magnetic fluid; centrifuging; magnetizing field; dynamic susceptibility; Cole-Cole diagram

Received 30.04.2019; accepted 23.05.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-08-15

1. Введение

Магнитные жидкости (коллоидные растворы однодоменных частиц магнетиков нанометрового размера), синтезированные в начале 60-х гг. прошлого столетия, являются примером неупорядоченных дипольных систем с сильным межчастичным взаимодействием [1, 2]. Дипольное взаимодействие частиц значительно (в несколько раз) увеличивает статическую восприимчивость магнитных жидкостей [3, 4]. Вопрос о степени влияния межчастичных взаимодействий на динамическую восприимчивость остается до конца невыясненным и в настоящее время. Из наших ранних работ [5, 6] следует вывод о том, что межчастичные взаимодействия можно учесть опосредованно через начальную статическую восприимчивость жидкости. В дальнейшем делались неоднократные теоретические попытки учесть влияние дипольного взаимодействия на динамическую восприимчивость (например, [7–13]), но полученные результаты нуждаются в экспериментальной проверке.

Особенностью предлагаемой работы является использование постоянного подмагничивающего поля, которое существенно влияет на спектры времен релаксации намагниченности и уровень межчастичных взаимодействий в магнитной жидкости. Измерения выполнялись на концентрированном образце тяжелой фракции, полученным путем центрифугирования жидкости с аномально широким распределением частиц по размерам. Выполнено пять серий опытов, отличающихся температурой.

2. Межчастичные взаимодействия и намагниченность феррожидкости

Сильное влияние магнитодипольных межчастичных взаимодействий на равновесную намагниченность феррожидкости является общеизвестным фактом. В последнее время для описания равновесной намагниченности часто используется модифицированная модель эффективного поля, предложенная в упрощенном варианте в [14] (ММЭП1) и уточненная в [15–17] (ММЭП2). Эта модель хорошо согласуется с экспериментальными и расчетными данными по равновесной намагниченности в широком диапазоне температур и концентраций магнитной фазы [17]. Исключение со-

ставляют только магнитные жидкости с очень высокой (порядка 10^2) начальной магнитной восприимчивостью [4]. В этом случае ММЭП2 предсказывает заниженные значения восприимчивости. Согласно ММЭП2 начальная восприимчивость χ магнитной жидкости с учетом межчастичных взаимодействий может быть представлена в виде разложения в ряд по ланжевеновской восприимчивости χ_L , т.е. восприимчивости, вычисленной для системы невзаимодействующих диполей:

$$\chi = \chi_L \left(1 + \frac{\chi_L}{3} + \frac{\chi_L^2}{144} \right), \quad (1)$$

$$\chi_L = \frac{\mu_0 \langle m^2 \rangle n}{3kT},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $m = \pi M_s x^3 / 6$ – магнитный момент частицы, n – числовая плотность частиц, M_s , x – намагниченность насыщения магнитного ядра частицы и его диаметр, соответственно.

Несомненным достоинством ММЭП является возможность корректного учета полидисперсности частиц. В формуле (1) этот учет сводится к замене квадрата магнитного момента частицы m^2 на его среднее по ансамблю значение $\langle m^2 \rangle$.

Уровень межчастичных взаимодействий в магнитных жидкостях обычно характеризуется с помощью параметра λ – отношения энергии взаимодействия двух сблизившихся частиц к энергии теплового движения. В случае монодисперсной жидкости ланжевеновская восприимчивость χ_L , параметр взаимодействия λ и объемная доля частиц φ связаны между собой:

$$\chi_L = 8\lambda\varphi, \quad \varphi = \frac{\pi d^3 n}{6}, \quad \lambda = \frac{\mu_0 m^2}{4\pi d^3 kT}. \quad (2)$$

Здесь d – гидродинамический диаметр частицы, включающий в себя диаметр твердого ядра и удвоенную толщину защитной оболочки. В реальных магнитных жидкостях наблюдается, как правило, широкое распределение частиц по размерам, делающее невозможным однозначное определение параметра λ . Его численное значение зависит от решаемой задачи и способа усреднения по ансамблю [18–20]. С ланжевеновской восприимчивостью (1) и объемной концентрацией частиц таких проблем нет. По этой причине соотношения (2) можно рассматривать как определяющие уравне-

ния для оценки параметра λ в полидисперсной системе.

