

УДК 537.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С НЕМАГНИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Нечаева О.А., Смерек Ю.Л.

*ФГОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Институт математики и естественных наук), Ставрополь, Россия (355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина,1), e-mail: smerek@mail.ru*

В работе приводятся результаты исследования электропроводности магнитной жидкости при добавлении в неё в качестве наполнителя немагнитных частиц различной формы (сферической и цилиндрической). Показано, что проводимость магнитной жидкости с немагнитным диэлектрическим наполнителем уменьшается по сравнению с проводимостью самой магнитной жидкости, что согласуется с теоретическими представлениями об электропроводности коллоидных растворов. В результате исследования влияния однородного магнитного поля на электропроводность магнитной жидкости, при добавлении в неё в качестве наполнителя немагнитных частиц сферической и цилиндрической формы, было показано, что при помещении слоя с такой композиционной средой в магнитное поле, наблюдается процесс структурообразования, который в свою очередь приводит к анизотропии проводимости. Проводимость композиционной среды повышается при помещении ячейки с исследуемой жидкостью в магнитное поле, сонаправленное с электрическим, и уменьшается при взаимноперпендикулярном направлении этих полей. Величина относительного изменения проводимости в магнитном поле зависит от объемной концентрации наполнителя и достигает 20 %.

Ключевые слова: магнитные жидкости, дисперсионная среда, коллоидный раствор, электропроводность, магнитное поле, электрическое поле.

## THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE MAGNETIC FLUID WITH NON-MAGNETIC FILLER

Nechaeva O.A., Smerek Y.L.

*North Caucasus Federal University (Institute of Mathematics and Natural Sciences), Stavropol, Russia (355009, Stavropol, Pushkin Street,1), e-mail: o\_a\_nechaeva@mail.ru*

The study results of the magnetic fluid conductivity with different (spherical and cylindrical) nonmagnetic dielectric particles have been presented in this paper. It is shown that the conductivity of the magnetic fluid with nonmagnetic dielectric particles decreases in comparison with the conductivity of the pure magnetic fluid and it conforms with the theoretical positions of the electrical conductivity of colloidal solutions. The conductivity of such a composite magnetic fluid layer in magnetic field becomes anisotropy. The conductivity of magnetic fluid with different nonmagnetic dielectric particles increases if the directions of magnetic and electric fields coincide and it decreases if their directions are perpendicular. The relative conductivity of magnetic fluid in magnetic field varies with the concentration of nonmagnetic dielectric particles and the changers can reach 20 %.

Keywords: magnetic fluids, dispersion medium, colloidal solution, electrical conductivity, magnetic field, electric field.

Известно, что воздействие на магнитные жидкости магнитного поля приводит к появлению анизотропии их макроскопических свойств [1]. Очевидно, её появление следует связывать с ориентационным упорядочиванием и взаимодействием дисперсных частиц. Вместе с тем ожидаемого существенного влияния однородного магнитного поля на электрические свойства магнитных жидкостей до настоящего времени не обнаружено. Однако положение может существенно измениться в случае добавления в магнитную жидкость дисперсного наполнителя – немагнитных частиц с достаточно большой электропроводностью. В работе [5] приводятся результаты исследований магнитных жидкостей с мелкодисперсным наполнителем – ансамблем проводящих частиц микронных

размеров. В случае воздействия магнитного поля на такую композиционную среду, вследствие намагничивания магнитной жидкости, омывающей немагнитные включения, последние могут рассматриваться как «диамагнитные» частицы, имеющие, магнитные моменты, направленные противоположно полю [6]. При этом взаимодействие и ориентация немагнитных частиц должны приводить к возникновению анизотропии ряда свойств (оптических, электрических, реологических) таких сред, что открывает новые возможности применения МЖ. В связи с этим, в настоящей работе были предприняты исследования формирования структуры в магнитной жидкости с дисперсией немагнитных включений различной формы и связанные с этими процессами особенности электрических свойств этих сред.

