УДК 537.622

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЙ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Закинян А.Р., Нечаева О.А.

Институт естественных наук Северо-Кавказского федерального университета, Ставрополь, e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru

В работе исследуется новый тип композиционных магнитомягких сред. Изучаемые магнитодиэлектрические эмульсии обладают выраженными магнитными свойствами, что отличает их от классических эмульсий. Исследовано влияние вращающегося магнитного поля на магнитные свойства эмульсии. Показано, что если период вращения магнитного поля меньше времени релаксации формы капель дисперсной фазы, происходит сплющивание капель в плоскости вращения поля. Такая деформация капель вызывает специфические изменения макроскопических магнитных свойств эмульсии. Изучена зависимость магнитной проницаемости эмульсии от напряженности вращающегося магнитного поля. Показано, что магнитная проницаемость магнитодиэлектрической эмульсии может изменяться на ~ 10% под действием поля. Развита теория магнитных свойств магнитодиэлектрических эмульсий во вращающемся поле, находящаяся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

Ключевые слова: магнитный наноколлоид, магнитодиэлектрическая эмульсия, вращающееся магнитное поле, деформация капель

MAGNETIC PERMEABILITY OF MAGNETODIELECTRIC EMULSIONS IN THE ROTATING MAGNETIC FIELD

Zakinyan A.R., Nechaeva O.A.

Institute of Natural Sciences, North-Caucasian Federal University, Stavropol, e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru

In the paper the novel soft magnetic composite medium is investigated. A magnetodielectric emulsion studied demonstrates the strong magnetic properties which are atypical for commonly known classical emulsions. The influence of a rotating magnetic field on the magnetic properties of an emulsion is investigated. It was shown that if the magnetic field rotation period less than the time of the shape relaxation of droplets of dispersed phase the droplets oblateness in the plane of field rotation is taking place. Such droplets deformation leads to the specific change in the macroscopic magnetic properties of an emulsion. The dependence of the magnetic permeability of an emulsion on the rotating magnetic field strength is studied. It is shown that the magnetic permeability of an emulsion can change by ~ 10% under the action of the magnetic field. The theory of the magnetic properties of the magnetodielectric emulsions in the rotating magnetic field is developed; the theory is in the good agreement with the experimental data.

Keywords: magnetic nanocolloid, magnetodielectric emulsion, rotating magnetic field, drops deformation

В контексте проектирования и создания новых функциональных наноматериалов широкий интерес исследователей вызывает применение магнитных наноколлоидов (также называемых магнитными жидкостями) для целей получения материалов с новыми свойствами. На основе магнитных наноколлоидов оказалось возможным создание новых композиционных сред, которые проявляют заметную зависимость своих свойств от воздействия внешних факторов, в частности, от магнитных и электрических полей. При этом в основном исследовались композиционные наноколлоиды, состоящие из взвеси однодоменных магнитных наночастиц и более крупных, размером порядка нескольких микрометров, магнитных и немагнитных твердых включений различных материалов и различной формы [4, 6]. К подобным композиционным магнитомягким средам относятся также магнитодиэлектрические эмульсии, которые исследованы в гораздо меньшей степени и вызывают большой интерес как с чисто научной точки зрения, так и в контексте возможности их применения на практике в качестве магниточувствительных систем. Магнитодиэлектрические эмульсии представляют собой жидкую композиционную среду, одна из фаз которой представлена магнитной жидкостью [5].

Воздействие внешних силовых полей на магнитодиэлектрические эмульсии может приводить к деформации капель их дисперсной фазы. Подобное изменение микрогеометрии материала влияет на его макроскопические свойства, и в ряде случаев такое влияние может быть весьма значительным. Так, в работах [2, 3, 10, 11] исследуются магнитные и электрические свойства магнитодиэлектрических эмульсий, подверженных действию постоянных магнитного и электрического полей. В этом случае капли дисперсной фазы эмульсии вытягивают вдоль направления поля, принимая форму вытянутого эллипсоида вращения, что приводит к соответствующему изменению макроскопических свойств среды.

При воздействии вращающегося магнитного поля отдельные капли магнитной

жидкости и немагнитные капли, помещенные в магнитную жидкость, могут испытывать деформацию, по своему характеру отличающуюся от деформации в постоянном магнитном поле. Так, в работах [1, 8, 9] было показано, что в этом случае капли сплющиваются, принимая форму сплюснутого эллипсоида вращения, в случае, если период вращения поля меньше характерного времени релаксации формы капель. Возникающие во вращающемся поле деформационные эффекты должны приводить к специфическому изменению макроскопических свойств магнитодиэлектрических эмульсий. В данной работе рассматривается влияние однородного вращающегося магнитного поля на макроскопические магнитные свойства магнитодиэлектрических эмульсий.