Магнитные жидкости с высоким уровнем межчастичных взаимодействий представляют большой интерес как системы, в которых специфические магнитодипольные взаимодействия могут привести к качественно новым эффектам. Речь идет, в первую очередь, о многократно наблюдаемых в лабораторном эксперименте фазовых переходах первого рода [21–25] и переходах второго рода, наблюдаемых в численном эксперименте, или предсказываемых некоторыми аналитическими моделями [26–31]. Как видно из формулы (1), наиболее эффективным способом повышения начальной магнитной восприимчивости коллоидного раствора является увеличение среднего квадрата магнитного момента $\langle m^2 \rangle$ за счет увеличения среднего диаметра частиц или относительной ширины распределения частиц по размерам.

В случае переменного внешнего поля изменение намагниченности отстает по фазе, и восприимчивость магнитной жидкости описывается комплексным числом. Теория релаксации намагниченности магнитной жидкости в рамках модели невзаимодействующих частиц известна давно. Так, согласно [32], восприимчивость магнитной жидкости вдоль подмагничивающего поля описывается формулами Дебая:

$$\chi_1 = \frac{\chi_0}{1 + \omega^2 \tau_{\parallel}^2},$$

$$\chi_2 = \frac{\chi_0 \omega \tau_{\parallel}}{1 + \omega^2 \tau_{\parallel}^2},$$

где χ_0 – статическая восприимчивость в постоянном поле:

$$\chi_0 = \mu_0 \frac{\mu^2 n}{kT} \frac{dL(\xi)}{d\xi} = 3\chi_L \frac{dL(\xi)}{d\xi},$$

τ_{\parallel} – время релаксации, зависящее от напряженности поля (V – объем частицы или кластера):

$$\tau_{\parallel} = \frac{3\eta V}{kT} \frac{\xi}{L(\xi)} \frac{dL(\xi)}{d\xi},$$

В пределе слабых полей (при малых значениях параметров Ланжевена $\xi = \mu_0 mH / kT \ll 1$)

$\tau_{\parallel} = 3\eta V / kT = \tau_B$. В другом пределе (при больших параметрах Ланжевена $\xi = \mu_0 mH / kT \gg 1$) время релаксации убывает обратно пропорционально напряженности поля. Это означает, что модуль динамической восприимчивости магнитной жидкости $\chi = (\chi_1^2 + \chi_2^2)^{1/2}$, помещенной в поле, и ее фаза $\varphi = \arctg \chi_2 / \chi_1 = \omega \tau_{\parallel}$ являются монотонно убывающими функциями напряженности внешнего магнитного поля. А все отличия от монотонно-

сти, очевидно, следует связывать с влиянием межчастичных взаимодействий.

3. Синтез образца феррожидкости

Нами использовалась магнитная жидкость на основе авиационного керосина, олеиновой кислоты в качестве стабилизатора и высокодисперсного магнетита с широкой функцией распределения частиц по размерам. Дисперсную фазу (магнетит) получали методом химической конденсации по реакции, предложенной Элмором. Следуя [33], желаемое распределение частиц по размерам получали вариацией условий синтеза (концентрации используемых растворов солей железа и аммиака, pH среды, температуры и скорости подачи растворов и интенсивности перемешивания). Полученный коллоидный раствор разбавлялся до гидродинамической концентрации частиц около 6 % и дважды обрабатывался на центрифуге, снабженной четырьмя нестандартными кюветами объемом 20 мл каждая. Частицы, выпавшие в осадок, отделялись. В результате центрифугирования были выделены легкая и тяжелая фракции с разной концентрацией и дисперсным составом частиц.