### **Магнитные жидкости с дисперсией немагнитных частиц сферической формы**

Магнитный момент немагнитной сферической частицы, помещенной в магнитную жидкость, находящуюся в магнитном поле, может быть найден при рассмотрении магнитостатической задачи, аналогичной электростатической для диэлектрического эллипсоида [4]. В этом случае для магнитного момента сферической дырки в неограниченном объеме магнитной жидкости справедливо выражение:

$$\mathbf{m} = -\frac{\chi}{1 + \frac{2}{3}\chi} V\mathbf{H}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость магнитной жидкости. Вследствие взаимодействия магнитных моментов происходит объединение немагнитных частиц в цепочечные структуры, при этом, в случае направления поля вдоль слоя энергия взаимодействия частиц в цепочке согласно [2] может быть представлена в виде:

$$W = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{nm^2}{d^3} \sum_1^n \frac{n-1}{i^3}, \quad (2)$$

где  $m$  – модуль магнитного момента сферы,  $d$  – диаметр сферической частицы,  $n$  – количество частиц в цепочке.

Взаимодействие частиц, принадлежащих различным цепочкам, приводит к объединению коротких цепей в более длинные, а при достаточно высокой их концентрации, и к боковому слипанию и образованию структур, подробно рассмотренных в работе [2].

Если вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль нормали к поверхности тонкого (20–40 мкм) слоя, то длина образующихся цепочек ограничивается толщиной слоя. В этом случае энергия взаимодействия двух цепочек может быть определена как суммарная энергия попарного взаимодействия частиц, принадлежащих разным цепям при учете всех комбинаций пар. Для энергии взаимодействия любой пары частиц, принадлежащих разным

цепям, с учетом одинакового направления их моментов и равенства их по величине, справедливо выражение:

$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} m^2 \sum_{i,j}^n \frac{a^2 - 2(i-j)^2 d^2}{\left(a^2 + d^2(i-j)^2\right)^{\frac{5}{2}}} . \quad (3)$$

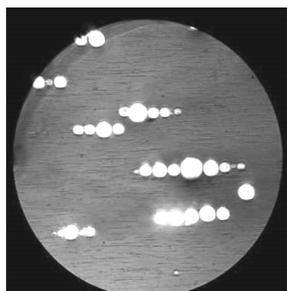
Полученное выражение стремится к минимуму при увеличении расстояния между цепочками, что дает основание сделать заключение, что взаимодействие цепочек, содержащих одинаковое число частиц и расположенных перпендикулярно тонкому слою образца, ограничивающего их продольное перемещение, в конечном итоге носит характер отталкивания.

Структурная решетка образуется при направлении напряженности магнитного поля вдоль плоскости слоя магнитной жидкости с немагнитными сферическими частицами. В этом случае, при невысокой объемной концентрации наполнителя (2–5 %), они объединяются в линейные цепи, при этом число частиц в разных цепочках может быть различным.

Расстояния между параллельно расположенными цепями также могут быть разными, т.е. такая структурная решетка не является регулярной. Таким образом, в магнитной жидкости с немагнитным наполнителем сферической формы, помещенной в магнитное поле, наблюдается образование цепочек из сферических частиц, ориентированных по направлению магнитного поля. В связи со структурообразованием в магнитной жидкости с немагнитным наполнителем должна возникнуть анизотропия других её свойств, в частности электрической проводимости.

### **Электропроводность магнитной жидкости с немагнитным непроводящим наполнителем сферической формы**

При исследовании электропроводности магнитной жидкости с частицами наполнителя сферической формы был использован образец МЖ на основе керосина, в который добавлялся порошок из пластмассовых сферических частиц. Средний диаметр частиц



*Рис. 1. Магнитная жидкость с немагнитным наполнителем сферической формы (пластмассовый) в магнитном поле, направленном вдоль слоя*

наполнителя составлял 50 мкм. Действие магнитного поля на такую среду приводит к объединению частиц в цепочки, при этом более крупные частицы располагаются в их центральной части, а более мелкие на их концах (рис. 1).

