

01;03

Электрокинетические явления в магнитной жидкости на основе керосина

© А.Р. Закинян, Ж.Г. Вегера, О.В. Борисенко

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru

(Поступило в Редакцию 18 апреля 2011 г.)

Предложены методики для исследования электрокинетических явлений в магнитных коллоидных системах (магнитных жидкостях), позволяющие использовать наличие магнитных свойств у частиц дисперсной фазы. Изучены электрофорез и потенциал седиментации в магнитной жидкости на основе керосина. Показано, что в исследованной магнитной жидкости лишь небольшая часть (примерно одна тысячная) всех дисперсных частиц является электрически заряженной, при этом знак заряда частиц отрицательный.

Введение

Магнитная жидкость представляет собой устойчивую коллоидную систему ферро- и ферромагнитных наночастиц, взвешенных в несущей жидкости. Появление новых и развитие уже известных применений магнитных жидкостей в различных отраслях техники обуславливает интерес к исследованию электрических свойств данных сред. При этом большое значение имеет изучение механизмов переноса заряда в магнитных жидкостях и особенностей протекания в них электрокинетических явлений. Достаточно подробно вопросы о механизмах переноса заряда, величине и знаке заряда коллоидных частиц и особенностях электрокинетических явлений исследованы в отношении магнитных жидкостей на водной основе, в которых осуществляется электростатический механизм стабилизации. Так, например, результаты систематических исследований явления электрофореза в магнитной жидкости на водной основе, стабилизированной различными электролитами, и библиография по данному вопросу приведены в [1,2]. В работах [3,4] приводятся результаты исследований потенциала седиментации в таких средах.

В противоположность водным магнитным жидкостям механизм переноса заряда в магнитных жидкостях на углеводородных основах изучен недостаточно. Стабилизация таких коллоидов осуществляется за счет образования на частицах дисперсной фазы адсорбционных слоев молекул поверхностно активных веществ (ПАВ), при этом концентрация свободных носителей заряда в данных средах, как правило, весьма мала. Однако в углеводородных магнитных жидкостях все же имеет место наличие некоторого количества примесных ионов, которые могут быть причиной зарядки частиц дисперсной фазы и обуславливать протекание электрокинетических явлений. Наличие примесных ионов обычно связывают с неполной десорбцией ионов с поверхности дисперсных частиц в процессе отмывки после их получения по методу химической конденсации [5].

Несмотря на то что наличие примесных ионов в углеводородной магнитной жидкости не вызывает сомнений, в современной литературе нет единого мнения о

механизме переноса заряда в такой среде, возможности протекания в ней электрокинетических явлений, а также данных о величине и знаке заряда коллоидных частиц. Так, в [5] на основании обобщения различных опытных данных делается заключение, что перенос заряда в углеводородной жидкости осуществляется исключительно за счет движения свободных ионов в дисперсионной среде. Напротив, результаты электрических [6] и оптических [7] измерений позволили авторам указанных работ сделать вывод, что перенос заряда в таких магнитных жидкостях осуществляется как за счет движения свободных ионов, так и в значительной степени за счет движения заряженных дисперсных частиц. При этом в [6,7] рассматривается модель, предполагающая, что зарядом могут обладать все частицы дисперсной фазы, причем в равных количествах присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы. В работе [8] на основе измерений комплексного импеданса ячейки с магнитной жидкостью авторы делают вывод, что в процессе переноса заряда помимо свободных ионов некоторый вклад вносят также заряженные коллоидные частицы, однако никаких сведений о степени этого вклада, величине и знаке заряда частиц не приводится.

В работах [9,10] авторы предлагают модель, в которой все коллоидные частицы являются отрицательно заряженными, что позволило им объяснить полученные результаты проведенных ими измерений диэлектрической проницаемости магнитной жидкости. Однако в работах [11,12], посвященных исследованию оптической прозрачности магнитной жидкости в электрическом поле, сделан вывод, что коллоидные частицы вовсе не заряжены и могут приобретать заряд, лишь находясь вблизи электродов. В отличие от указанных работ в [4] на основании данных измерений электропроводности углеводородной магнитной жидкости и предложенной теоретической модели сделан вывод, что лишь одна тысячная всех коллоидных частиц обладает зарядом, и знак заряда отрицательный.

