

Особенности взаимодействия магнитной жидкости, имеющей микрокапельную структуру, с переменным магнитным полем

© Д.В. Гладких, Ю.И. Диканский

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: Dikansky@mail.ru

(Поступило в Редакцию 11 октября 2005 г.)

Исследована эффективная магнитная восприимчивость магнитной жидкости с микрокапельной структурой. Сделан вывод, что вращение такой среды приводит к особенностям ее намагничивания, обусловленным деформацией микрокапельных агрегатов под воздействием измерительного поля с последующей их переориентацией при вращении. С целью подтверждения сделанного вывода исследованы особенности деформации микрокапельных агрегатов в переменном магнитном поле. Установлено, что пороговое значение напряженности переменного магнитного поля, соответствующее началу деформирования, имеет существенно меньшее значение, чем в случае действия постоянного поля, и зависит от частоты поля.

PACS: 75.50.-y

Введение

Ранее [1–4] было показано, что при описании магнитных свойств магнитных жидкостей (МЖ) необходимо учитывать диполь–дипольное взаимодействие дисперсных частиц и связанное с ним структурное состояние коллоидной системы. Наиболее распространенными структурными образованиями в магнитной жидкости являются микрокапельные агрегаты, представляющие собой капли более концентрированной магнитной жидкости, чем омывающая их среда. Экспериментальному и теоретическому исследованию каплеподобных агрегатов посвящен ряд работ (например, [5–7]). В основном, эти исследования посвящены гидростатике межфазной поверхности микрокапельного агрегата в магнитном поле. В частности, установлена неустойчивость формы эллипсоидального агрегата для некоторых значений его эксцентриситета: с увеличением магнитного поля, при определенном пороговом значении его напряженности, происходит скачкообразное увеличение вытянутости агрегата вдоль поля. При последующем уменьшении поля скачкообразное снижение вытянутости агрегата происходит при меньшем значении пороговой напряженности. Отметим, что в этих работах не ставилось целью изучение влияния микрокапельных агрегатов на магнитные свойства МЖ, кроме того, исследования, как правило, проводились в постоянных магнитных полях. В работах [8–11] было показано, что наличие микрокапельной структуры может оказывать существенное влияние на магнитные свойства МЖ.

В магнитных жидкостях, используемых в технических устройствах при определенных условиях, возможно образование капельных агрегатов. Воздействие постоянных и переменных магнитных полей может приводить к изменению технических характеристик МЖ и, как следствие, оказывать влияние на работоспособность устройства в целом. В настоящей работе изучена деформация

микрокапельных агрегатов в переменных магнитных полях, а также обусловленные ею особенности магнитной восприимчивости как неподвижной, так и вращающейся магнитной жидкости с хорошо развитой микрокапельной структурой.

Методика эксперимента и объект исследования

В качестве объекта исследования использовались МЖ с микрокапельной структурой, полученные путем фазового расслоения первоначально однородной МЖ на основе керосина. Методика получения таких сред подробно описана в [9], они представляют собой множество микрокапель диаметром 2–4 μm , плавающих в слабоконцентрированной компоненте МЖ. При этом объемная концентрация микрокапель может достигать 20–35%, а концентрация дисперсных частиц в каплях на порядок выше, чем в омывающей их среде. Эффективная магнитная восприимчивость определялась с помощью мостового метода, ее численное значение рассчитывалось по формуле $\chi_{\text{eff}} = (L - L_0)/L_0$ (L_0 — индуктивность пустого соленоида, L — индуктивность соленоида, заполненного образцом). Измерительная ячейка состояла из соленоида (длина 150, диаметр 5 mm) с цилиндрическим контейнером для образца (внутренний диаметр 3 mm), который вводился соосно в соленоид и мог вращаться относительно оси, расположенной вдоль соленоида. Чтобы исключить влияние изменения температуры, измерительная обмотка соленоида термостатировалась водой при комнатной температуре. Измерение индуктивности проводилось на частоте 40 Hz измерителем иммитанса LCR-817 с ошибкой, не превышающей 0.05%. При этом амплитудное значение переменного измерительного поля варьировалось от 10 до 150 A/m.