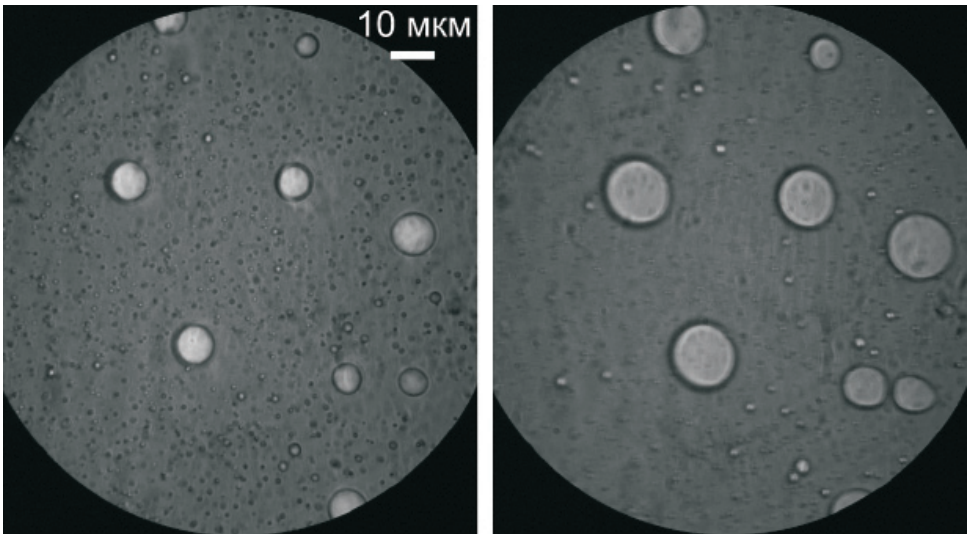
Объект и методы экспериментальных исследований

Магнитодиэлектрическая эмульсия была приготовлена путем диспергирования авиационного масла АМГ-10 в несмешивающейся с ним магнитной жидкости, диспергирование осуществлялось при помощи электромеханической мешалки. Выбор этого масла для получения эмульсии был обусловлен тем, что межфазное натяжение на границе между ним и магнитной жидкостью оказывается сравнительно малым ($\sigma \approx 10^{-6}$ Н/м), благодаря чему значительную деформацию микрокапель дисперсной фазы можно наблюдать даже при действии относительно слабых магнитных полей (~1 кА/м). Применявшаяся магнитная жидкость представляла собой дисперсию наночастиц магнетита (~ 10 нм) в керосине, в качестве стабилизатора использовалась олеиновая кислота. Плотность магнитной жидкости составляла 1640 кг/м^3, динамическая вязкость η_e = 30 мПа·с, объемная концентрация магнетита – 19%. Авиационное масло имело плотность 776 кг/м^3 и динамическую вязкость η_i = 14,5 мПа·с. В процессе приготовления эмульсии никаких эмульгирующих агентов использовано не было. Поскольку размеры магнитных наночастиц, образующих магнитную жидкость, на несколько порядков меньше размеров капель дисперсной фазы изучаемых эмульсий, магнитную жидкость в данном случае можно рассматривать как сплошную жидкую намагничивающуюся среду.

Исследования, проведенные при помощи оптического микроскопа, показали, что действие внешнего однородного вращающегося магнитного поля независимо от соотношения фаз вызывало деформацию капель дисперсной фазы эмульсии. При этом, начиная с частоты ~5 Гц и далее, большинство капель эмульсии сплющивались в плоскости вращения поля, принимая форму сплюснутых эллипсоидов вращения с осью вращения перпендикулярной магнитному полю. При частотах вращения, поля около 20–30 Гц можно было считать, что все капли дисперсной фазы независимо от их размера принимают форму сплюснутых эллипсоидов. Эти результаты подтверждаются расчетом времени релаксации формы капель согласно выражению

$$\tau = R(16\eta_e + 19\eta_i)(3\eta_e + 2\eta_i)/[40\sigma(\eta_i + \eta_e)].$$

Действительно, для капель радиусом $R \sim 5$ мкм при соответствующих значениях вязкости и межфазного натяжения частота поля, при которой релаксация формы капель будет невозможна ($1/\tau$), составляет ~10 Гц. В качестве примера на рис. 1 представлено изображение слоя эмульсии масла в магнитной жидкости в отсутствии внешнего поля (*а*) и при действии однородного вращающегося магнитного поля (*б*) напряженностью H = 1 кА/м и частотой 30 Гц, плоскость вращения магнитного поля совпадает с плоскостью рисунка.