Основные параметры синтезированных образцов феррожидкости

Параметр	Исходная МЖ	Лёгкая фракция	Тяжёлая фракция
T, C	10	12.5	12.5
χ_0	1.207	0.743	4.86
M_{∞} , kA/m	8.40	7.39	13.34
n , 10^{22}m^{-3}	3.69	3.85	5.79
$\langle m \rangle$, 10^{-19}Am^2	2.28	1.92	2.31
$\langle m^2 \rangle$, $10^{-37} \text{A}^2 \text{m}^4$	2.32	1.50	4.16
$\langle x \rangle$, nm	7.74	7.46	6.94
δ_x	0.52	0.49	0.56
λ	1.66	1.17	3.14

Дисперсный состав частиц определялся из магнито-гранулометрического анализа по методике [34], позволяющей вполне корректно определить числовую плотность коллоидных частиц, средний магнитный момент и средний квадрат магнитного момента частиц. Дисперсный состав частиц описывался гамма-распределением в предположении, что форма частиц не сильно отличается от сферической. Основные параметры (температура, при которой измерялась кривая намагничивания, начальная восприимчивость χ_0 , намагниченность насыщения M_{∞} , числовая концентрация частиц n , средний магнитный момент $\langle m \rangle$, средний квадрат магнитного момента $\langle m^2 \rangle$, средний диаметр $\langle x \rangle$ магнитного ядра частицы и относительная ширина

распределения частиц по размерам δ_x) представлены в таблице. Последним приведен параметр диполь-дипольного взаимодействия λ , который рассчитывался с помощью соотношений (2) по известным значениям ланжевеновской восприимчивости и гидродинамической концентрации частиц.

Из сравнения данных, приведенных в таблице, видно, что тяжёлая фракция содержит значительную долю крупных частиц. Об этом говорит и большая дисперсия магнитных моментов, и величина параметра дипольного взаимодействия. Исследованию динамической восприимчивости именно этого образца было уделено основное внимание.

4. Методика измерений

Измерения динамической восприимчивости выполнялись мостом взаимной индуктивности, снабжённого системой термостатирования. Конструкция моста, подробно описанного в работе [35], была существенно модернизирована. Во-первых, для повышения точности измерений регистрация выходных сигналов моста производилась с помощью двухканального синхронного усилителя ElockIn 203 (Anfates). Указанный прибор одновременно измерял амплитуды и фазы разностного сигнала (пропорционального восприимчивости жидкости) и сигнала с компенсационной катушки, пропорционального амплитуде поля. Использование двухканального синхронного усилителя в разы увеличивает точность измерений и более чем на порядок сокращает время измерений. Для задания необходимой температуры система измерительных катушек помещалась внутрь теплообменника, который, в свою очередь, располагался внутри мощного соленоида, питаемого от стабилизированного источника постоянного тока. На рис. 1 представлено схематическое изображение экспериментальной установки.

Из выделенной центрифугированием тяжёлой фракции был приготовлен образец с концентрацией частиц, близкой к максимальной, но еще сохраняющий текучесть. Начальная восприимчивость образца при комнатной температуре (25°C) равнялась 15.5 при частоте измерений 4.11 Гц. При этом еще наблюдалась заметная дисперсия восприимчивости – фазовый угол намагничённости заметно отличался от нуля (27.7°). У образца была измерена линейная динамическая восприимчивость в диапазоне частот 4.11 Гц – 81 кГц при фиксированных температурах $-25, 0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$. Измерения линейной восприимчивости выполнялись при амплитуде зондирующего поля 150 А/м. При этом для каждого набора «частота+температура» производилась прогонка по напряженности подмагничивающего (внешнего постоянного) поля. Было выбрано 14 фиксированных значений поля,

расположенных таким образом, чтобы восприимчивость в соседних точках отличалась не более чем в полтора раза.

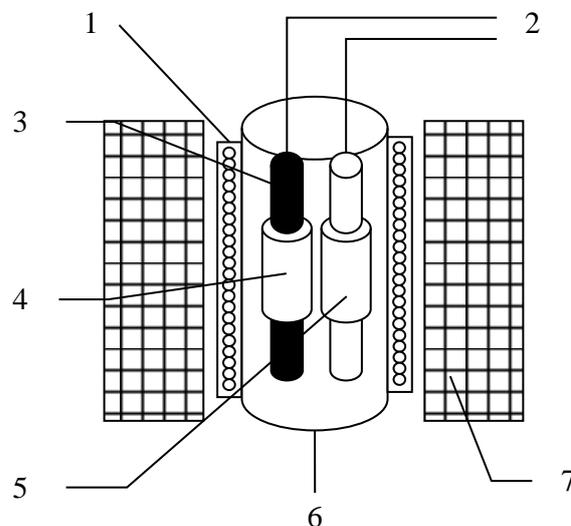


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор сигналов с усилителем, 2 – синхронный усилитель, 3 – ампула с магнитной жидкостью, 4 – измерительная катушка, 5 – компенсационная катушка, 6 – струйный термостат, 7 – намагничивающий соленоид