Отмеченные противоречия в оценках механизма переноса заряда в углеводородных магнитных жидкостях могут быть разрешены путем непосредственного исследова-

дования закономерностей протекания электрокинетических явлений в данных средах. Такие исследования ранее осуществлялись весьма ограничено и носили косвенный характер. В настоящей работе предложены методики исследования электрофореза и потенциала седиментации в магнитных жидкостях, позволяющие использовать специфику данных коллоидных систем, которая заключается в наличии сильных магнитных свойств у частиц дисперсной фазы. В качестве объекта исследования была исследована магнитная жидкость на основе керосина с диспергированными в нем частицами магнетита и олеиновой кислотой в качестве стабилизатора (производство НИПИ Газпереработка, Краснодар).

Электрофорез

Наличие электрического заряда у коллоидных частиц магнитной жидкости должно обуславливать явление электрофореза в данной среде. Исследования скорости электрофоретического движения частиц позволяют определить их электрокинетический потенциал, а также величину и знак заряда.

Для изучения электрофореза в магнитной жидкости использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Она состоит из цилиндрической стеклянной горизонтальной трубки 1 длиной 10 см и внутренним диаметром 1 см, на концах которой расположены два медных дисковых электрода 2. Трубка заполнена исследуемой магнитной жидкостью. Снаружи на трубку 1 намотаны две катушки индуктивности 3 длиной 4 мм, расположенные непосредственно вблизи электродов. Вся система помещается в термостатирующую рубашку 4, через которую прокачивается вода при температуре около 10°C. На электроды подается постоянное напряжение 15 kV от источника 5. Следуя работе [13], данную величину электрического поля можно отнести к области низких полей, в которой можно

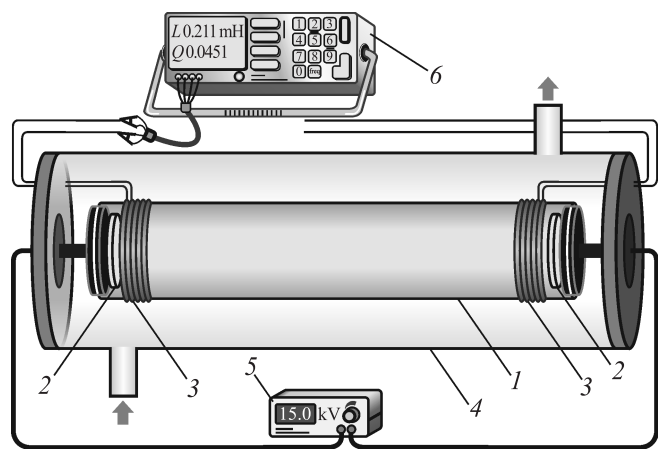


Рис. 1. Установка для изучения электрофореза в магнитной жидкости: 1 — трубка с магнитной жидкостью, 2 — электроды, 3 — катушки индуктивности, 4 — термостатирующая рубашка, 5 — источник постоянного высоковольтного напряжения, 6 — измерительный мост.

пренебречь явлениями инжекции зарядов с поверхности электродов, развитием электрогидродинамических течений и другими процессами, способными осложнить картину зарядопереноса в жидком неполярном диэлектрике и повлиять на излучение электрокинетических явлений. Величина индуктивности катушек 3 измеряется при помощи моста переменного тока 6. В опытах применялся цифровой измерительный мост „LCR Meter-817“ с частотой измерительного сигнала 1 kHz. Величина измерительного магнитного поля катушек достаточно мала (напряженность ~ 50 A/m), и его влиянием на любые существенные для рассматриваемого случая процессы можно пренебречь.

В случае если в магнитной жидкости имеет место электрофоретическое движение дисперсных частиц, их концентрация вблизи электродов будет изменяться. При этом, поскольку частицы обладают сильными магнитными свойствами, должна также изменяться индуктивность катушек 3, по результатам измерения которой и может быть определен электрокинетический потенциал.