а б

Рис. 1. Эмульсия капель масла в магнитной жидкости:
а – в отсутствии внешнего поля; б – под действием вращающегося магнитного поля

Были проведены исследования магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии при воздействии однородного вращающегося магнитного поля. Частота вращения поля составляла 30 Гц. Исследование особенностей магнитной проницаемости эмульсии, обусловленных процессами

сплющивания капель дисперсной фазы, было осуществлено мостовым методом. Величина магнитной проницаемости определялась по индуктивности соленоида, заполненного образцом. В качестве измерительной ячейки использовался однослойный бескаркасный соленоид, длина которого (8 см) намного превышала его диаметр (0,3 см). Для измерения индуктивности использовался цифровой мост типа Е7-8, измерительное поле которого достаточно мало (~50 А/м) и не оказывало влияния на характер структурного состояния исследованной среды. Измерения производились при частоте измерительного поля 1 кГц. Магнитная проницаемость рассчитывалась по формуле $\mu = L/L_0$ (L_0 – индуктивность пустого соленоида; L – индуктивность соленоида, заполненного эмульсией).

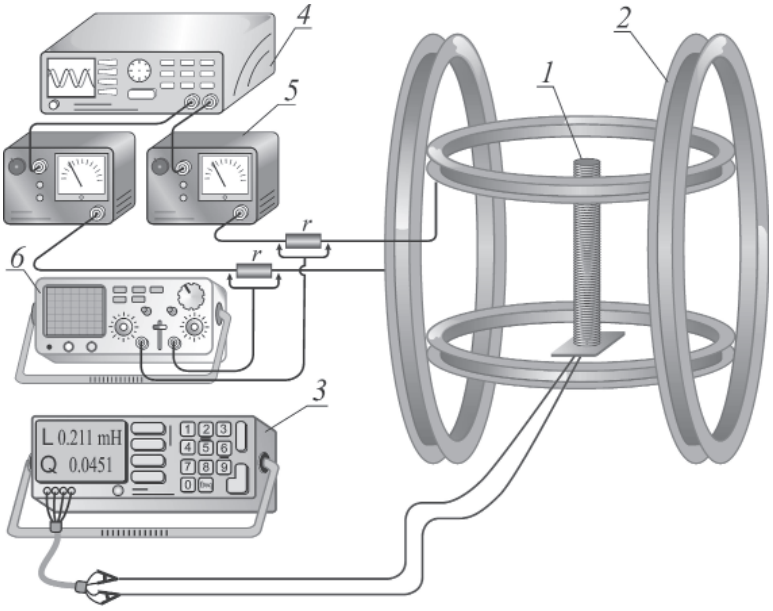


Рис. 2. Экспериментальная установка:
1 – измерительный соленоид с эмульсией; 2 – катушки Гельмгольца; 3 – цифровой измерительный мост; 4 – генератор сигналов произвольной формы; 5 – усилители мощности; 6 – осциллограф

Вращающееся магнитное поле создавалось двумя парами перпендикулярно установленных катушек Гельмгольца, на которые подавалось синусоидальное напряжение от двухканального генератора со сдвигом фаз $\pi/2$. Амплитуда напряжения на каждой паре катушек Гельмгольца регулировалась при помощи двух усилителей мощности. Величина напряженности магнитного поля, создаваемого катушками, определялась по силе протекающего по ним тока. Сила тока в катушках Гельмгольца измерялась по падению напряжения на двух последовательно соединенных с ними постоянных резисторах. Падение напряжения на резисторах определялось с помощью осциллографа. Напряженность магнитного поля в опытах изменялась от 0 до 3 кА/м. Соленоид с эмульсией помещался в область однородности вращающегося магнитного поля. Исследования проводились в двух различных конфигурациях экспериментальной установки. В первом случае плоскость вращения внешнего магнитного поля была перпендикулярна оси соленоида и, соответственно, измерительному полю, во втором случае совпадала с ними. Схема применявшейся в исследованиях экспериментальной установки изображена на рис. 2, где представлена конфигурация установки, соответствующая второму случаю. Т.о., в первом случае имеет место сплющивание капель дисперсной фазы эмульсии в плоскости, перпендикулярной измерительному полю, а во втором случае – параллельной ему, что должно приводить к различному характеру зависимости магнитных свойств эмульсии от воздействия вращающегося поля.

Результаты экспериментальных исследований

Для определения зависимости проницаемости эмульсии от величины вращающегося магнитного поля предварительно была изучена зависимость от поля магнитных свойств использовавшейся для получения эмульсии магнитной жидкости. Измерения показали, что в случае вращения внешнего магнитного поля в плоскости перпендикулярной измерительному полю, магнитная проницаемость жидкости практически не зависит от внешнего поля. В случае же, когда магнитное поле вращается в плоскости, параллельной измерительному полю, наблюдается уменьшение магнитной проницаемости магнитной жидкости при увеличении напряженности вращающегося внешнего поля. Полученные экспериментальные зависимости магнитной проницаемости магнитной жидкости от величины напряженности внешнего вращающегося магнитного поля H_e для обоих рассматриваемых случаев представлены на рис. 3. Отметим, что погрешность измерения магнитной проницаемости в данном опыте и во всех остальных экспериментах можно считать

соизмеримой с размерами соответствующих экспериментальных точек на графиках.