5. Результаты измерений и их анализ

Наиболее наглядно полученные результаты по динамической восприимчивости могут быть представлены на диаграммах Коул–Коула. Согласно этому методу каждое полученное значение динамической восприимчивости отображается точкой на плоскости с координатами (χ_1, χ_2) . В целом диаграмма Коул–Коула отражает взаимное изменение компонент динамической восприимчивости с ростом частоты. В частности, в этом представлении классическая дебаевская кривая имеет вид полукруга.

На рис. 2 приведено семейство диаграмм Коул–Коула в нулевом внешнем поле при различных температурах. Диаграммы имеют вид плавных дуг, смыкающихся в области высоких частот. Качественно они похожи на кривые Дебая, но с небольшими отличиями. Во-первых, очевидно в силу полидисперсности жидкости, их форма отличается от полукруга. Во-вторых, экстраполяция высокочастотных частей кривых пересекает ось абсцисс в одной точке, существенно отличной от нуля. Таким образом, имеется не зависящая от температуры высокочастотная компонента восприимчивости.

На рис. 3 показана высокочастотная часть диаграммы в увеличенном масштабе. Пунктирными

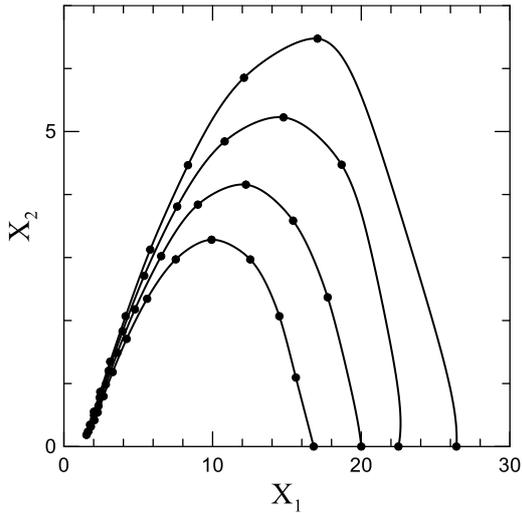


Рис. 2. Диаграммы Коул–Коула динамической восприимчивости тяжелой фракции для температур 75, 50, 25 и 0 °С в нулевом подмагничивающем поле

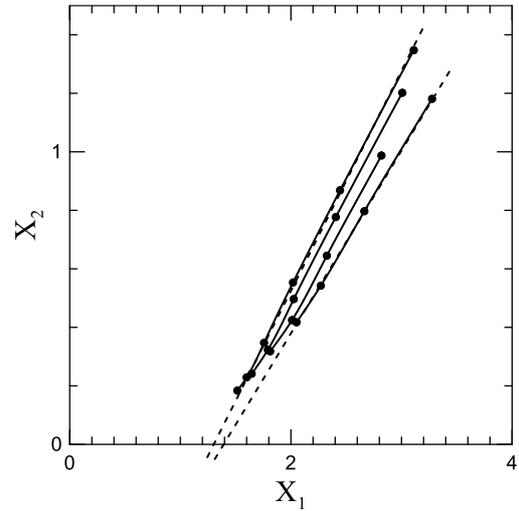


Рис. 3. Высокочастотная часть диаграмм Коул–Коула в увеличенном масштабе. Пунктирные линии - экстраполяция кривых до пересечения с осью абсцисс

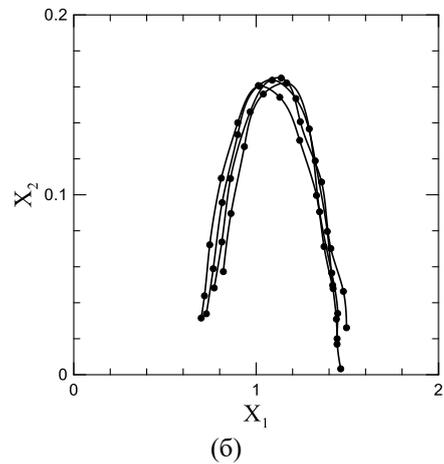
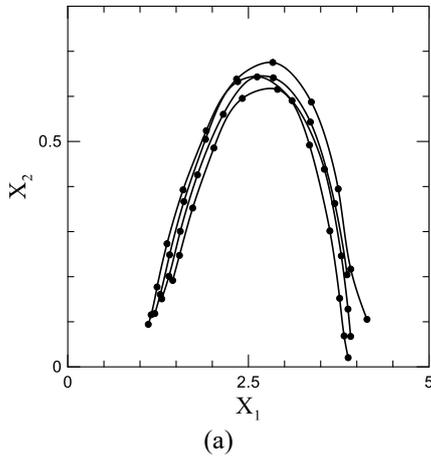


