

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ОБЛАСТЯХ В КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРАХ ЧАСТИЦ МАГНЕТИТА НА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОСНОВАХ

Кульгина Л.М., Смерек Ю.Л.

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

В работе приведены результаты экспериментального исследования влияния неоднородного магнитного поля на процесс образования объемного заряда в приэлектродной области в ячейке с коллоидным раствором частиц магнетита. Показано, что механизм и величина образования объемного приэлектродного заряда оказывается зависимой от величины и взаимного расположения градиента магнитного поля и электрического поля, что позволяет сделать выводы о знаке заряда коллоидных частиц магнетита в объеме раствора. В результате экспериментального исследования влияния неоднородного магнитного поля на электропроводность магнитной жидкости, установлено, что при помещении ячейки с магнитной жидкостью в неоднородное магнитное поле происходит уменьшение сопротивления ячейки. Однако величина этого уменьшения зависит от взаимного направления градиента магнитного поля и электрического тока в ячейке; при совпадении направлений градиента магнитного поля и внешнего электрического поля сопротивление ячейки с магнитной жидкостью оказывается больше, чем при их противоположном направлении. Наиболее существенно этот эффект проявляется при малых концентрациях магнитной фазы в образце магнитной жидкости. Объяснение полученного эффекта дано на основе предложенной модели внутреннего строения магнитной жидкости, и связано с существованием заряда на частицах магнетита, образованного адсорбированными потенциалопределяющими ионами.

Ключевые слова: магнитная жидкость, электропроводность, градиент магнитного поля, коллоидный раствор, электрический ток, миграция частиц, приэлектродный объемный заряд.

## THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INHOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD ON THE FORMATION OF A VOLUME CHARGE IN THE NEAR-ELECTRODE REGIONS IN HYDROCARBON BASES COLLOIDAL SOLUTIONS OF MAGNETITE PARTICLES

Kulgina L.M., Smerek Y.L.

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

The experimental study results of the inhomogeneous magnetic field influence on the volume charge formation in the near-electrode region in magnetite colloidal solution have been presented in this paper. It is shown that the charge formation mechanism in the near-electrode region depends on the electric field intensity and the magnetic field gradient. This position allows us to identify the sign of the magnetite particles charge in the colloidal solution. The experimental study showed that the magnetic fluid resistance decreases in inhomogeneous magnetic field. However, the resistance values depend on the directions of the inhomogeneous magnetic field and electric current through the cell. If the directions of the inhomogeneous magnetic and electric fields coincide the resistance of the cell with magnetic fluid is greater than if they have opposite directions. This effect more significantly appears in low concentrated magnetite magnetic fluid. The internal structure of the magnetic fluid model is connected with the magnetite particles charge formed by potential-adsorbed ions and explains this phenomenon.

Keywords: magnetic fluids, electrical conductivity, gradient magnetic field, colloidal solution, electric current, migration of the particles, near-electrode volume charge.

Магнитные жидкости, как правило, представляют собой коллоидный раствор частиц магнетита в дисперсионной среде, которая в большинстве случаев является диэлектрической, с малым содержанием ионов примесей и молекул олеиновой кислоты в качестве

стабилизатора. В соответствии с коллоидным строением в магнитной жидкости должен наблюдаться электрофорез заряженных частиц магнетита в ячейке с магнитной жидкостью. Например, в работах [1, 3, 4] образование объемного заряда в приэлектродной области связывается с электрофорезом частиц магнетита к электроду. Вместе с тем, вопрос о влиянии электрофореза частиц магнетита на процесс электропроводности требует дополнительного исследования.

**Влияния неоднородного магнитного поля на процессы образования объемного заряда в приэлектродных областях в коллоидных растворах частиц магнетита на углеводородных основах.**

Эффективность исследования процессов образования объемного заряда в приэлектродных областях в ячейке, с магнитной жидкостью, может быть существенно повышена при осуществлении дополнительного воздействия на движущиеся под действием электрического поля заряженные частицы магнетита магнитной силы, обусловленной неоднородным магнитным полем. Как известно [2], в неоднородном магнитном поле на магнитный момент частицы магнетита действует сила, определяемая следующим выражением:

$$\mathbf{F}_M = (\mathbf{p}_M \nabla) \mathbf{B}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{p}_M$  – магнитный момент частицы магнетита.