Проведенные измерения магнитной проницаемости эмульсии масла в магнитной жидкости при воздействии на нее вращающегося магнитного поля выявили ряд особенностей ее зависимости от напряженности поля. Оказалось, что в случае, когда плоскость вращения внешнего поля перпендикулярна направлению измерительного поля, магнитная проницаемость эмульсии убывает с увеличением амплитуды напряженности вращающегося поля, что существенно отличает поведение эмульсии от свойств чистой магнитной жидкости в аналогичной ситуации. Такой характер полученной зависимости можно объяснить следующим образом. При сплющивании капель дисперсной фазы эмульсии в плоскости, перпендикулярной измерительному полю, размагничивающий фактор каждой капли вдоль направления измерительного поля (вдоль оси вращения) увеличивается, это проявляется в уменьшении макроскопической магнитной проницаемости эмульсии в целом. В дальнейшем были проведены измерения проницаемости эмульсии при различной объемной концентрации капель масла в ней. В качестве примера на рис. 4 представлены экспериментально полученные зависимости относительного изменения магнитной проницаемости эмульсии масла в магнитной жидкости от величины напряженности магнитного поля, вращающегося в плоскости, перпендикулярной измерительному полю, для двух значений концентрации дисперсной фазы (20 и 30 %). Как видно из рисунка, изменение магнитной проницаемости эмульсии при воздействии поля проявляется сильнее для эмульсии с большим содержанием дисперсной фазы.

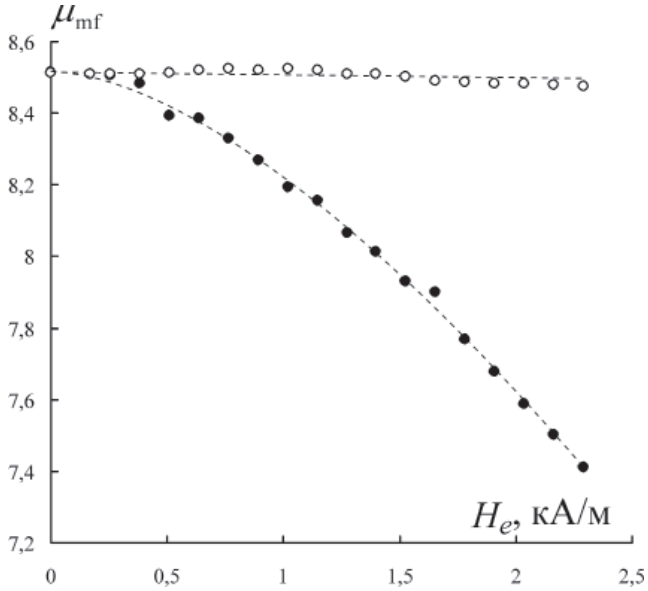


Рис. 3. Экспериментальная зависимость магнитной проницаемости магнитной жидкости от напряженности магнитного поля: ○ – направление измерительного поля перпендикулярно плоскости вращения внешнего магнитного поля; ● – параллельно ей

В случае, когда плоскость вращения внешнего поля параллельна направлению измерительного поля, наблюдается иной характер зависимости магнитной проницаемости эмульсии масла в магнитной жидкости от напряженности поля. Вначале магнитная проницаемость возрастает с увеличением амплитуды напряженности вращающегося поля, а затем, достигнув максимума, начинает убывать. Такой характер зависимости магнитной проницаемости можно объяснить следующим образом. При сплющивании капель дисперсной фазы эмульсии в плоскости, параллельной измерительному полю, размагничивающий фактор каждой капли вдоль направления измерительного поля уменьшается, это проявляется в увеличении макроскопической магнитной проницаемости эмульсии в целом. С другой стороны, как было отмечено выше, магнитная проницаемость чистой магнитной жидкости в этом случае уменьшается. Т.о., имеют место два фактора, определяющие величину магнитной проницаемости эмульсии, действие которых противоположно друг другу, что и позволяет объяснить экстремальный характер полученной в рассматриваемом случае

зависимости магнитной проницаемости от напряженности вращающегося магнитного поля. Были проведены измерения проницаемости эмульсии при различной объемной концентрации капель масла в ней. В качестве примера на рис. 5 представлены экспериментально полученные зависимости относительного изменения магнитной проницаемости эмульсии от величины напряженности магнитного поля для двух значений концентрации дисперсной фазы (20 и 30 %). Как видно из рисунка, и в этом случае изменение магнитной проницаемости эмульсии при воздействии поля проявляется сильнее для эмульсии с большим содержанием дисперсной фазы.