Рис. 4. Диаграммы Коул–Коула для динамической восприимчивости образца в поле 2 кА/м (а) и 5 кА/м (б)

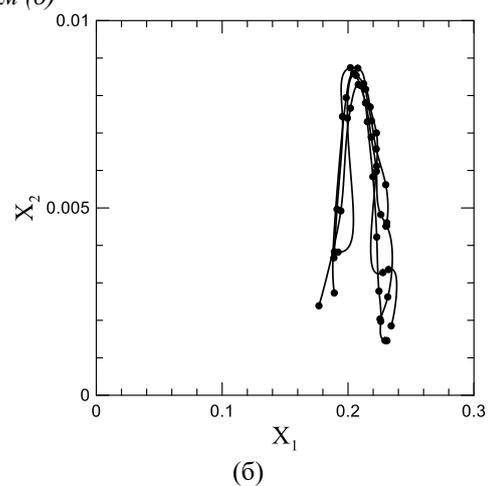
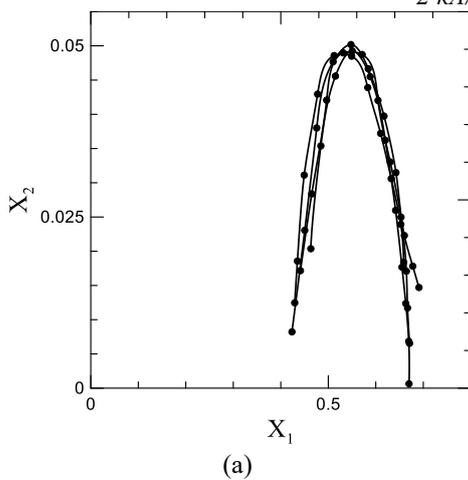


Рис. 5. Диаграммы Коул–Коула для динамической восприимчивости образца в поле 10 кА/м (а) и 24 кА/м (б)

линиями отображена экстраполяция диаграмм до пересечения с осью абсцисс. Линии сходятся практически в одной точке.

При включении внешнего подмагничивающего поля компоненты динамической восприимчивости уменьшаются. Причем компоненты дебаевской ча-

сти диаграммы убывают быстрее по сравнению с высокочастотной компонентой восприимчивости. Трансформация диаграмм Коул–Коула с ростом подмагничивающего поля отображена на серии рисунков 4–5. На последнем рисунке (величина поля 24 кА/м) дебаевская часть восприимчивости практически вырождается в вертикальный отрезок. При этом величина высокочастотной части динамической восприимчивости существенно превышает компоненты дебаевской части.

6. Заключение

Таким образом, выполнены измерения динамической восприимчивости образца магнитной жидкости с сильным межчастичным взаимодействием в постоянном подмагничивающем поле в широком диапазоне частот и температур. В представлении диаграмм Коул–Коула частотные зависимости восприимчивости могут быть условно разделены на высокочастотную и дебаевскую части. Тогда как компоненты дебаевской восприимчивости существенно меняются с температурой, высокочастотная восприимчивость от нее практически не зависит. Однако при включении подмагничивающего поля высокочастотная часть восприимчивости убывает, хотя и медленнее, чем дебаевская. Очевидно, для разрешения наблюдаемого противоречия требуется дальнейшее развитие теории, описывающей процессы релаксации намагниченности однодоменных частиц магнетиков.