Исследование изменения структуры при воздействии различных факторов осуществлялось с помощью оптического микроскопа. Кроме того, для этой цели использовалось явление дифракционного рассеяния луча лазера, направленного перпендикулярно тонкому слою магнитной жидкости. Для исследования структуры во вращающейся жидкости использовалась кювета, представляющая собой два прозрачных стеклянных диска с образцом между ними, толщина слоя которого определялась толщиной кольцевой прокладки между дисками (50–70 μm). Вращение кюветы с образцом осуществлялось вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости кюветы и проходящей через ее центр.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Первоначально была исследована эффективная восприимчивость МЖ с микрокаплями при ее вращении относительно оси, совпадающей с направлением измерительного поля. Полученная экспериментально зависимость этой характеристики от частоты вращения кюветы при максимально возможной напряженности измерительного поля (150 А/м) приведена на рис. 1 (кривая 1). Как видно из рисунка, уже при малых скоростях вращения происходит уменьшение χ_{eff} , в дальнейшем, с повышением частоты вращения, она практически не изменяется.

Предполагалось, что обнаруженное уменьшение магнитной восприимчивости от частоты вращения контейнера связано с процессами деформации микрокапельных агрегатов при воздействии даже слабого измерительного поля с последующей их переориентацией при вращении

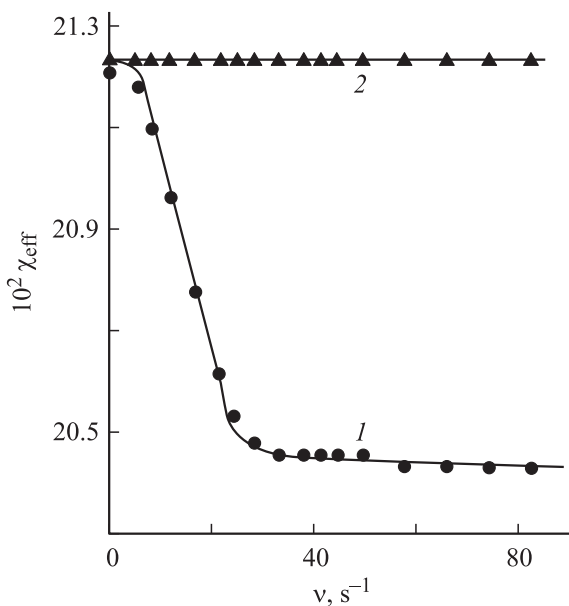


Рис. 1. Зависимость эффективной восприимчивости от частоты вращения образца: 1 — МЖ с микрокапельными агрегатами, 2 — однородная МЖ.

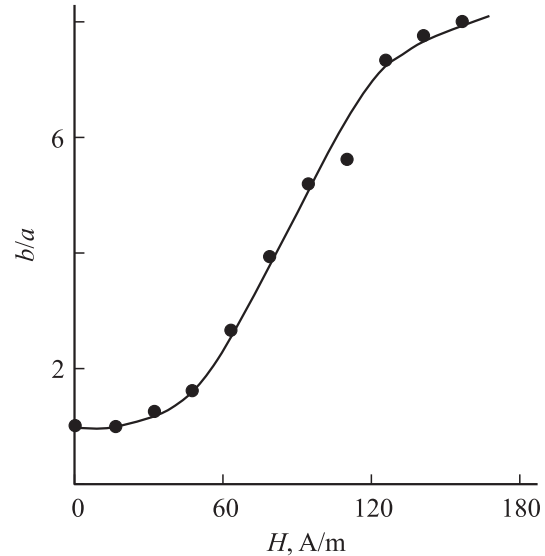


Рис. 2. Зависимость средней величины отношений полуосей агрегата от напряженности переменного поля.