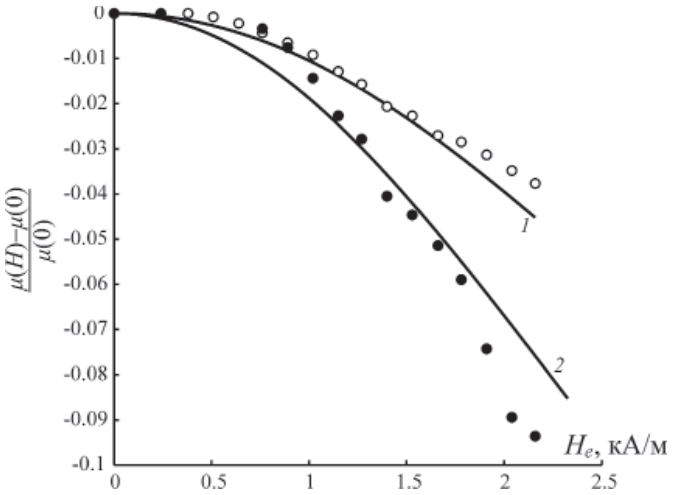


Рис. 4. Зависимость относительного изменения магнитной проницаемости эмульсии от напряженности внешнего вращающегося магнитного поля, когда плоскость вращения поля перпендикулярна направлению измерительного поля. μ(0) – значение проницаемости в отсутствии внешнего поля; μ(H) – значение проницаемости при данном значении поля. Точки – экспериментальные значения, кривые – теоретический расчет. 1, ○ – объемная доля дисперсной фазы эмульсии составляет 20 %, 2, ● – 30 %

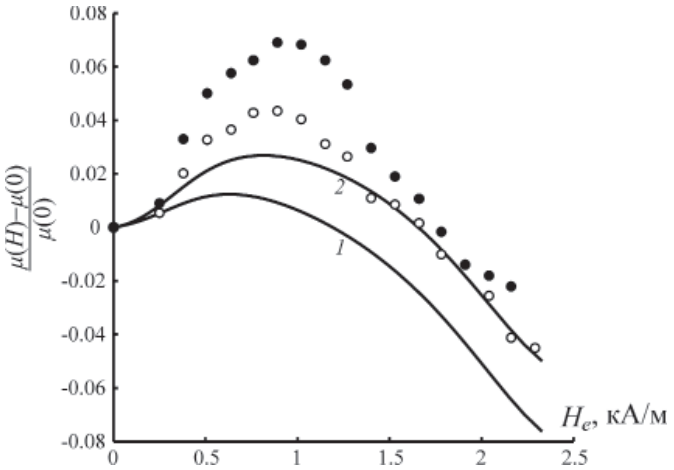


Рис. 5. Та же зависимость, что и на рисунке 4, для случая, когда плоскость вращения внешнего поля параллельна направлению измерительного поля.

Анализ и обсуждение полученных данных

Теоретическое рассмотрение особенностей магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии во вращающемся магнитном поле можно провести по аналогии с анализом, представленным в работе [11] для случая магнитной проницаемости эмульсии в постоянном поле. Произведем приближенную теоретическую оценку рассмотренных эффектов. Для упрощения пренебрежем макроскопической магнитной анизотропией эмульсии, имеющей место вследствие сплющивания капель дисперсной фазы. В этом случае величина эффективной макроскопической проница-

емости эмульсии определяется формулой Бруггемана

$$\frac{\mu-\mu_i}{\mu_e-\mu_i}\left(\frac{\mu_e}{\mu}\right)^N=1-\phi, \qquad (1)$$

в которой N – размагничивающий фактор капли дисперсной фазы, имеющей форму сплюснутого эллипсоида вращения, φ – объемная доля дисперсной фазы. В случае, когда измерительное поле параллельно оси вращения эллипсоида (перпендикулярно плоскости вращения внешнего поля) размагничивающий фактор в (1) определяется выражением [7]

$$N_1=\frac{\sqrt{1-e^2}}{2e^3}\left(\frac{e}{\sqrt{1-e^2}}-\operatorname{arctg}\frac{e}{\sqrt{1-e^2}}\right), \qquad (2)$$