Экспериментальные наблюдения показали, что при помещении кюветы с магнитной жидкостью на основе керосина в неоднородное магнитное поле образования разности потенциалов на электродах ячейки не наблюдалось. При смене направления градиента магнитного поля, показания приборов также не изменялись. Это указывает на тот факт, что на электроде с повышенной концентрацией магнетита наряду с накоплением заряженных частиц будет происходить накопление ионов противоположного знака. В результате этого, образования разности потенциалов между электродами ячейки может не произойти.

Напротив, появление данного эффекта возможно для магнитной жидкости с водой в качестве дисперсионной среды и электростатической стабилизацией с помощью олеата натрия в сочетании с додециламином. В таком типе магнитных жидкостей заряд частиц магнетита, образованный адсорбированными потенциалопределяющими ионами, может иметь значительно большую величину, чем в магнитных жидкостях на углеводородных основах. Движение заряженных частиц магнетита происходит в дисперсионной среде, вязкость которой оказывается меньше, чем в случае магнитной жидкости с углеводородной дисперсионной средой, что способствует разделению заряженных частиц с их ионной атмосферой. Кроме того, диэлектрическая проницаемость воды намного больше, чем у

керосина, что также приводит к уменьшению связи между зарядом частиц и ионной атмосферы.

Проведенные исследования магнитной жидкости с водой в качестве дисперсионной среды, показали, что разность потенциалов на электродах ячейки, обусловленная химическими реакциями, достигает значений порядка 100 мВ. В конкретно рассматриваемом случае разность потенциалов при отсутствии магнитного поля составляла 94,5 мВ. При помещении кюветы с магнитной жидкостью на воде в неоднородное магнитное поле показания вольтметра увеличивались до значения 98,5 мВ. При смене направления градиента магнитного поля разность потенциалов на электродах уменьшалась до значения 88,1 мВ. На основании этих результатов можно сделать вывод, что в магнитной жидкости на воде, помимо разности потенциалов, связанной с реакциями на электродах, наблюдается образование разности потенциалов за счет действия неоднородного магнитного поля.

В работе [5] авторами предложено соотношение, характеризующее напряженность  $E'$  электрического поля, возникающего в ферроколлоиде с заряженными дисперсными частицами, помещенными в неоднородное магнитное поле. Направление электрического поля зависит от знака заряда коллоидной частицы. Вместе с тем отмечено, что измерение напряженности поля  $E'$  в магнитной жидкости связано с большими трудностями вследствие плохо контролируемой поляризации электродов. Экспериментальное определение величины разности потенциалов, возникающей в магнитной жидкости на основе электролита, показало, что знак разности потенциалов не зависит от направления магнитного поля, но с изменением направления  $\text{grad } H^2$  меняется на противоположный. По знаку разности потенциалов определен знак заряда частицы магнетита в электролите: он оказался отрицательным.

Несмотря на отрицательный результат, полученный в эксперименте по определению разности потенциалов на электродах ячейки с магнитной жидкостью на основе керосина, магнитофоретическое движение частиц магнетита может проявиться при прохождении электрического тока в ячейке, созданного внешним источником. Действительно, в этом случае возможно пространственное разделение противоиона и заряженной частицы магнетита. В этом случае заряженные частицы магнетита движутся под действием внешнего электрического поля в одном направлении (к соответствующему электроду), а противоионы в другом.

С целью выяснения возможности изменения силы тока, за счет действия неоднородного магнитного поля была исследована зависимость сопротивления ячейки с магнитной жидкостью от величины и направления градиента магнитного поля при различных значениях концентрации магнитной фазы в магнитной жидкости.

Измерения проводились с помощью цифрового омметра типа Щ34. Погрешность измерений составляла не более 3 %. Для исследования влияния магнитного поля на электропроводность исследуемой среды, ячейка помещалась в намагничивающуюся систему, позволяющую получать магнитное поле до 10 кА/м. Напряженность магнитного поля контролировалась по входному току и градуировочной кривой с погрешностью не более 4 %.