контейнера. Проведенные с помощью оптического микроскопа наблюдения тонких слоев исследуемой неподвижности МЖ показали, что действие переменного магнитного поля с напряженностью, соответствующей значениям напряженности измерительного поля, действительно приводит к деформации (вытягиванию вдоль направления поля) микрокапельных агрегатов. На рис. 2 показана зависимость средней величины отношения полуосей агрегата от напряженности переменного поля, полученная при анализе результатов наблюдений за десятью случайно выбранными микрокаплями в неподвижной жидкости.

Деформация микрокапельных агрегатов под воздействием измерительного поля должна приводить к возрастанию эффективной магнитной восприимчивости неподвижной МЖ с микрокапельной структурой при увеличении напряженности измерительного поля, что действительно наблюдается в эксперименте (рис. 3, кривая 1). Отметим, что для однородной МЖ, не содержащей агрегатов, подобного изменения восприимчивости не наблюдается (рис. 3, кривая 2).

Ранее [7,12] при исследовании особенностей деформации микрокапельных агрегатов в постоянном магнитном поле было установлено, что деформирование агрегата начинается при некотором пороговом значении напряженности поля.

Как следует из рис. 2, в случае действия переменного магнитного поля также существует пороговое значение напряженности, соответствующее началу деформирования, что подтверждается и полученной зависимостью анизотропного рассеяния света от напряженности переменного поля (рис. 4). Оказалось, что пороговое значение напряженности переменного поля имеет существенно меньшее значение, чем в случае действия постоянного поля, и зависит от частоты поля. Анализ

результатов исследования зависимости степени деформации микрокапельного агрегата от напряженности поля при различной его частоте (рис. 5) позволяет сделать вывод, что в исследованном частотном диапазоне увеличение частоты приводит к возрастанию порогового значения H до предельного значения, соответствующего пороговому значению напряженности постоянного поля. Можно предположить, что уменьшение порогового значения напряженности поля в случае переменного поля обусловлено характером его действия — периодичностью „раскачивания“ формы, эффективность которого увеличивается с приближением частоты поля к собственной частоте колебания капли.

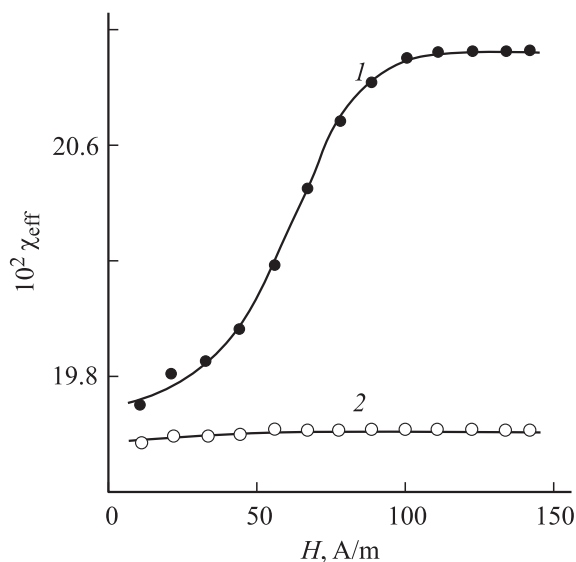


Рис. 3. Зависимость эффективной магнитной восприимчивости МЖ от напряженности измерительного поля.

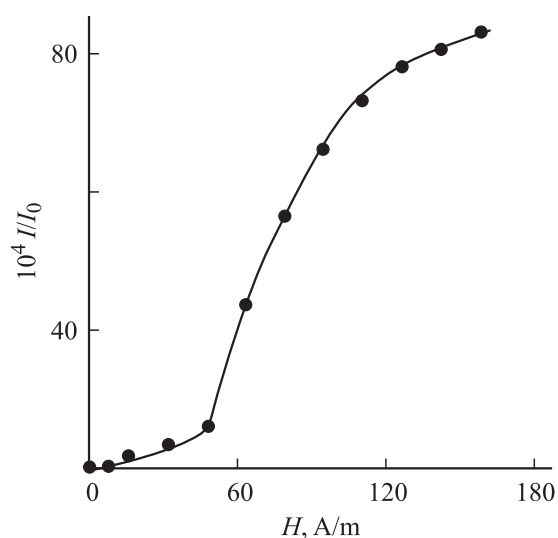


Рис. 4. Зависимость относительной величины интенсивности анизотропного светорассеяния МЖ с микрокапельными агрегатами от напряженности переменного поля.