где e – эксцентриситет эллипсоида. Если же измерительное поле параллельно большой оси эллипсоида (параллельно плоскости вращения внешнего поля) для размагничивающего фактора в (1) следует подставить выражение

$$N_2=\frac{1}{2}\left(1-N_1\right). \qquad (3)$$

Для упрощения анализа также пренебрежем взаимодействием капель эмульсии, тогда для определения размагничивающего фактора найдем равновесную форму отдельной капли. Форма немагнитной капли, помещенной в магнитную жидкость, во вращающемся магнитном поле высокой частоты, вообще говоря, определяется величиной магнитного поля, поверхностным натяжением на границе раздела, а также течениями, возникающими внутри и снаружи капли. Однако роль последних, по-видимому, несущественна, поскольку в проделанных экспериментах при сплющивании капли ее форма не зависела от частоты вращения поля. Следовательно, форма капли определяется лишь конкуренцией магнитных и поверхностных напряжений. В работе [8] при рассмотрении сплющивания капли магнитной жидкости в высокочастотном вращающемся магнитном поле ее форма была определена из принципа минимальности полной свободной энергии капли. Аналогичный подход можно применить для нахождения равновесной формы немагнитной капли.

Свободная энергия капли складывается из ее магнитной W_m и поверхностной W_s свободных энергий. Тогда равновесная конфигурация капли будет определяться условием

$$\frac{\partial}{\partial e}\left(W_m+W_s\right)=0. \qquad (4)$$

Магнитная энергия капли определяется выражением [7]

$$W_m=\frac{\mu_0}{2}\frac{\mu_e\left(\mu_e-1\right)H^2V}{\mu_e+N_2\left(1-\mu_e\right)}, \qquad (5)$$

где $V=4/3\pi R^3$ – объем капли, который считается постоянным. Поверхностная энергия капли определяется произведением поверхностного натяжения на площадь поверхности капли и может быть найдена с помощью выражения

$$W_s=\frac{2\pi\sigma R^2}{\left(1-e^2\right)^{1/3}}\left(1+\frac{1-e^2}{e}\ln\frac{1+e}{\sqrt{1-e^2}}\right). \qquad (6)$$

Подставляя выражения (6) и (5) в (4), после преобразований получим выражение, определяющее форму немагнитной капли в высокочастотном вращающемся магнитном поле:

$$\frac{\mu_0H^2R}{\sigma}=\frac{2}{\mu_e}\left(\frac{\mu_e}{\mu_i-\mu_e}+N_2\right)^2\times$$
$$\times\frac{\left(1-e^2\right)^{2/3}\left(\frac{e^2+3}{e}\ln\frac{1+e}{\sqrt{1-e^2}}-\frac{3-e^2}{1-e^2}\right)}{3/e^2-\left(3/e^3-2/e\right)\sqrt{1-e^2}\operatorname{arctg}\frac{e}{\sqrt{1-e^2}}-3}. \qquad (7)$$

Следует заметить, что входящая в выражение (7) величина напряженности поля H соответствует магнитному полю внутри эмульсии, которое, вообще говоря, может отличаться от внешнего магнитного поля. Рассмотрим вначале случай, когда плоскость вращения внешнего поля перпендикулярна направлению измерительного поля. В этом случае вращающее магнитное поле оказывается всегда перпендикулярным оси соленоида с эмульсией, тогда внутри соленоида будет иметь место однородное вращающееся магнитное поле, напряженность которого связана с напряженностью внешнего магнитного поля выражением

$$H_i=\frac{2H_e}{\mu+1}, \qquad (8)$$

где H_i, H_e – напряженности внутреннего и внешнего магнитного поля соответственно, μ – магнитная проницаемость эмульсии, определяемая выражением (1). При выводе (8) учтено, что размагничивающий фактор цилиндра (соленоид имеет форму круглого цилиндра) в направлении перпендикулярном его оси равен 0,5.

С учетом (8) зависимость эксцентриситета сплющиваемой капли эмульсии от величины напряженности внешнего враща-

ющегося магнитного поля в данном случае может быть записана в виде

$$\frac{\mu_0 H_e^2 R}{\sigma} = \frac{(\mu+1)^2}{2\mu_e}\left(\frac{\mu_e}{\mu_i-\mu_e}+N_2\right)^2 \times$$

$$\times \frac{\left(1-e^2\right)^{2/3}\left(\frac{e^2+3}{e}\ln\frac{1+e}{\sqrt{1-e^2}}-\frac{3-e^2}{1-e^2}\right)}{\frac{3}{e^2}-\left(\frac{3}{e^3}-\frac{2}{e}\right)\sqrt{1-e^2}\,\mathrm{arctg}\frac{e}{\sqrt{1-e^2}}-3}. \quad (9)$$

В данном выражении при расчете μ используется формула (3) для размагничивающего фактора. Т.о., для определения магнитной проницаемости в рассматриваемом случае необходимо вначале с помощью системы уравнений (1), (9) найти зависимость эксцентриситета капель от величины внешнего поля, а затем с помощью (1) рассчитать проницаемость, используя при расчете проницаемости выражение для размагничивающего фактора в форме (2).