Были проведены измерения для трех образцов магнитных жидкостей с объемной концентрацией дисперсной фазы $c = 6.6, 3$ и 1% . Образцы с меньшей концентрацией были получены путем разбавления исходной магнитной жидкости чистым керосином. Измерялась зависимость индуктивности L катушек, расположенных вблизи положительного и отрицательного электродов, от времени, начиная с момента подачи электрического напряжения. Измерения проводились с интервалом 10 min. В результате было обнаружено, что индуктивность L катушки, расположенной вблизи положительного электрода, с течением времени возрастает, тогда как индуктивность катушки, находящейся около отрицательного электрода, уменьшается. В качестве примера на рис. 2 представлены экспериментальные зависимости относительного изменения индуктивностей измерительных катушек от времени действия электрического поля, полученные для магнитной жидкости с концентрацией дисперсной фазы 3%. Как видно, наблюдается практически симметричное изменение величин индуктивностей катушек, расположенных вблизи положительного и отрицательного электродов. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в исследуемой магнитной жидкости имеет место электрофоретическое движение частиц дисперсной фазы, сами частицы при этом несут отрицательный заряд. Зависимости, полученные для других значений концентрации магнитной жидкости, имеют аналогичный вид и представлены на рис. 3, где приведены соответствующие значения относительного изменения со временем индуктивности катушки, находящейся вблизи положительного электрода. Проведенные опыты повторялись трижды, в итоге были получены результаты, количественно отличающиеся друг от друга в пределах 7%.

Найдем скорость электрофоретического движения коллоидных частиц магнитной жидкости, считая ее одинаковой для всех частиц. Для этого рассмотрим

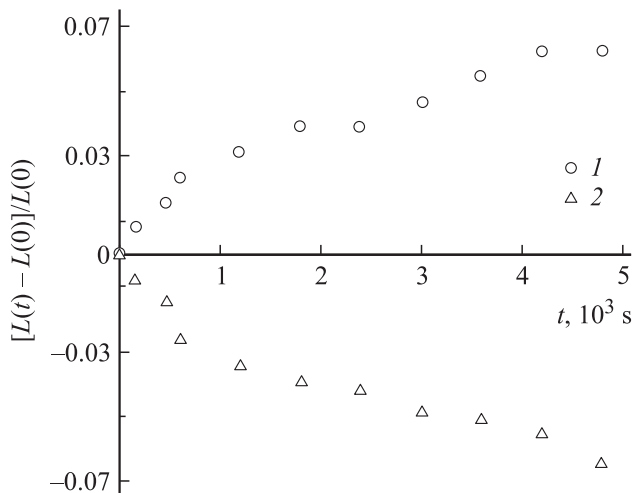


Рис. 2. Относительное изменение индуктивности измерительных катушек, расположенных вблизи положительного (1) и отрицательного (2) электродов.

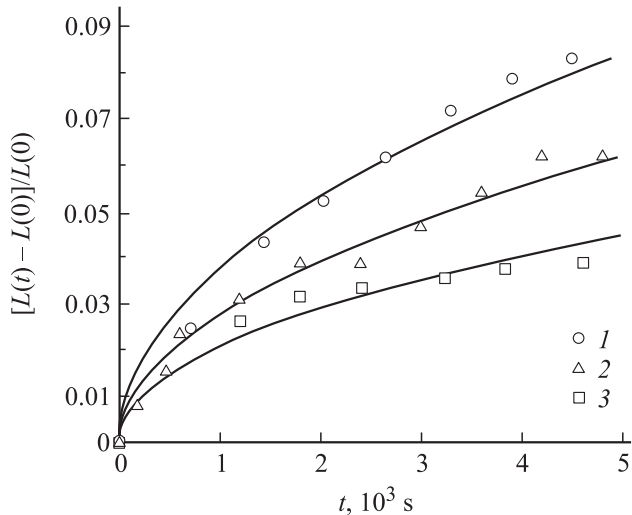


Рис. 3. Относительное изменение индуктивности катушки, расположенной вблизи положительного электрода, для разных значений объемной концентрации магнитной жидкости. Точки — экспериментальные данные, сплошные линии — теоретические зависимости. 1 — $c = 6.6$; 2 — 3; 3 — 1%.