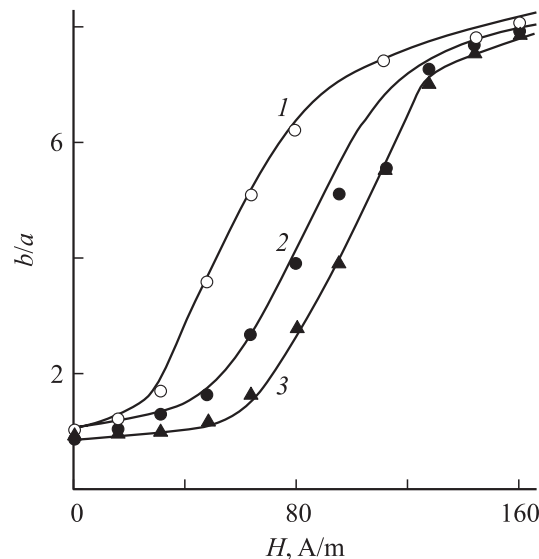


Рис. 5. Зависимость средней величины отношения полуосей агрегата от напряженности переменного поля при его различной частоте: 1 — $f = 5$, 2 — 50, 3 — 100 Hz.

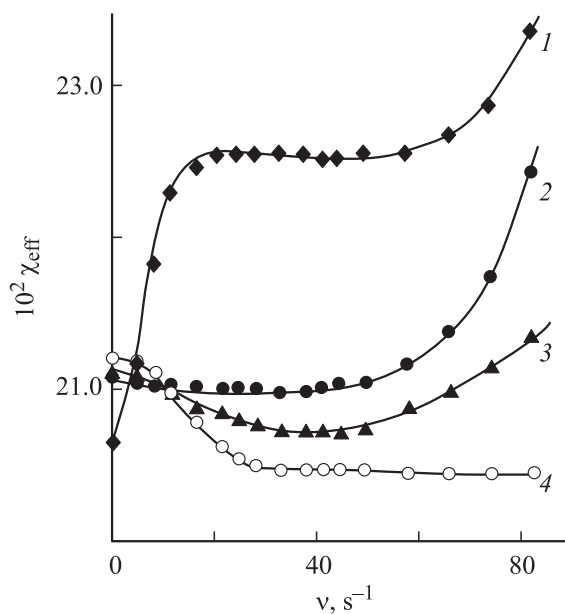


Рис. 6. Зависимость эффективной восприимчивости МЖ с микрокапельной структурой от частоты вращения при различных значениях напряженности измерительного поля: 1 — $H = 24$, 2 — 64, 3 — 89, 4 — 111 A/m.

Очевидно, существование пороговых напряженностей поля, соответствующих началу деформации микрокапель, является причиной разного характера зависимости эффективной магнитной восприимчивости магнитной жидкости от частоты ее вращения при различной величине напряженности измерительного поля (рис. 6). Как следует из рис. 6, уменьшение магнитной восприимчивости от частоты вращения (приведенное также на рис. 1) наблюдается при относительно больших

значениях напряженности измерительного поля. Напротив, при достаточно малых его значениях магнитная восприимчивость может увеличиваться с повышением скорости вращения (кривая 1).

Можно предположить, что вращение жидкости приводит к снижению порогового значения напряженности поля, в результате этого микрокапли, предварительно сохранявшие сферическую форму, деформируются, вытягиваясь вдоль напряженности поля. Это приводит к уменьшению размагничивающего фактора агрегата и, как следствие, к увеличению эффективной магнитной восприимчивости. При напряженности измерительного поля, превышающей ее пороговое значение, капли деформируются еще в отсутствие вращения жидкости. Последующее вращение жидкости приводит к их наклону в направлении радиусов вращения за счет возникшего при вращении неоднородного поля центробежных сил инерции. В этом случае угол между направлением измерительного поля и большей полуосью увеличивается, что и является причиной уменьшения магнитной восприимчивости. Таким образом, уменьшение магнитной восприимчивости, по-видимому, связано с переориентацией вытянутых переменным измерительным полем микрокапельных агрегатов при вращении жидкости.

