

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности эффективного управления электрическими свойствами магнитодиэлектрических эмульсий посредством воздействия на них магнитного поля. Существенным является также и то, что заметные изменения электрических и магнитных свойств эмульсий можно наблюдать при действии сравнительно слабых внешних полей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект МК-3169.2017.2), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания (проект № 3.5822.2017).

Литература:

1. Zakinyan A., Dikansky Y. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion // Colloids and Surfaces A. 2011. Vol. 380. P. 314–318.
2. Zakinyan A., Dikansky Y., Bedzhanyan M. Electrical properties of chain microstructure magnetic emulsions in magnetic field // Journal of Dispersion Science and Technology. 2014. Vol. 35, Iss. 1, P. 111–119.
3. Zakinyan A.R., Dikansky Y.I. Effect of microdrops deformation on electrical and rheological properties of magnetic fluid emulsion // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 431. P. 103–106.
4. Усиков С. В. Электрометрия жидкостей. Л.: Химия, 1974, 144 с.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАВИСИМОСТИ МЕЖФАЗНОГО НАТЯЖЕНИЯ
МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ МИКРОКАПЕЛЬ
ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Шагрова Г.В., Дроздова В.И., Романенко М.Г.

Северо-Кавказский федеральный университет,
355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: g_shagrova@mail.ru

Сложный характер изменения концентрации магнитных частиц в пограничном слое может оказывать существенное влияние на

межфазное натяжение и устойчивость поверхностей раздела поляризующихся и намагничивающихся жидкостей [1], поэтому поиск зависимости межфазного натяжения от напряженности магнитного поля вызывает большой интерес исследователей, в то же время полученные результаты носят противоречивый характер.

В работах [2-4] сделан вывод о зависимости коэффициента поверхностного натяжения от относительной ориентации магнитного поля и межфазной границы. В работе Чеканова В.В. и др. [5] на основе анализа экспериментальных результатов показано, что величина поверхностного натяжения не зависит от напряженности магнитного поля. В работе [6] на основе сравнения данных натурного и вычислительного экспериментов по гидростатике капель магнитной жидкости сделан противоположный вывод о зависимости поверхностного натяжения от магнитного поля. Хотя полученные в работе [6] результаты и не противоречат ранее проведенным исследованиям для слабых полей [5], так как существенные изменения поверхностного натяжения показаны, начиная с напряженности поля 10 кА/м, однако этот вопрос требует дальнейших исследований.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования зависимости межфазного натяжения от напряженности внешнего магнитного поля на границе раздела магнитожидкостных микрокапель и окружающей их жидкости.

Объектом исследования были образцы магнитных жидкостей типа «магнетит в керосине» с концентрацией твердой фазы $\leq 2\%$, содержащие магнитожидкостные микрокапли, магнитная проницаемость которых составляла $\mu_i \sim 50$, а магнитная проницаемость, окружающей их жидкости $\mu_e \sim 1$.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, посвященные решению классической задачи о гидростатике намагничивающейся капли, которая находится в магнитной или немагнитной жидкой среде и не смешивается с ней, позволили установить основные закономерности деформации намагничивающейся капли. При высоких для жидкости значениях магнитной проницаемости ($\mu_i > 20$) деформация капли неоднозначна и носит гистерезисный характер [7]. В слабых полях при небольших деформациях капли изменение ее свободной поверхности хорошо описывается с помощью модели [7, 9], согласно которой форма капли соответству-

ет вытянутому вдоль линий напряженности магнитного поля эллипсоиду вращения, а характер намагничивания предполагается линейным. Такие предположения позволяют осуществить бесконтактное определение межфазного натяжения на границе магнитожидкостной микрокапли с окружающей жидкостью по формуле [9]:

$$\sigma = \frac{\mu_0 \mu_e (\mu_i - \mu_e)^2 H^2 R}{2\pi (\mu_e + (\mu_i - \mu_e) N)^2 (a/b)^{1/3} (2(a/b) - ((a/b)^2 + 1)/(a/b)^2)}, \quad (1)$$