изменение концентрации частиц в некоторой точке. Выберем начало координат на положительном электроде и направим ось x от электрода перпендикулярно его плоскости. Скорость электрофоретического движения частиц v направлена к электроду и противоположна оси x . Результирующий поток частиц будет определяться электрофорезом и диффузией частиц, тогда плотность потока частиц может быть записана в виде

$$j = -nv - D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1)$$

где n — числовая концентрация частиц дисперсной фазы, $D = kT/3\pi\eta d$ — коэффициент диффузии, k —

постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, η — динамическая вязкость дисперсионной среды, d — диаметр частиц дисперсной фазы. Учтем, что должно выполняться уравнение непрерывности

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим

$$\frac{\partial n}{\partial t} = v \frac{\partial n}{\partial x} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет вид уравнения Фоккера–Планка и путем введения новой переменной $z = x + vt$ может быть преобразовано к виду уравнения диффузии

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial z^2}. \quad (4)$$

С учетом начального условия

$$n(x, 0) = n_0 \quad \text{при} \quad x > 0$$

решение уравнения (4) может быть представлено в виде [14]

$$n(z, t) = n_0 \left[1 + \Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) \right], \quad (5)$$

где

$$\Phi(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\alpha \exp(-\xi^2) d\xi,$$

n_0 — числовая концентрация частиц дисперсной фазы в отсутствие электрического поля. Переходя в (5) к исходным переменным, а также учитывая, что нас интересует изменение концентрации частиц в непосредственной близости к электроду ($x = 0$), уравнение, определяющее зависимость концентрации частиц от времени, окончательно запишем в виде

$$n(t) = n_0 \left[1 + \Phi \left(\frac{v}{2} \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right]. \quad (6)$$

Далее найдем связь относительного изменения индуктивности катушки, измерявшегося в экспериментах, с изменением концентрации дисперсных частиц. Очевидно, что $L = p(1 + \chi)$, где χ — магнитная восприимчивость магнитной жидкости, p — некоторый коэффициент пропорциональности, тогда

$$\frac{L(t) - L(0)}{L(0)} = \frac{\chi(t) - \chi(0)}{1 + \chi(0)}. \quad (7)$$

Пренебрежем полидисперсностью магнитной жидкости и будем считать, что все частицы фазы имеют сферическую форму. Тогда в слабых магнитных полях

восприимчивость магнитной жидкости будет определяться формулой Ланжевена [5]

$$\chi = \frac{\pi^2}{108} \frac{\mu_0 M_s^2}{kT} d^6 n, \quad (8)$$

где M_s — намагниченность насыщения материала коллоидных частиц (в данном случае магнетита), μ_0 — магнитная постоянная. Подставляя (8) в (7), получим выражение, связывающее относительное изменение индуктивности катушки с изменением концентрации частиц дисперсной фазы,

$$\frac{L(t) - L(0)}{L(0)} = \frac{n(t) - n_0}{n_0 + \frac{108kT}{\pi^2 \mu_0 M_s^2 d^6}}, \quad (9)$$

где $n(t)$ определяется выражением (6).

Сравнивая рассчитанную, согласно (9), зависимость с результатами измерений, можно определить величину скорости электрофоретического движения частиц, подбирая ее таким образом, чтобы добиться наилучшей аппроксимации экспериментальных данных зависимостью (9). На рис. 3 сплошными линиями показаны соответствующие теоретические зависимости для трех значений концентрации магнитной жидкости, рассчитанные при следующих значениях скорости электрофоретического движения частиц: $v = 2.1 \cdot 10^{-8}$ м/с для $c = 6.6\%$; $v = 2.6 \cdot 10^{-8}$ м/с для $c = 3\%$; $v = 4.7 \cdot 10^{-8}$ м/с для $c = 1\%$. При расчетах использованы следующие значения параметров, входящих в выражения: $\eta = 2$ мПа·с; $d = 10$ нм; $M_s = 480$ кА/м.