Однородное магнитное поле создавалось с помощью пятисекционной кубической катушки, соотношение витков в секциях которой составляло 19:4:10:4:19, а ее размеры значительно превышали размеры ячейки.

В качестве объекта исследования использовалась магнитная жидкость на основе керосина с концентрацией магнитной фазы  $\phi = 17,1\%$  и  $\phi = 2\%$ . Зависимость сопротивления магнитной жидкости от величины и направления градиента магнитного поля при концентрации магнитной фазы  $\phi = 17,1\%$  представлена на рисунке 1.

Из рисунка видно, что кривая зависимости сопротивления магнитной жидкости от величины градиента магнитного поля проходит через максимум. Отметим, что смена условий от  $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$  к  $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$  в эксперименте достигались сменой направления градиента магнитного поля.

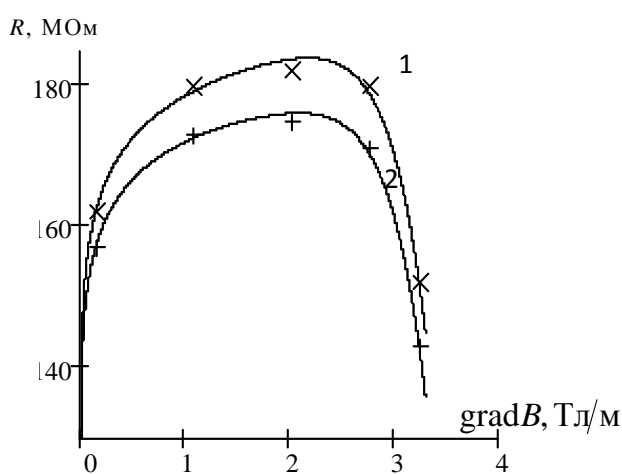


Рис. 1. Зависимость сопротивления ячейки с магнитной жидкостью с объемной концентрацией  $\phi = 17,1\%$  от градиента неоднородного магнитного поля: 1 –  $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$ , 2 –  $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$ .

Как видно из рисунка 1, сопротивление ячейки с магнитной жидкостью при большой концентрации магнитной фазы ( $\phi = 17,1\%$ ) зависит от направления градиента неоднородного магнитного поля по отношению к электрическому полю.

При этом при совпадении направлений градиента магнитного поля и внешнего электрического поля ( $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$ ) сопротивление ячейки с магнитной жидкостью

оказывается больше (кривая 1), чем при их противоположном ( $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$ ) направлении (кривая 2). Изменение сопротивления ячейки с магнитной жидкостью с концентрацией магнитной фазы  $\varphi = 17,1\%$  в первом и во втором случаях, отнесенное к сопротивлению ячейки в отсутствии магнитного поля, составляет 4,3 %, при концентрации  $\varphi = 2\%$  это отношение равно 14 %.

С другой стороны, достижение условий  $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$  и  $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$  в эксперименте возможно и сменой полярности на электродах ячейки. В этом случае, вид зависимостей сопротивления ячейки с магнитной жидкостью ( $\varphi = 17,1\%$ ) от величины градиента магнитного поля при различном его направлении по отношению к электрическому, несколько иной (рисунок 2).

При этом, так же как и в предыдущем случае, при совпадении направлений градиента магнитного поля и внешнего электрического поля ( $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$ ) сопротивление ячейки с магнитной жидкостью оказывается больше (кривая 1), чем при их противоположном ( $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$ ) направлении (кривая 2). Однако из графика видно, что характер кривой 2 в этом случае существенно отличается от аналогичной кривой, представленной на рис. 1.