Действительно, исследования рассеяния лазерного луча, направленного перпендикулярно плоскости кюветы (при действии сонаправленного с лазерным лучом переменного поля соответствующей напряженности), показали появление анизотропного рассеяния при приведении кюветы во вращение. В результате этого светлое пятно, наблюдающееся в месте попадания луча на экран, трансформируется в полосу, ортогональную радиусу вращения кюветы. Это может указывать на поворот (на некоторый угол) вытянутых полем агрегатов к направлениям радиусов кюветы. Подтверждением этого предположения может служить рис. 7, в верхней части которого показаны точки пересечения лазерного луча со стенкой кюветы и соответствующие картины анизотропного рассеяния света на экране (в нижней части рисунка).

Следует отметить, что в случае деформации микрокапельных агрегатов за счет действия постоянного магнитного поля подобной переориентации при вращении не происходит. Это указывает на существование особых условий для переориентации вытянутого агрегата, возникающих только в случае воздействия переменного магнитного поля. Можно предположить, что возможность такой переориентации появляется в момент прохождения изменяющейся по гармоническому закону напряженности поля через нуль. В этом случае вследствие относительно большого времени релаксации формы капли остается вытянутой. Происходящие в это время за счет разного рода флуктуаций небольшие отклонения направления большей оси деформированной капли от вертикали и дают возможность включения механизма дальнейшего поворота капли за счет центробежных сил.

Возможно, что одной из причин таких отклонений может быть магнитное поле Земли, которое, вследствие

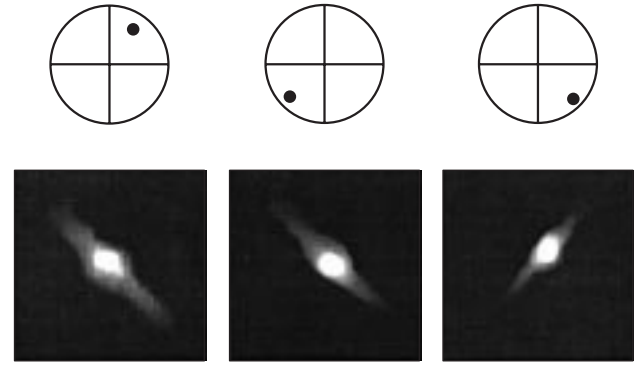


Рис. 7. Рассеяние света на деформированных микрокапельных агрегатах, содержащихся во вращающейся МЖ.

того что его напряженность не превышает критического значения, не способно вызывать деформацию капли, но может приводить к некоторому первоначальному отклонению деформированной переменным полем капли от оси вращения.

Обоснование предполагаемых механизмов обнаруженных эффектов проведем при использовании энергетического подхода. Можно предположить, что поворот деформированного полем агрегата при вращении жидкости обусловлен неоднородным полем центробежных сил инерции. Как известно [13], введение понятия центробежных сил для неинерциальных систем отсчета позволяет ввести понятие потенциальной энергии частицы в поле центробежных сил. В общем виде связь центробежной энергии с центробежной силой определится формулой

$$-\frac{dW_c}{dr} = m\omega^2 r,$$

откуда

$$W_c = \frac{m\omega^2 r^2}{2} = -\frac{I\omega^2}{2},$$

где I — момент инерции частицы.