Зная величину электрофоретической скорости дисперсных частиц, нетрудно рассчитать значение электрокинетического потенциала, воспользовавшись для этого уравнением Гельмгольца–Смолуховского, связывающим эти величины [15]. Поскольку для исследуемой магнитной жидкости на основе керосина выполняется условие $\kappa d \ll 1$, где κ — величина, обратная дебаевскому радиусу экранирования, то уравнение для электрокинетического потенциала запишется в виде

$$\xi = \frac{3\eta v}{2\epsilon\epsilon_0 E}, \quad (10)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды, ϵ_0 — электрическая постоянная, E — напряженность электрического поля. Подставляя в (10) найденные выше значения электрофоретической скорости, получим следующие значения величины электрокинетического потенциала: $\xi = 0.02$ мВ для $c = 6.6\%$, $\xi = 0.03$ мВ для $c = 3\%$, $\xi = 0.05$ мВ для $c = 1\%$. Расчет был выполнен при следующих значениях параметров ϵ и E : $\epsilon = 2$; $E = 150$ кВ/м.

Как видно из полученных результатов, при уменьшении концентрации электрокинетический потенциал увеличивается. Если пренебречь возможной десорбцией потенциалобразующих ионов с поверхности частиц дисперсной фазы при разбавлении дисперсионной средой, то в пределе бесконечно малой концентрации можно считать электрокинетический потенциал примерно

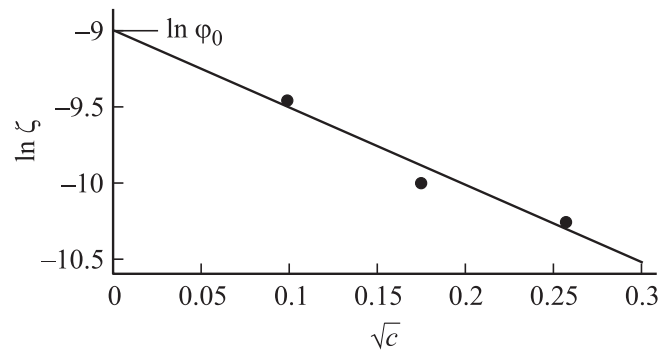


Рис. 4. Зависимость электрокинетического потенциала от концентрации магнитной жидкости.

равным потенциалу поверхности частицы [16]. В этом случае зависимость электрокинетического потенциала от концентрации $\xi(c)$ можно линеаризовать, перейдя к координатам $\ln \xi(\sqrt{c})$. Аппроксимируя экспериментальные данные линейной зависимостью и экстраполируя ее до пересечения с осью $\ln \xi$, найдем значение потенциала поверхности коллоидных частиц магнитной жидкости $\phi_0 = 0.12$ мВ (рис. 4).

Полученное значение потенциала поверхности дисперсной частицы позволяет оценить величину ее заряда при использовании выражения

$$q = 2\pi\epsilon\epsilon_0\phi_0 d. \quad (11)$$

Расчет по формуле (11) дает значение $q = 1.4 \cdot 10^{-22}$ С. Сравнение данного результата с величиной элементарного заряда показывает, что в исследуемой магнитной жидкости лишь примерно одна из тысячи частиц может обладать электрическим зарядом. Отметим, что данный вывод совпадает со сделанным ранее в работе [4].

Потенциал седиментации

Наличие заряда у коллоидных частиц магнитной жидкости на основе керосина должно обуславливать и другие электрокинетические явления в данной среде, в частности можно ожидать возникновение в ней седиментационной разности потенциалов.