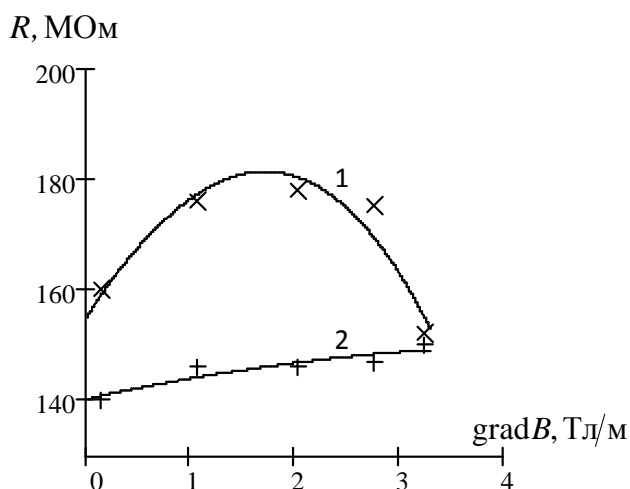


Рис.2. Зависимость сопротивления ячейки с магнитной жидкостью с объемной концентрацией  $\varphi = 17,1\%$  от градиента неоднородного магнитного поля:

1 –  $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$ , 2 –  $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$ .

Очевидно, что это отличие связано с разрушением приэлектродного слоя повышенной концентрации магнитной фазы и объемного заряда вблизи электродов.

Таким образом, при помещении ячейки с магнитной жидкостью в неоднородное магнитное поле происходит уменьшение сопротивления ячейки. Однако величина этого уменьшения зависит от взаимного направления градиента магнитного поля и электрического

тока в ячейке. В случае совпадения по направлению вектора напряженности электрического поля и градиента магнитного поля ( $\text{grad } B \uparrow \uparrow \mathbf{E}$ ), сопротивление ячейки с магнитной жидкостью оказывается больше, чем при их противоположном направлении ( $\text{grad } B \uparrow \downarrow \mathbf{E}$ ).

Относительное изменение сопротивления ячейки с магнитной жидкостью при различном направлении градиента магнитного поля по отношению к электрическому, оказывается более существенным при малых концентрациях магнитной фазы.

При объяснении зависимости электрической проводимости магнитной жидкости от величины и направления градиента магнитного поля следует учитывать, что в неоднородном магнитном поле на частицы магнетита действует сила (1), благодаря которой частицы магнетита стремятся переместиться в область более сильного поля. В зависимости от заряда частицы магнетита, обусловленного потенциалопределяющими ионами, этот процесс будет способствовать движению заряда, переносимого частицами магнетита, или противодействовать ему. При этом на ионы диффузной части ДЭС магнитное поле не влияет (действие силы Лоренца пренебрежимо мало по сравнению с электростатической). Проведенный в соответствии с вышеуказанным анализ экспериментально полученных зависимостей, представленных на рисунке 1, 2, позволяет заключить, что заряд частиц магнетита должен быть отрицательным.

Следует отметить, что результаты проведенных экспериментальных исследований указывают на то, что частицы магнетита несут на себе заряд адсорбированных ионов, и электрофорез заряженных частиц магнетита оказывает влияние на процесс электропроводности магнитной жидкости. То есть, процесс переноса заряда в магнитной жидкости осуществляется, в том числе, и миграцией заряженных частиц магнетита во внешнем электрическом поле. При этом вклад в процесс переноса заряда электрофореза частиц магнетита более существенен при малых концентрациях дисперсной фазы. При больших концентрациях миграция заряженных частиц магнетита затрудняется, и процесс электропроводности обеспечивается за счет других механизмов.

### Список литературы

1. Бондаренко, Е. А. Механизм формирования многослойной структуры магнитной жидкости в приэлектродной области: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ставрополь, 2001 г. – 19 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 623 с.

3. Морозова Т. Ф. Формирование структуры в магнитной жидкости при воздействии поляризующего напряжения: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ставрополь, 2002. – 23 с.
4. Падалка В. В. Взаимодействие коллоидных магнитных частиц с электрическим и магнитным полями: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Ставрополь, 2004 г. – С. 78-86.
5. Чеканов В. В., Кандаурова Н. В., Бондаренко Е. А. Магнитоседиментационный потенциал в коллоидном магнетике // Вестник СГУ. – Ставрополь: СГУ, 2004. – Вып. 38. – С.85 – 87.

**Рецензенты:**

Диканский Ю.И., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей физики Института математики и естественных наук СКФУ, г. Ставрополь;

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