где R – радиус, H – напряженность магнитного поля, $N = (b/a)^2 \cdot (\ln((1+e)/(1-e)) - 2e) / 2e^3$ – размагничивающий фактор вытянутого эллипсоида вращения; a и b – большая и малая полуоси эллипсоида. Погрешность определения межфазного натяжения σ_σ как функции $\sigma = \sigma(H, R, N, \lambda)$ зависит от погрешности определения всех параметров, входящих в (1):

$$\sigma_\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial H} \cdot \sigma_H\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial R} \cdot \sigma_R\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial N} \cdot \sigma_N\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} \cdot \sigma_\lambda\right)^2},$$

где составляющими среднеквадратичной ошибки σ_σ являются частные производные и среднеквадратичные ошибки: измерения радиуса, определения напряжённости магнитного поля, размагничивающего фактора микрокапли и отношения ее полуосей $\lambda = a/b$. Погрешность определения линейных размеров увеличивается при уменьшении размеров капель и это ограничивает точность метода бесконтактного определения межфазного натяжения, основанного на регистрации зависимости линейных размеров от поля для магнитожидкостных микрокапель по сравнению с микроскопическими каплями.

Анализ погрешностей показал, что при $\sigma \sim 10^{-7}$ Н/м основной вклад для крупных микрокапель диаметром > 20 мкм вносит погрешность определения напряженности магнитного поля, а для мелких микрокапель диаметром меньше 6 мкм – погрешность определения линейных размеров. При доверительной вероятности 0,95 погрешность определения σ при $\sigma \sim 10^{-7}$ Н/м не превышает 20%. При $\sigma \sim 10^{-6}$ Н/м погрешность вычисления σ с использованием формулы (1) не превышает 15% для капель диаметром ~ 10 мкм.

Экспериментальная установка для регистрации зависимости линейных размеров деформированной микрокапли от напряженности внешнего магнитного поля собрана на базе оптического микроскопа МИМ-8м. Магнитное поле создавалось с помощью катушек Гельмгольца,

установленных на предметном столике микроскопа. Диаметр и линейные размеры деформированных микрокапель определялись как по фотографиям, так и измерялись с помощью окулярной шкалы.

Гистерезисный характер деформации магнитожидкостных микрокапель хорошо известен и впервые теоретически и экспериментально был получен на примере магнитной жидкости типа «магнетит в воде» и описан в работе [7], а для других типов магнитных жидкостей в работах [8-10]. При увеличении напряженности магнитного поля происходит сильная скачкообразная деформация микрокапли в критическом поле H_1 , которое больше, чем критическое поле H_2 , полученное при уменьшении напряженности, при котором микрокапля также скачкообразно переходит к слабодеформируемому состоянию. Однако критическое влияние на гидростатику магнитожидкостной микрокапли оказывает не только величина μ_i и изменение магнитного поля, но и величина межфазного натяжения σ . При увеличении σ , начиная со значений $\sim 10^{-6}$ Н/м, отношение a/b , характеризующее удлинение микрокапли, уменьшается, так как поверхностные силы увеличиваются, препятствуя удлинению и подавляя гистерезис. Для изучения влияния внешнего поля на величину σ исследовались образцы с начальными, полученными при наименьших значениях деформации, значениями $\sigma \sim 10^{-7}$ Н/м (образец 1); $\sim 10^{-6}$ Н/м (образец 2); $\sim 10^{-5}$ Н/м (образец 3); $\sim 10^{-4}$ Н/м (образец 4). Величина μ_i , вычисленная по скорости магнитофореза микрокапель, содержащихся в этих образцах составляла ~ 50 .