Для исследования потенциалов седиментации в магнитной жидкости была использована установка, схема которой представлена на рис. 5. Она состоит из вертикальной стеклянной цилиндрической трубки 1 длиной 10 см и внутренним диаметром 1 см, на концах которой расположены два медных дисковых электрода 2. Трубка заполнена исследуемой магнитной жидкостью и помещена в неоднородное магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом 3. Градиент магнитного поля направлен вертикально вниз и совпадает с направлением силы тяжести, что способствует значительной интенсификации процесса седиментации дисперсных частиц магнитной жидкости. К электродам 2 подключен цифровой

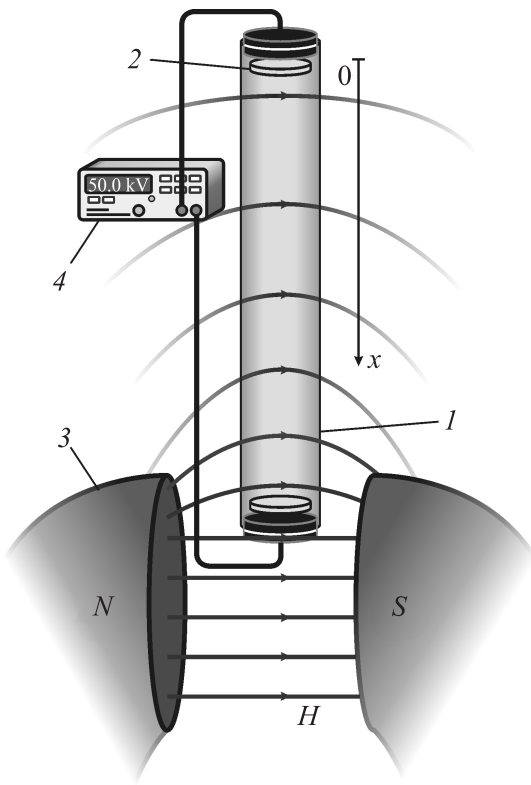


Рис. 5. Установка для изучения потенциала седиментации в магнитной жидкости: 1 — трубка с магнитной жидкостью, 2 — электроды, 3 — постоянный магнит, 4 — вольтметр.

вольтметр 4 для измерения величины седиментационного потенциала. Опыты проводились с теми же образцами магнитных жидкостей, что и описанные выше опыты по электрофорезу.

Проведенные эксперименты показали, что в исследуемой магнитной жидкости на основе керосина действительно имеет место возникновение потенциала седиментации. При этом знак возникающей разности потенциалов подтверждает вывод, сделанный в предыдущем разделе работы, о том, что коллоидные частицы заряжены отрицательно. Однако наблюдающаяся величина потенциала седиментации оказывается весьма мала. Так, при измерении потенциала седиментации для магнитной жидкости с объемной концентрацией дисперсной фазы 1% было получено значение 50 ± 20 мВ. Отметим, что стационарное значение потенциала седиментации в проведенных экспериментах устанавливалось за время около 2 ч. Для других концентраций магнитной жидкости были получены значения седиментационного потенциала, отличающиеся от указанного в пределах ошибки измерений. Выполним оценку величины электрокинетического потенциала на основе полученных данных.

Уравнение Гельмгольца–Смолуховского для расчета электрокинетического потенциала через потенциал се-

диментации имеет вид [16]

$$\xi = \frac{\eta \lambda U}{\varepsilon \varepsilon_0 F l}, \quad (12)$$

где U — установившееся значение седиментационной разности потенциалов, λ — удельная электрическая проводимость дисперсионной среды, l — расстояние между электродами, F — результирующая сила, действующая на частицы дисперсной фазы, находящиеся в единице объема коллоида. Величина F будет складываться из силы тяжести и силы со стороны магнитного поля. Направим ось x , как показано на рис. 5, и будем считать магнитную жидкость монодисперсной, тогда выражение для F запишется в виде

$$F = \frac{1}{6} \pi d^3 n_0 \left(g(\rho_1 - \rho_2) + \mu_0 M_s \frac{\partial H}{\partial x} \right),$$

где ρ_1 — плотность вещества частиц дисперсной фазы (в рассматриваемом случае магнетита), ρ_2 — плотность дисперсионной среды (керосина), H — напряженность магнитного поля. На рис. 6 представлены зависимость величины напряженности магнитного поля от расстояния до верхнего электрода и зависимость от расстояния величины градиента магнитного поля, имевшие место в экспериментах. Как видно из рисунка, градиент магнитного поля изменяется вдоль высоты трубки с магнитной жидкостью, поэтому в расчетах используем среднее значение градиента, равное $\overline{\partial H / \partial x} = (H(l) - H(0)) / l = 8.4 \cdot 10^5$ А/м². Тогда выражение для электрокинетического потенциала окончательно запишем в виде

$$\xi = \frac{6 \eta \lambda U}{\pi \varepsilon \varepsilon_0 d^3 n_0 l (g(\rho_1 - \rho_2) + \mu_0 M_s \overline{\partial H / \partial x})}. \quad (13)$$