Список литературы

1. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. 1974. Т. 112. Вып. 3. С.435–458.
2. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989.
3. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic fluids // Journal of Chemical Physics. 2004. V. 121. P. 5455–5467.
4. Лебедев А. В. Дипольное взаимодействие частиц в магнитных жидкостях // Коллоидный журнал. 2014. Т. 76. Вып. 3. С. 363–371.
5. Пшеничников А. Ф., Лебедев А. В. Динамическая восприимчивость магнитных жидкостей // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1989. Т. 95. Вып. 3. С. 869–876.
6. Лебедев А. В. Концентрационная зависимость динамической восприимчивости магнитных жидкостей // Известия АН СССР. Серия: физическая. 1991. Т. 55. Вып. 6. С. 1070–1072.
7. Zubarev A. Yu., Юшков А. В. Динамические свойства умеренно концентрированных магнитных жидкостей // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1998. Т. 87. Вып. 3. С.484–493.
8. Raikher Yu. L., Stepanov V. I. Nonlinear susceptibilities of superparamagnetic fine particles // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1999. Vol. 196–197. P. 88–90.
9. Zubarev A. Y. Nonlinear susceptibility and stochastic resonance in solid ferrocolloids // Colloid journal. 1999. Т. 61. №. 4. С. 467–474.
10. Felderhof B. U., Jones R. B. Mean field theory of the nonlinear response of an interacting dipolar system with rotational diffusion to an oscillating field // Journal of Physics: Condensed Matter. 2003. V.ol 15 (23). P. 4011–4024.
11. Ilg P., Hess S. Nonequilibrium dynamics and magnetoviscosity of moderately concentrated magnetic liquids: a dynamic mean-field study // Zeitschrift fur Naturforschung. 2003. Vol. 58(11). P. 589–600.
12. Dejardin P. M., Ladieu F. Nonlinear susceptibilities of interacting polar molecules in the self-consistent field approximation // The Journal of Chemical Physics. 2014. Vol. 140(3). P. 034506.
13. Бурнышев Ю. В., Пшеничников А. Ф., Розенберг Ю. И., Гилев В. Г. Динамика намагничивания и реология ферроколлоидов при низких температурах // Известия АН СССР. Серия: физическая. 1991. Т. 55. № 6. С.1064–1069.
14. Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. Magneto-granulometric analysis of concentrated ferrocolloids // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1996. Vol. 161. P. 94–102.
15. Ivanov A. O., Kuznetsova O. B. Magnetic properties of dense ferrofluids: an influence of interparticle correlations // Physical Review E. 2001. Vol. 64, 414051.
16. Иванов А. О., Кузнецова О. Б. Магнитогранулометрический анализ ферроколлоидов: модифицированная модель среднего поля второго порядка // Коллоидный журнал. 2006. Т.68. С. 472–484.
17. Ivanov A. O., Kantorovich S. S., Reznikov E. N., Holm C., Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V., Chremos A., Camp P. J. Magnetic properties of polydisperse ferrofluids: A critical comparison between experiment, theory, and computer simulation // Physical Review E. 2007. Vol. 75, 061405.
18. Ivanov A. O., Elfimova E. A. “Low-temperature magnetic susceptibility of concentrated ferrofluids: The influence of polydispersity // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 374 P. 327.
19. Pshenichnikov A. F., Shurubor I. Yu. Effect of temperature on the separation of polydisperse magnetic fluids // Magnetohydrodynamics. 1998. Vol. 24 (4). P. 417–420.
20. Ivanov A. S. Temperature dependence of the magneto-controllable first-order phase transition in dilute magnetic fluids // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 441. P. 620–627.