Действие магнитного поля на деформированный агрегат препятствует его повороту в направлении радиуса вращения. Очевидно, что стационарное положение деформированного агрегата обеспечивается за счет конкуренций магнитной энергии агрегата W_m и потенциальной энергии поля центробежных сил W_c . Таким образом, полная энергия деформированного микрокапельного агрегата, вращающегося вокруг вертикальной оси, может быть представлена в виде

$$W = W_m + W_c. \quad (1)$$

Магнитная компонента энергии равна

$$W_m = -\mu_0(\mathbf{mH}), \quad (2)$$

где \mathbf{m} и \mathbf{H} — векторы магнитного момента капли МЖ и напряженности однородного магнитного поля. Проекция

вектора \mathbf{H} на оси координат, связанные с полуосями капли, можно записать в виде

$$H_x = H \cos \alpha, \quad H_y = H \sin \alpha,$$

где α — угол между вектором напряженности и ориентацией большой оси капельного агрегата. Угол α характеризует поворот за счет действия центробежных сил инерции первоначально деформированного вдоль направления магнитного поля микрокапельного агрегата.

После преобразований для магнитной компоненты энергии можно записать

$$W_m = -\mu_0 \chi V H_{\text{eff}}^2 \left(\frac{\cos^2 \alpha}{1 + \chi N} + \frac{2 \sin^2 \alpha}{2 + \chi - \chi N} \right), \quad (3)$$

где χ — магнитная восприимчивость вещества капельного агрегата, V — его объем, N — размагничивающий фактор агрегата, $H_{\text{eff}} = H_0 / \sqrt{2}$, H_0 — амплитуда переменного поля.

Предположим, что вытянутая полем капля МЖ имеет форму эллипсоида вращения. Рассмотрим ситуацию движения эллипсоида, находящегося на расстоянии r_0 от оси вращения и повернутого на некоторый угол α относительно этой оси. В этом случае формулу для момента инерции эллипсоида, полученную в [14], можно преобразовать к виду

$$J = \frac{4\pi\rho a^2 b}{3} \left[\frac{2}{5} a^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{5} (a^2 + b^2) \cos^2 \alpha + (r_0 + b \sin \alpha)^2 \right], \quad (4)$$

где ρ , a и b — плотность, малая и большая полуоси микрокапли соответственно.

Тогда для центробежной энергии можно записать

$$W_c = -\frac{2}{3} \pi \rho a^2 b \omega^2 \left[\frac{2}{5} a^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{5} (a^2 + b^2) \cos^2 \alpha + (r_0 + b \sin \alpha)^2 \right]. \quad (5)$$

Подставив (3) и (5) в (1), получим выражение для полной энергии

$$W = -\frac{2}{3} \pi \rho a^2 b \omega^2 \left[\frac{2}{5} a^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{5} (a^2 + b^2) \cos^2 \alpha + (r_0 + b \sin \alpha)^2 \right] - \frac{4\pi a^2 b}{3} \mu_0 \chi H_{\text{eff}}^2 \left(\frac{\cos^2 \alpha}{1 + \chi N} + \frac{2 \sin^2 \alpha}{2 + \chi - \chi N} \right). \quad (6)$$

На рис. 8 приведена зависимость полной энергии W от угла поворота вытянутой капли МЖ относительно вертикальной оси. Как видно из рисунка, при некотором значении угла энергия имеет минимум. Это говорит о