Расчет по формуле (13) дает для магнитной жидкости с объемной концентрацией дисперсной фазы 1% значение электрокинетического потенциала, равное 0.01 мВ.

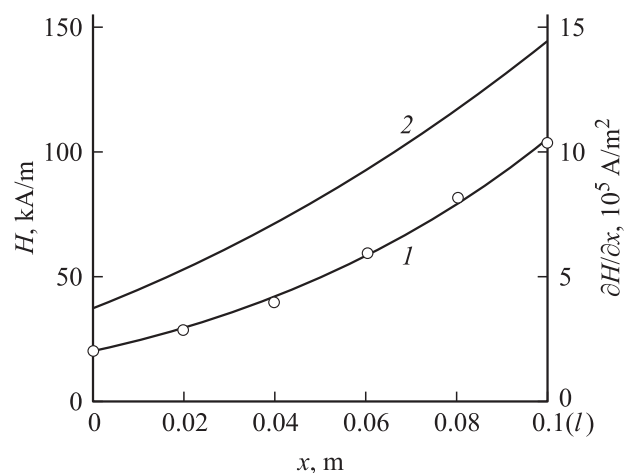


Рис. 6. Зависимость напряженности магнитного поля постоянного магнита (1) и градиента напряженности магнитного поля (2) от расстояния до верхнего электрода.

Вычисления были выполнены при следующих значениях параметров, входящих в выражение (13): $\lambda = 10^{-9}$ S/m, $l = 10$ cm, $\rho_1 = 5240$ kg/m³, $\rho_2 = 770$ kg/m³.

Это значение имеет тот же порядок величины, что и полученное ранее для данной жидкости электрофоретическим методом, хотя и отличается от него в несколько раз. Как уже было указано выше, наблюдающаяся величина потенциала седиментации весьма мала, что затрудняет выполнение точных измерений, которые при этом осложняются возникающей в системе контактной разностью потенциалов и температурными флуктуациями, влияние которых на рассматриваемые процессы трудно учесть или устранить. С учетом этого такое совпадение можно рассматривать как довольно убедительное качественное подтверждение результатов, полученных в предыдущем разделе работы.

Обсуждение результатов

На основании проведенных исследований электрофореза и потенциала седиментации в магнитной жидкости на основе керосина был получен результат, подтверждаемый обоими этими явлениями и состоящий в том, что лишь небольшая часть коллоидных частиц в магнитной жидкости обладает электрическим зарядом отрицательного знака. Следует отметить, что вычисленные значения электрокинетического потенциала коллоидных частиц получены при допущении ряда упрощений, которые, безусловно, снижают точность данных результатов. Помимо уже упоминавшихся к основным таким допущениям следует отнести пренебрежение полидисперсностью магнитной жидкости, а также использование для расчета магнитной восприимчивости формулы Ланжевена (8), которая хорошо описывает реальные свойства магнитной жидкости только при малых значениях концентрации. Достаточно грубым являются также примененные методы оценки потенциала поверхности и заряда частиц. Возможно, более подробный учет всех этих факторов может дать несколько иные значения электрокинетического потенциала и заряда частиц, однако можно рассчитывать, что это не повлияет на принципиальные результаты и выводы исследования.