Исследование электропроводности этой композиционной среды, при помещении её в магнитное поле, значение которого достигало 15 кА/м, обнаружило

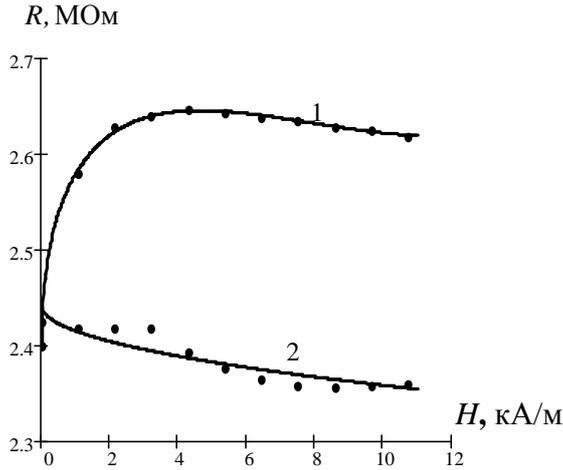


Рис. 2. Зависимость сопротивления слоя магнитной жидкости с мелкодисперсным наполнителем сферической формы от напряженности магнитного поля ( $H$ ) в случае его ориентации перпендикулярно электрическому полю ( $E$ ) (кривая 1) и в случае параллельных  $E$  и  $H$  (кривая 2)

зависимость сопротивления ячейки от величины и направления магнитного поля по отношению к электрическому (рис. 2). Оказалось, что при помещении ячейки с исследуемой композиционной магнитной жидкостью в магнитное поле, совпадающее по направлению с электрическим, наблюдается уменьшение ее сопротивления (кривая 2), при этом, его изменение по сравнению с первоначальным достигает 10 %. При взаимно перпендикулярном направлении полей, напротив, сопротивление ячейки увеличивается (кривая 1) и его

изменение по сравнению с первоначальным достигает 3 %.

Как уже отмечалось, в магнитном поле происходит объединение сферических частиц в намагниченной магнитной жидкости в цепочечные агрегаты, форма которых имеет веретенообразный вид (рис. 2), и может быть представлена в виде вытянутого вдоль магнитного поля эллипсоида. Поэтому, используя выражение [3]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{F} \quad (4),$$

в котором значение коэффициента структурного сопротивления соответствует вытянутому эллипсоиду вращения, можно оценить анизотропию проводимости магнитной жидкости с наполнителем сферической формы, помещенной в магнитное поле, в зависимости от его направления по отношению к электрическому. Для этого воспользуемся значениями коэффициента  $F$  для вытянутого эллипсоида, ориентированного большой осью, вдоль направления внешнего электрического поля (что соответствует случаю, параллельных  $E$  и  $H$ ), и перпендикулярно ему (случай взаимно перпендикулярных  $E$  и  $H$ ) [3]:

$$F_{\text{эл}} = 1 + k \frac{\varphi_H}{1 - \varphi_H}, \quad (5)$$

где  $\varphi_H$  — концентрация наполнителя, в данном эксперименте  $\varphi_H = 20 \%$ , а коэффициент  $k$  определяется выражением [3]:

$$k = \frac{1}{1 - A_j}. \quad (6)$$

В этом выражении  $A_i$  – фактор деполяризации эллипсоида. Для эллипсоида, вытянутого вдоль оси  $x$ , он определяется выражением:

$$A_x = \frac{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}{\frac{a^2}{b^2}}, \quad (7)$$

а для эллипсоида, вытянутого вдоль оси  $y$ , выражением:

$$A_y = \frac{1 - A_x}{2}, \quad (8)$$

где  $a, b$  – большая и малая полуось эллипсоида.