Для образца 1 с начальным значением $\sigma = 2 \cdot 10^{-7}$ Н/м получена классическая гистерезисная зависимость a/b от поля, когда начиная от значения $a/b \sim 2$ в пороговом поле H_1 микрокапля скачкообразно сильно удлиняется. Для микрокапли диаметром 4,8 мкм критическое поле скачкообразного удлинения $H_1 = 192$ А/м и стабильные состояния, в которых она имеет форму эллипсоида с отношением полуосей $1 \leq a/b \leq 1,6$, получены при $H < H_1$. В поле $H > H_1$ форма микрокапли отличается от эллипсоида и соответствует вытянутой вдоль поля иголке, для которой характерна заостренная форма торцов. Однако размагничивающий фактор формы такой сильно удлиненной микрокапли при $a/b > 10$ составляет $\sim 0,002$ независимо от формы, и значения σ , вычисленные по формуле (1) при увеличении поля, совпадают со значениями, которые были вычислены при уменьше-

нии поля, т.е. график зависимости σ от поля для образца 1 является монотонным и безгистерезисным (рисунок 1а) несмотря на гистерезисный характер зависимости a/b от поля (рисунок 1б).

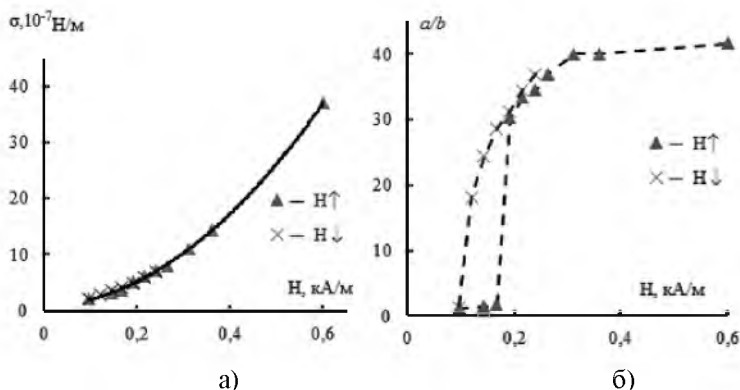


Рисунок 1 - Зависимость межфазного натяжения (а) и отношения полуосей a/b (б) от поля для образца 1

На рисунке 2 представлены полученные экспериментальные зависимости отношения полуосей микрокапли a/b (кривая 1, ось ординат справа) и межфазного натяжения σ (кривая 2, ось ординат слева) от поля для образцов 2 (рисунок 2 а) и 3 (рисунок 2 б).

Начальное значение межфазного натяжения для образца 2 составляет $\sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}$, диаметр микрокапли 13,8 мкм. Отличительной особенностью образца 2 являются стабильные состояния микрокапли при $1 \leq a/b \leq 2,6$ и постоянные значения $\sigma \sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}$ в магнитном поле от 144 А/м до 288 А/м (рисунок 2 а). В магнитном поле напряженностью от 288 А/м до 384 А/м зависимость a/b от поля является монотонной без скачкообразных изменений. Значения σ при увеличении магнитного поля от 288 А/м до 384 А/м увеличились в 1,7 раза.

Начальное значение межфазного натяжения для образца 3 составляет $\sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}$, диаметр микрокапли 9,1 мкм. Для представленных на рисунке 2 б зависимостей характерно плавное изменение, как a/b (рисунок 2 б, кривая 1), так и межфазного натяжения (рисунок 2 б, кривая 2) при увеличении напряженности внешнего поля.

По сравнению с образцом 2 микрокапли в образце 3 деформируются в области более сильных магнитных полей, что обусловлено увеличением на порядок значений межфазного натяжения. Значения

σ при увеличении магнитного поля от 1,2 кА/м до 1,9 кА/м увеличились в три раза.