Результаты, содержащиеся в исследованиях других авторов и отличающиеся от полученных в настоящей работе, могут объясняться различием технологического процесса получения магнитных жидкостей, в частности, разной степенью отмывки коллоидных частиц после их синтеза и соответственно различным содержанием примесных ионов. Так, в достаточно качественно приготовленной магнитной жидкости доля заряженных частиц может быть столь мала, что не будет оказывать заметного влияния на ее свойства, и, напротив, при недостаточной отмывке доля заряженных частиц может оказаться гораздо больше, чем указывается в настоящей работе. При этом полученные здесь результаты не исключают потенциальной возможности зарядение

коллоидных частиц непосредственно в приэлектродной области, на что указывается в некоторых исследованиях. Идея о том, что в магнитной жидкости изначально присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные коллоидные частицы, по-видимому, является следствием не вполне корректной интерпретации результатов экспериментальных исследований. В заключение отметим, что полученные в работе результаты могут способствовать созданию более последовательной картины электромагнитных явлений в магнитных жидкостях на углеводородных основах и послужить более адекватному описанию электрических свойств данных сред. Так, в частности, полученные результаты могут быть применены при изучении ряда интересных эффектов, имеющих место в магнитных жидкостях и проявляющихся в образовании в них упорядоченных структур под действием электрического поля, на что указывается в ряде работ [17–21].

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-02-90019-Бел_а), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ведомственной аналитической научно-технической программы „Развитие научного потенциала высшей школы“.

Список литературы

- [1] *d'Orlye F., Varenne A., Gareil P.* // *Electrophoresis*. 2008. Vol. 29. P. 3768–3778.
- [2] *Sestier C., Da-Silva M.F., Sabolovic D., Roger J., Pons J.N.* // *Electrophoresis*. 1998. Vol. 19. P. 1220–1226.
- [3] *Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Бондаренко Е.А.* // *Вестн. Ставропольского гос. ун-та*. 2004. Вып. 38. С. 85–90.
- [4] *Смерек Ю.Л.* Автореф. канд. дис. Ставрополь: Ставропольский гос. ун-т, 2006.
- [5] *Фертман Е.Е.* *Магнитные жидкости*. Минск: Высшая школа, 1988. 184 с.
- [6] *Кожеевников В.М., Ларионов Ю.А., Демин М.С.* // *Вестн. Северо-Кавказского ГТУ*. 2007. № 1(10). С. 55–61.
- [7] *Падалка В.В., Закирян Р.Г., Бондаренко Е.А.* *Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2002. № 4. С. 36–41.
- [8] *Al Shalabi B.A., El-Ghanem H.M.* // *Phys. Stat. Sol. C*. 2004. Vol. 1. N 7. P. 1840–1845.
- [9] *Malaescu I., Marin C.N.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2002. Vol. 251. P. 73–77.
- [10] *Fannin P.C., Marin C.N., Malaescu I., Stefu N.* *J. Phys.: Condens. Matter*. 2007. Vol. 19. P. 036 104.
- [11] *Ерин К.В.* // *Нанотехника*. 2009. № 2. С. 24–27.
- [12] *Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Дискаева Е.Н., Гетманский А.А.* // *Сб. докл. VIII Междун. научн. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“*. СПб.: ВВМ, 2006. С. 30–31.
- [13] *Жакин А.И.* // *УФН*. 2003. Т. 173. № 1. С. 51–68.
- [14] *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* *Уравнения математической физики*. 6-е изд. М.: МГУ, 1999. 799 с.
- [15] *Воюцкий С.С.* *Курс коллоидной химии*. 2-е изд. М.: Химия, 1975. 512 с.
- [16] *Фролов Ю.Г.* *Курс коллоидной химии*. 2-е изд. М.: Химия, 1989. 464 с.

- [17] *Dikansky Yu.I., Nechaeva O.A.* // *Magnetohydrodynamics*. 2002. Vol. 38. N 3. P. 287–291.
- [18] *Диканский Ю.И., Нечаева О.А.* // *Коллоид. журн.* 2003. Т. 65. № 3. С. 338–342.
- [19] *Duan X., Luo W.* *Int. J. Mod. Phys. B*. 2001. Vol. 15. N 6, 7. P. 837–841.
- [20] *Chekalov V.V., Pjuch P.M., Kandaurova N.V., Bondarenko E.A.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2005. Vol. 289. P. 155–158.
- [21] *Кожевников В.М., Чуенкова И.Ю., Данилов М.И., Ястребов С.С.* // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 129–131.