Тогда, подставляя в (4) выражение (5) с коэффициентом структурного сопротивления (7), можно оценить значение проводимости магнитной жидкости с агрегатами из сферических немагнитных частиц, в случае совпадения по направлению магнитного и электрического полей и соответствующее практически полной упорядоченности агрегатов по направлению магнитного поля  $\sigma_{\parallel}$ . Проведя аналогичную подстановку, но с коэффициентом структурного сопротивления (8), получим значение проводимости  $\sigma_{\perp}$  для случая взаимно перпендикулярного направления электрического и магнитного полей. Используя полученные выражения для  $\sigma_{\parallel}$  и  $\sigma_{\perp}$ , можно оценить величину анизотропии проводимости магнитной жидкости со сферическими частицами наполнителя от направления магнитного поля по формуле:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}}{\sigma}, \quad (9)$$

Значение анизотропии электропроводности  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ , посчитанное по формуле (9) с учетом экспериментально определенного среднего отношения полуосей цепочечного агрегата ( $a/b = 6,2$ ), с помощью наблюдений в оптический микроскоп оказалось равным 0,18. Экспериментально же определенное значение анизотропии составляет 0,13. Таким образом, можно сделать вывод об удовлетворительном согласии результатов эксперимента с расчетным значением.

Таким образом, в магнитной жидкости с немагнитным наполнителем, представляющим собой сферические диэлектрические частицы, в магнитном поле наблюдается анизотропия электропроводности, при этом ее величина является функцией напряженности внешнего магнитного поля. Это является основанием для вывода о возможности управления электропроводностью такой среды с помощью магнитного поля.

### Магнитные жидкости с дисперсией немагнитных частиц цилиндрической формы

Воздействие магнитного поля на магнитную жидкость со стеклянными частицами цилиндрической формы в качестве наполнителя, ориентирует их вдоль направления поля, вследствие намагничивания омывающей их магнитной среды (рис. 3).



*Рис. 3. Магнитная жидкость с немагнитными цилиндрическими частицами (стекло) в магнитном поле, направленном вдоль слоя*

Если вектор напряженности вращается вокруг перпендикулярной слою оси, то частицы также приходят во вращение с той же частотой, что и поле, но так, что ось цилиндра и направление напряженности поля образуют некоторый угол, называемый углом запаздывания.

Так, действие магнитного поля, направленного вдоль слоя с такой магнитной жидкостью, приводит к появлению анизотропного светорассеяния. В результате этого на экране появляется светлая полоса, обусловленная выстраиванием вдоль поля цилиндрических частиц. При вращении поля, вследствие распределения частиц по размерам боль-

ших полуосей, полоса расщепляется на несколько полос разной интенсивности. Измерение интенсивности этих полос позволяет определить распределение цилиндрических частиц по длине.

Таким образом, в магнитной жидкости с немагнитным наполнителем цилиндрической формы в магнитном поле происходят ориентационные процессы, что должно приводить к возникновению анизотропии не только оптических, но и других её макроскопических свойств (в частности электрофизических). Действительно, исследования электропроводности среды с цилиндрическими стеклянными частицами, длина которых изменяется от 200 до 20 мкм, а средний диаметр не превышал 2 мкм, также обнаружили её зависимость от ориентации магнитного поля по отношению к электрическому (рис. 4). В этом случае, также как и в предыдущем, при совпадении направлений электрического и магнитного поля (значение напряженности которого достигало 15 кА/м) наблюдается некоторое (около 3 %) уменьшение сопротивления (кривая 2, рис. 4). При взаимно перпендикулярном направлении полей сопротивление увеличивается на 5–6 % (кривая 1, рис. 4). Как видно из рисунка, характер зависимости сопротивления от величины магнитного поля в области его напряженностей, не превышающих 10 кА/м, близок к линейному, который, однако, изменяется в области более высоких напряженностей поля, соответствующих завершению полной ориентации цилиндрических частиц вдоль поля. Как видно из рисунков 2 и 4, наблюдается различие в характере хода кривых зависимости сопротивления для наполнителей различной формы, что, очевидно свя-

зано с формой дисперсных частиц. Можно предположить, что указанное различие связано с особенностями структурно-ориентационных процессов в исследованных образцах при наложении на них магнитного поля.