21. Hayes C. F. Observation of association in a ferro-magnetic colloid // *Journal Colloid and Interface Sciences*. 1975. Vol. 52, P. 239.
22. Peterson S. A., Krueger A. A. Reversible, field induced agglomeration in magnetic colloids // *Journal Colloid and Interface Sciences*. 1977. Vol. 62, P. 24.
23. Pshenichnikov A. F., Shurubor I. Yu. Stratification of magnetic fluids: conditions of formation and magnetic properties of drop-like aggregates // *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* 1987. Vol. 51, P. 40.
24. Bacri J.-C., Perzynski R., Salin D., Cabuil V., Massart R. Phase diagram of an ionic magnetic colloid: Experimental study of the effect of ionic strength // *Journal Colloid and Interface Sciences*. 1989. Vol. 132, P. 43.
25. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Vortex flows induced by drop-like aggregate drift in magnetic fluids // *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26, 012002.
26. Wei D., Patey G. N. Orientational order in simple dipolar liquids: computer simulation of a ferroelectric nematic phase // *Physical Review Letters*. 1992. Vol. 68, 2043.
27. Weis J.-J., Levesque D., Zarragoicoechea G. J. Orientational order in simple dipolar liquid-crystal models // *Physical Review Letters*. 1992. Vol. 69, P. 913.
28. Groh B., Dietrich S. Inhomogeneous magnetization in dipolar ferromagnetic liquids // *Physical Review E*. 1998. Vol. 57, 4535.
29. Morozov K. I. Long-range order of dipolar fluids // *The Journal of Chemical Physics*. 2003. Vol. 119. №. 24. С. 13024–13032.
30. Ivanov A. O. Spontaneous ferromagnetic ordering in magnetic fluids // *Physical Review E*. 2003. Vol. 68. N. 1, 011503.
31. Weis J.-J. The ferroelectric transition of dipolar hard spheres // *The Journal of Chemical Physics*. 2005. Vol. 123, 044503.
32. Марценюк М. А., Райхер Ю. Л., Шлиомис М. И. К кинетике намагничивания суспензий ферромагнитных частиц // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1973. Т. 65. Вып. 1. С. 834–840.
33. Gribanov N. M., Bibik E. E., Buzunov O. V., Naumov V. N. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation // *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*. 1990. Vol. 85. P. 7–10.
34. Пшеничников А. Ф., Лебедев А. В., Радионов А. В., Ефремов Д. В. Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях // *Коллоидный журнал*. 2015. Т. 77. С. 207–213.
35. Пшеничников А. Ф. Мост взаимной индуктивности для анализа магнитных жидкостей // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 4. С. 88–93.

References

1. Shliomis M. I. Magnetic fluids. *Soviet Physics Uspekhi*, 1974, vol 17, pp. 153–169.
2. Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
3. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic fluids, *Journal Chemical Physics*, 2004, vol. 121, pp 5455–5467.
4. Lebedev A. V. Dipole interparticle interaction in magnetic fluids, *Colloid Journal*, 2014, vol. 76. N. 3. pp 334–341.
5. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V. Dynamic susceptibility of magnetic liquids, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1989, vol. 68. no. 3, pp 498–502.
6. Lebedev A. V. Concentration dependence of dynamic susceptibility of magnetic fluids, *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical series*, 1991, vol. 55(6), pp 1070–1072, (In Russian).
7. Zubarev A. Yu., Yushkov A. V. Dynamic properties of moderately concentrated magnetic liquids, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1998, vol. 87, no 3, pp 484–493.
8. Raikher Yu. L., Stepanov V. I. Nonlinear susceptibilities of superparamagnetic fine particles, *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, vol. 196–197, pp 88–90.
9. Zubarev A. Y. Nonlinear susceptibility and stochastic resonance in solid ferrocolloids, *Colloid journal of the Russian Academy of Sciences*, 1999, vol. 61, no 4, pp 467–474.
10. Felderhof B. U., Jones R. B. Mean field theory of the nonlinear response of an interacting dipolar system with rotational diffusion to an oscillating field, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2003, vol. 15 (23), pp 4011–4024.
11. Ilg P., Hess S. Nonequilibrium dynamics and magnetoviscosity of moderately concentrated magnetic liquids: a dynamic mean-field study, *Zeitschrift fur Naturforschung*, 2003, vol. 58(11), pp 589–600.
12. Dejardin P. M., Ladieu F. Nonlinear susceptibilities of interacting polar molecules in the self-consistent field approximation, *The Journal of Chemical Physics*, 2014, vol. 140 (3), 034506.
13. Burnyshev Yu. V., Pshenichnikov A.F., Rosenberg Yu. I., Gilyov V. G. Dynamics of magnetization and geology of ferrocolloids at low temperatures, *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical series*, 1991, vol. 55, no 6, pp. 1064–1069.
14. Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. Magneto-granulometric analysis of concentrated ferrocolloids, *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol. 161, pp. 94–102.
15. Ivanov A. O., Kuznetsova O. B. Magnetic properties of dense ferrofluids: an influence of interparti-