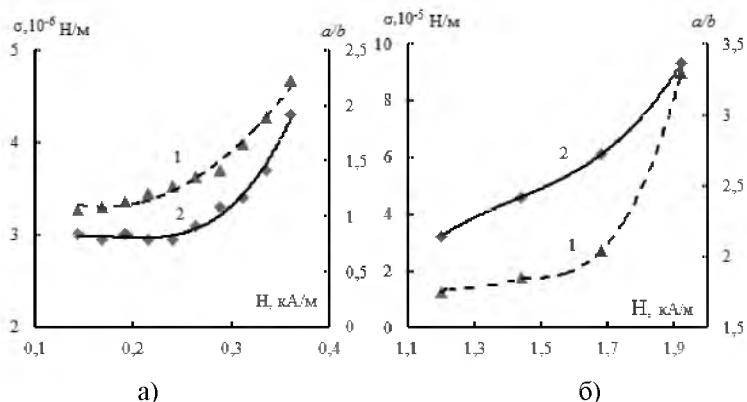


Рисунок 2 - Зависимости a/b (кривая 1) и межфазного натяжения σ (кривая 2) от напряженности магнитного поля для микрокапли диаметром 13,8 мкм, образец 2(а), и микрокапли диаметром 9,1 мкм, образец 3 (б)

На рисунке 3 показаны зависимости a/b (кривая 1) и межфазного натяжения (кривая 2) от напряженности магнитного поля для микрокапли диаметром 11,4 мкм (образец 4).

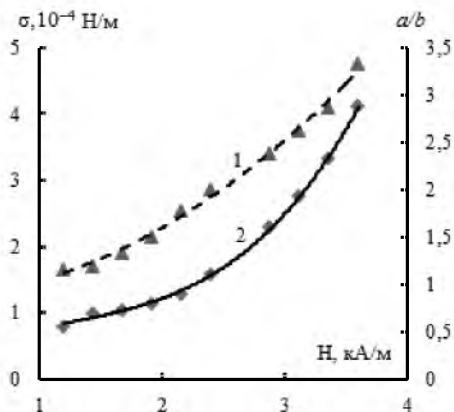


Рисунок 3 - Зависимости a/b (кривая 1) и межфазного натяжения σ (кривая 2) от напряженности магнитного поля для микрокапли диаметром 11,4 мкм, образец 4

Для образца 4 стабильные безгистерезисные состояния микрокапли получены при изменении отношения ее полуосей в диапазоне $1,16 \leq a/b \leq 3,33$. По сравнению с образцами 2 и 3 микрокапли в образце 4 деформируются в более сильных магнитных полях из-за увеличения межфазного натяжения.

Бесконтактный способ определения σ , основанный на гидростатике микрокапель, позволяет определять межфазное натяжение на границе микрокапель и окружающей их жидкости в широком диапазоне изменения σ от величины $\sim 10^{-7}$ Н/м до $\sim 10^{-4}$ Н/м с погрешностью не превышающей 20 %.

Экспериментально установлено, что с ростом напряженности внешнего магнитного поля межфазное натяжение на границе раздела магнитожидкостных микрокапель с окружающей их жидкостью может увеличиваться.

Литература:

1. А.В. Жуков. Влияние электромагнитного поля на поверхностное натяжение и устойчивость поверхностей раздела поляризующихся и намагничивающихся жидкостей // Механика жидкости и газа / Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – с. 781-783.
2. Цеберс А.О. Образование и свойства крупных конгломератов магнитных частиц // Магнитная гидродинамика. – 1983. – №3. – С.3-11.
3. Жакин А.И. О зависимости поверхностного натяжения растворов и суспензий от напряженности магнитного и электрического полей // Магнитная гидродинамика. – 1989. – № 3. – С. 75-80.
4. Голубятников А. Н. , Субханкулов Г. И. О поверхностном натяжении магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1986. – №1 – С. 73-78.
5. Чеканов В.В., Халуповский М.Д., Чуенкова И.Ю., Малютин В.В. // Магнитная гидродинамика. 1986. – №3. – С. 31.
6. S.Afkhami, A. J. Tyler, Y. Renardy, M. Renardy, T. G. St. Pierre, R. C. Woodward ANDJ. S. Riffle // J. FluidMech. – 2010. – vol. 663. – PP. 358-384.
7. J.C. Bacri, D. Salin, J. Physique-Lett. – 1983 –. 44. – L415.
8. Дроздова В. И. , Скибин Ю. Н., Шагрова Г. В. Исследование структуры разбавленных магнитных жидкостей по анизотропному рассеянию света // Магнитная гидродинамика. 1987. – № 2. – С. 63-66.