Сопоставим результаты теоретических расчетов с экспериментальными данными для эмульсии масла в магнитной жидкости в случае, когда плоскость вращения внешнего магнитного поля перпендикулярна направлению измерительного поля. Для этого положим $\mu_i = 1$ и $\mu_e = \mu_{mf}$ ($\mu_{mf} = 8{,}5$) и используем для расчетов среднее значение радиуса капель эмульсии $R = 3{,}5$ мкм. На рис. 4 сплошными линиями показаны результаты теоретического расчета относительного изменения магнитной проницаемости эмульсии в зависимости от величины напряженности внешнего вращающегося магнитного поля, полученные для двух значений концентрации дисперсной фазы. Как видно из рисунка, наблюдается весьма удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических данных.

Далее рассмотрим случай, когда плоскость вращения внешнего магнитного поля параллельна направлению измерительного поля и, соответственно, параллельна оси соленоида с эмульсией. В этом случае вращающееся магнитное поле в различные моменты времени образует разные углы с осью соленоида, и магнитное поле внутри соленоида при этом будет иметь всякий раз разную величину. Так, наибольшее значение внутреннее поле будет иметь в момент, когда внешнее поле оказывается сонаправлено с осью соленоида (размагничивающий фактор при этом можно считать равным нулю), а наименьшее значение при перпендикулярном направлении внешнего поля и оси соленоида (размагничивающий фактор формы соленоида при этом равен 0,5). Также направление внутреннего поля будет несколько отличаться от направления внешнего поля вследствие преломления силовых линий магнитного поля на границе соленоида и внешней среды. За счет этих факторов внутренне магнитное поле уже нельзя считать равномерно вращающимся и имеющим круговую поляризацию. Все это затрудняет проведение теоретического анализа магнитной проницаемости эмульсии в рассматриваемой ситуации. Поэтому мы ограничимся весьма приближенной теоретической оценкой свойств эмульсии на качественном уровне. Будем считать, что внутренне магнитное поле равно внешнему, и форма капли определяется уравнением (7). Магнитную проницаемость эмульсии найдем с помощью уравнения (1), используя выражение (3) для размагничивающего фактора капель. В данном случае необходимо также учесть зависимость от поля магнитной проницаемости магнитной жидкости. В качестве такой зависимости мы применим эмпирическую зависимость, графически представленную на рис. 3.

На рис. 5 сплошными линиями показаны результаты расчета относительного изменения магнитной проницаемости эмульсии в зависимости от величины напряженности внешнего вращающегося магнитного поля, полученные для двух значений концентрации дисперсной фазы. Как видно из рис. 5, теоретические зависимости качественно повторяют ход экспериментальных кривых, однако наблюдается их существенное количественное несовпадение. В частности, как видно из рисунка, экспериментальные точки ложатся в основном выше соответствующих теоретических кривых, и магнитная проницаемость эмульсии в интервале малых полей возрастает значительнее, чем это предсказывается выполненным теоретическим расчетом. Такое несовпадение экспериментальных и теоретических результатов можно объяснить следующим образом. Поскольку внутреннее магнитное поле имеет большую величину в момент, когда внешнее поле сонаправлено с осью соленоида, чем когда оно перпендикулярно его оси, капли дисперсной фазы эмульсии будут несколько сильнее деформированы вдоль оси соленоида, чем в перпендикулярном ей направлении, и уже не будут иметь форму сплюснутых эллипсоидов вращения. В этом случае их размагничивающий фактор вдоль измерительного поля окажется несколько меньше определяемого выражением (3), вследствие чего магнитная проницаемость эмульсии будет иметь большее значение.

Следует отметить, что вследствие разницы плотностей дисперсной фазы и дис-

персионной среды эмульсии в ней имеет место седиментационное разделение фаз. Однако, как показали проведенные исследования, этот процесс происходит гораздо медленнее, чем процедура измерения магнитных свойств эмульсии и данным эффектом в условиях представленных экспериментов можно пренебречь. Дополнительная погрешность в теоретическое определение магнитной проницаемости вносится рядом указанных выше допущений. Кроме того, не была учтена полидисперсность эмульсии и возможность коалесценции капель дисперсной фазы под действием поля. Вместе с тем проведенный теоретический анализ позволяет качественно объяснить особенности магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии во вращающемся магнитном поле.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлены особенности взаимодействия магнитодиэлектрических эмульсий с вращающимся магнитным полем, обусловленные процессами деформации микрокапель дисперсной фазы эмульсий, изучено влияние данных процессов на магнитные свойства таких сред. Развита теория этих явлений, находящаяся в удовлетворительном согласии с экспериментальными результатами.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК–6053.2012.2. Авторы также выражают благодарность проф. Диканскому Ю.И. за плодотворное обсуждение результатов работы.