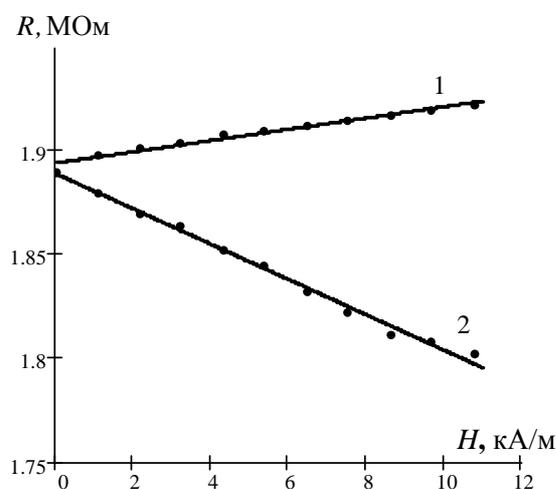


Рис. 4. Зависимость сопротивления слоя магнитной жидкости с мелкодисперсным наполнителем цилиндрической формы от напряженности магнитного поля ( $H$ ) в случае его ориентации перпендикулярно электрическому полю ( $E$ ) (кривая 1) и в случае параллельных  $E$  и  $H$  (кривая 2)

Действительно в магнитной жидкости с цилиндрическими частицами структурная анизотропия создается за счет их ориентации при воздействии поля, тогда как в случае наличия в магнитной среде сферических частиц подобная анизотропия создается за счет объединения частиц в цепочки, при этом длина последней определяется напряженностью магнитного поля.

Определение проводимости магнитной жидкости с наполнителем цилиндрической формы в случае отсутствия магнитного поля (при хаотической ориентации цилиндрических частиц наполнителя), проведенное по формуле (4), дало значение

$\bar{\sigma}_{\text{ц}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{СМ}}{\text{М}}$ . Экспериментально определенное значение проводимости составляет

$\bar{\sigma}_{\text{экс}} = 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{СМ}}{\text{М}}$ . Таким образом, для магнитной жидкости со стеклянными цилиндрическими частицами наполнителя наблюдается превышение экспериментально определенного значения проводимости над полученным расчетным путем.

Вместе с тем анизотропия проводимости исследованной среды, обусловленная воздействием магнитного поля и рассчитанная по формуле (9) дает значение 17 %, а полученная экспериментально – 9 %. Возможно, это противоречие объясняется дополнительным объединением полидисперсных цилиндрических частиц в более крупные образования с последующим их неоднородным распределением по объему измерительной ячейки.

Таким образом, в магнитной жидкости с наполнителем цилиндрической формы, помещенной в магнитное поле, наблюдается анизотропия электропроводности в зависимости от направления линий тока по отношению к силовым линиям магнитного поля.

### Список литературы

1. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига: Зинатне, 1989. – 386 с.
2. Диканский Ю.И. Дифракционное светорассеяние тонким слоем магнитной жидкости с немагнитным наполнителем // Сборник материалов VII Всероссийской конференции по магнитным жидкостям. (Плес, 1998). – Иваново, 1998. – С. 169-175.
3. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – Киев: Наук. думка, 1975. – 246 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 623 с.
5. Смерек Ю.Л. Электрическая проводимость магнитной жидкости с мелкодисперсным наполнителем в магнитном поле // Вестник СГУ. – Ставрополь. – Вып. 28. – 2001. – С. 184-187.
6. Skjltorp A. T. The American Physical Society // Phys. Review letters. – 1983. – Vol. 51. – Number 25. – P. 2306-2307.

**Рецензенты:**

Симоновский А. Я., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической физики Института математики и естественных наук СКФУ, г. Ставрополь;

Ерин К. В., д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики Института математики и естественных наук СКФУ, г. Ставрополь.