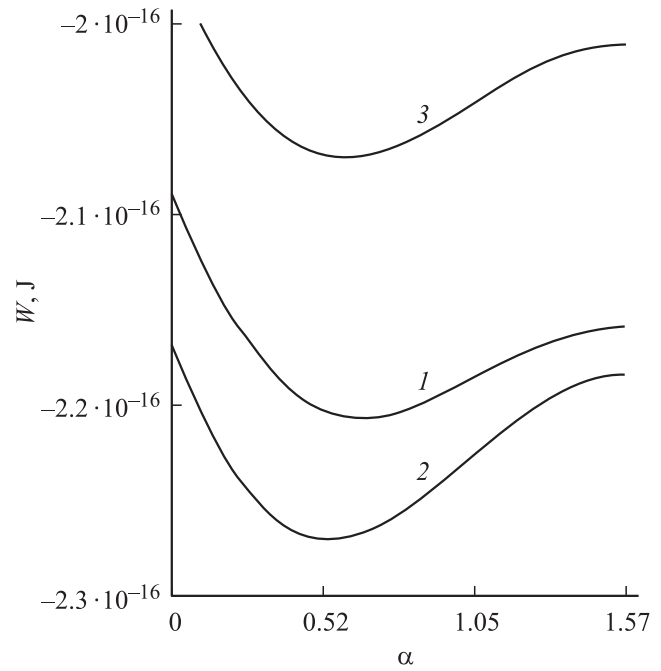


Рис. 8. Зависимость полной энергии микрокапельного агрегата при его вращении вокруг неподвижной оси от угла поворота относительно этой оси.

возможности устойчивого положения деформированной капли в определенных условиях. Как можно видеть из рис. 8, при увеличении напряженности переменного магнитного поля или снижения частоты вращения, угол, при котором достигается равновесие, уменьшается (кривые 2 и 3 соответственно).

С учетом наличия в среде микрокапельных агрегатов, способных деформироваться под воздействием магнитного поля и изменять положение в пространстве при вращении жидкости, намагниченность системы может быть представлена в виде суммы намагниченности капель и омывающей их среды

$$M = \frac{(\mu_i / \mu_e - 1) \theta}{1 + N_{\text{eff}} (\mu_i / \mu_e - 1)} H + (\mu_e - 1) H (1 - \theta), \quad (7)$$

где μ_i — магнитная проницаемость вещества капли; θ — объемная концентрация микрокапель; μ_e — магнитная проницаемость капли омывающей среды, N_{eff} — размагничивающий фактор деформированной капли, являющийся функцией напряженности поля H и угла α между большой осью деформированной капли и направлением поля, т.е. $N_{\text{eff}} = N(H, \alpha)$. Определение магнитной восприимчивости в виде $\chi_{\text{eff}} = M/H$ дает выражение, состоящее из двух слагаемых, второе из которых является постоянной величиной, а первое (содержащее N_{eff}) зависит от напряженности поля и наличия вращения жидкости, изменяющего угол α .

Таким образом, обнаруженные особенности изменения эффективной магнитной восприимчивости МЖ при ее вращении могут быть обусловлены процессами деформации содержащихся в ней микрокапельных агрега-

тов с последующей их переориентацией, обусловленной вращением кюветы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 04-02-16901а.

Список литературы

- [1] Диканский Ю.И. // Магнитная гидродинамика. 1982. № 3. С. 33–36.
- [2] Morozov K.I., Pshenichnikov A.F., Paikher Y.L. et al. // JMMM. 1987. Vol. 65. P. 269–272.
- [3] Morozov K.I., Lebedev A.V. // J. Magn. Magn. Mater. 1990. Vol. 85. P. 51–53.
- [4] Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 64. P. 041405.
- [5] Vacri J., Salin D. // Physique (Letters). 1982. Vol. 43. P. 2179.
- [6] Vacri J., Salin D. // J. Physique (Letters). 1982. Vol. 43. P. L649–L654.
- [7] Дроздова В.И., Скибин Ю.Н., Шагрова Г.В. // Магнитная гидродинамика. 1987. № 2. С. 63–66.
- [8] Диканский Ю.И., Цеберс А.С., Шацкий В.П. // Магнитная гидродинамика. 1990. № 1. С. 32–38.
- [9] Dikanskij Y.I., Polikhronidi N.G., Balabanov K.A. // Magnetohydrodynamics. 1988. N 2. P. 87–92.
- [10] Пшеничников А.Ф., Шурубор Ю.И. // Изв. АН СССР. Сер. Физика. 1987. Т. 51. № 6. С. 1081–1087.
- [11] Pshenichnikov A.F., Shurubor Y.I. // Magnitnaya Gidrodinamika. 1988. Vol. 24. N 4. P. 417–421.
- [12] Дроздова В.И., Шагрова Г.В. // Магнитная гидродинамика. 1989. № 1. С. 126–128.
- [13] Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М.: Наука, 1969. 404 с.
- [14] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1965. 204 с.