Список литературы

1. Диканский Ю.И., Закинян А.Р. Динамика немагнитной капли, взвешенной в магнитной жидкости, во вращающемся магнитном поле // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 8. – С. 8–12.

2. Диканский Ю.И., Закинян А.Р., Константинова Н.Ю. О магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, Вып. 1. – С. 21–26.

3. Диканский Ю.И., Нечаева О.А., Закинян А.Р., Константинова Н.Ю. Эффекты структурных превращений в магнитных эмульсиях // Коллоидный журнал. – 2007. – Т. 69, № 6. – С. 737–741.

4. Электрическая проводимость слоя магнитной жидкости с графитовым наполнителем в магнитном поле / А.Р. Закинян, А.Ф. Голота, В.М. Ищенко, Л.С. Мкртчян // Вестник Ставропольского государственного университета. – 2011. – Вып. 77(6). Часть 1. – С. 268–271.

5. Закинян А., Диканский Ю. Магнитные и электрические свойства магнитных эмульсий. Саарбрюккен–Москва, LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 146 с.

6. Закинян Р.Г., Смерек Ю.Л., Закинян А.Р. К механизму электропроводности магнитной жидкости с графитовым наполнителем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2004. – № 3. – С. 52–55.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.

8. Морозов К.И., Лебедев А.В. Бифуркации формы капли магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2000. – Т. 118, Вып. 5(11). – С. 1188–1192.

9. Ткачева Е.С., Закинян А.Р., Диканский Ю.И. Деформация микрокапель магнитодиэлектрических эмульсий в переменном электрическом и вращающемся магнитном полях // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6 (Ч. 3). – С. 685–688.

10. Dikansky Y.I., Zakinyan A.R., Tyatyushkin A.N. Anisotropy of magnetic emulsions induced by magnetic and electric fields // Phys. Rev. E, 2011, Vol. 84, 031402.

11. Zakinyan A., Dikansky Y. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion // Colloids and Surfaces A, 2011, Vol. 380, pp. 314–318.

References

1. Dikansky Yu.I., Zakinyan A.R. Dynamics of a nonmagnetic drop suspended in a magnetic fluid in a rotating magnetic field // Technical Physics, 2010, Vol. 55, no. 8, pp. 1082–1086.

2. Dikansky Yu.I., Zakinyan A.R., Konstantinova N.Yu. On the permeability of a magnetodielectric emulsion // Technical Physics, 2008, Vol. 53, no. 1, pp. 19–23.

3. Dikansky Yu.I., Nechaeva O.A., Zakinyan A.R., Konstantinova N.Yu. Effects of structural transformations in magnetic emulsions // Colloid Journal, 2007, Vol. 69, no. 6, pp. 691–694.

4. Zakinyan A.R., Golota A.F., Ischenko V.M., Mkrtchyan L.S. Electrical conductivity of a magnetic fluid layer with a graphite filler in the magnetic field [Elektricheskaya provodimost' sloya magnitnoy zhidkosti s grafitovym napolnitelem v magnitnom pole] // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2011, no. 77(6). Part 1, pp. 268–271.

5. Zakinyan A., Dikansky Yu. Magnetic and electrical properties of magnetic emulsion [Magnitnye i elektricheskie svoystva magnitnykh emul'siy]. Saarbrucken–Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 146 p.

6. Zakinyan R.G., Smerek Yu.L., Zakinyan A.R. On the mechanism of electrical conduction of a magnetic fluid with a graphite filler [K mekhanizmu elektroprovodnosti magnitnoy zhidkosti s grafitovym napolnitelem] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki, 2004, no. 3, pp. 52 – 55.

7. Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous media, Pergamon Press, New York, 1984. 460 p.

8. Morozov K.I., Lebedev A.V. Bifurcations of the shape of a magnetic fluid droplet in a rotating magnetic field // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2000. Vol. 91, no. 5. pp. 1029–1032.

9. Tkacheva E.S., Zakinyan A.R., Dikansky Yu.I. Deformation of magnetodielectric emulsions microdrops under the action of alternating electric and rotating magnetic fields [Deformatsiya mikrokapel' magnitodielektricheskikh emul'siy v peremennom elektricheskom i vraschayuschemsya magnitnom polyakh] // Fundamental'nye issledovaniya, 2012, no. 6 (part 3), pp. 685–688.

10. Dikansky Y.I., Zakinyan A.R., Tyatyushkin A.N. Anisotropy of magnetic emulsions induced by magnetic and electric fields // Phys. Rev. E 2011. Vol. 84. 031402.

11. Zakinyan A., Dikansky Y. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion // Colloids and Surfaces A. 2011. Vol. 380. pp. 314–318.

Рецензенты:

Симоновский А.Я., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической физики СКФУ, г. Ставрополь;

Дерябин М.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики СКФУ, г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 22.11.2012.