- cle correlations, *Physical Review E*, 2001, vol. 64, 414051.
16. Ivanov A. O., Kuznetsova O. B. Magnetogrulometric analysis of ferrocolloids: second-order modified mean field theory, *Colloid Journal*, 2006, vol. 68, no 4, pp 430–440.
 17. Ivanov A. O., Kantorovich S. S., Reznikov E. N., Holm C., Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V., Chremos A., Camp P. J., Magnetic properties of polydisperse ferrofluids: A critical comparison between experiment, theory, and computer simulation, *Physical Review E*, 2007, vol. 75, 061405.
 18. Ivanov A. O., Elfimova E. A., Low-temperature magnetic susceptibility of concentrated ferrofluids: The influence of polydispersity, *Journal on Magnetism and Magnetic Materials* 2015, vol. 374, pp. 327.
 19. Pshenichnikov A. F., Shurubor I. Yu. Effect of temperature on the separation of polydisperse magnetic fluids, *Magneto hydrodynamics*, 1998, vol. 24, no 4, pp 417–420.
 20. Ivanov A. S. Temperature dependence of the magneto-controllable first-order phase transition in dilute magnetic fluids, *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp 620–627.
 21. Hayes C. F. Observation of association in a ferromagnetic colloid, *Journal Colloid and Interface Sciences*, 1975, vol. 52, pp. 239.
 22. Peterson S. A., Krueger A. A. Reversible, field induced agglomeration in magnetic colloids, *Journal Colloid and Interface Science*, 1977, vol. 62, pp. 24.
 23. Pshenichnikov A. F., Shurubor I. Yu. Stratification of magnetic fluids: conditions of formation and magnetic properties of drop-like aggregates, *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical series*. 1987, vol. 51, pp. 40 (In Russian).
 24. Bacri J.-C., Perzynski R., Salin D., Cabuil V., Massart R. Phase diagram of an ionic magnetic colloid: Experimental study of the effect of ionic strength, *Journal Colloid and Interface Sciences*, 1989, vol. 132, pp. 43.
 25. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Vortex flows induced by drop-like aggregate drift in magnetic fluids, *Physics of Fluids*, 2014, vol. 26, 012002.
 26. Wei D., Patey G. N. Orientational order in simple dipolar liquids: computer simulation of a ferroelectric nematic phase, *Physical Review Letters*, 1992, vol. 68, 2043.
 27. Weis J.-J., Levesque D., Zarragoicoechea G. J. Orientational order in simple dipolar liquid-crystal models, *Physical Review Letters*, 1992, vol. 69, 913.
 28. Groh B., Dietrich S. Inhomogeneous magnetization in dipolar ferromagnetic liquids, *Physical Review E*, 1998, vol. 57, pp 4535.
 29. Morozov K. I. Long-range order of dipolar fluids, *The Journal of Chemical Physics*, 2003, vol. 119, no 24, pp 13024–13032.
 30. Ivanov A. O. Spontaneous ferromagnetic ordering in magnetic fluids, *Physical Review E*, 2003, vol. 68(1), 011503.
 31. Weis J.-J. The ferroelectric transition of dipolar hard spheres, *The Journal of Chemical Physics*, 2005, vol. 123, 044503.
 32. Martsenyuk M. A., Raikher Yu. L., Shliomis M. I. On the kinetics of magnetization of suspensions of ferromagnetic particles, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1974, vol. 38, No 2, pp. 413 – 416.
 33. Griбанov N. M., Bibik E. E., Buzunov O. V., Naumov V. N. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation, *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, 1990, vol. 85, pp 7–10.
 34. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V., Radionov A. V., Efremov D. V. A magnetic fluid for operation in strong gradient fields, *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no 2, pp. 196–201, DOI: 10.1134/S1061933X15020155.
 35. Pshenichnikov A. F. A mutual-inductance bridge for analysis of magnetic fluids, *Instruments and Experimental Techniques*, 2007, vol. 50, no 4, pp. 509–514. DOI: 10.1134/S0020441207040136.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лебедев А.В. Изменение релаксационных спектров магнитной жидкости в подмагничивающем поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 2. С. 8–15. doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-08-15

Please cite this article in English as:

Lebedev A.V. Changes in the relaxation spectra of a magnetic fluid in a magnetizing field // Bulletin of Perm University. Physics, 2019, no. 2, pp. 8–15. doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-08-15