

03;07;12

Экспериментальное исследование изменения прозрачности разбавленной магнитной жидкости в постоянном магнитном поле

© К.В. Ерин

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: exiton@inbox.ru

(Поступило в Редакцию 11 октября 2005 г.)

Исследовано изменение светопропускания магнитной жидкости типа магнетит в керосине при воздействии магнитного поля. Получены экспериментальные зависимости изменения оптической плотности от напряженности поля для света, направленного параллельно и перпендикулярно полю, а также указанной величины от угла между направлением распространения света и приложенным полем. Показано, что наблюдаемый эффект определяется содержащимися в магнитной жидкости агрегатами. По экспериментальным данным рассчитан магнитный момент агрегата. Результаты подтверждены данными, полученными методом динамического рассеяния света.

PACS: 75.50.Mm

Введение

Ультрадисперсные коллоиды однодоменных магнитных частиц в различных жидких средах обычно называют „магнитными жидкостями“, или „феррожидкостями“. Магнитооптические эффекты в магнитных жидкостях имеют очень большую величину, что позволяет использовать их для измерения полей рассеяния магнитных головок в устройствах записи и хранения информации, визуализации магнитных аудио- и видеозаписей [1], а также для диагностики предпробойных состояний в жидких диэлектриках. Многочисленные исследования показали, что оптические эффекты в магнитных коллоидах, как концентрированных, так и разбавленных, определяются не только отдельными однодоменными частицами, но и их агрегатами, которые могут иметь вид микрокапель, стержней, кластеров и т.д. [2–5]. Наиболее изученными оптическими эффектами в магнитных жидкостях являются двойное лучепреломление [4] и дихроизм [3], значительно меньше изучены особенности рассеяния света в таких системах [5]. Тем не менее именно различие интегральных интенсивностей рассеянного света с разной поляризацией является причиной индуцированного внешним полем дихроизма (так называемый консервативный дихроизм) [6]. Изменение интенсивности света, рассеянного коллоидными частицами, при их ориентации внешним полем, очевидно, приводит к изменению интенсивности прошедшего света. Такой эффект называется ориентационным турбодиметрическим эффектом (ОТЭ) [6]. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей ОТЭ в разбавленной магнитной жидкости.

Эксперимент

Образцом для исследований являлась магнитная жидкость типа „магнетит в керосине“, стабилизированная олеиновой кислотой. Объемная концентрация твердой фазы составляла 0.1%. Образец приготавливался путем разбавления исходной магнитной жидкости с концентрацией 20 vol.% чистым керосином. В качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер ГН-2П. Изменение поляризации падающего света осуществлялось путем поворота трубки лазера на заданный угол. Для ослабления лазерного пучка, во избежание засветки фотоприемника, применялись нейтральные светофильтры из стекла марки НС-8. Исследуемый образец помещался в прямоугольную кювету из кварцевого стекла длиной 17 mm. Горизонтальное магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца, которые располагались на поворотной платформе, что позволяло менять направление магнитного поля (напряженность до 10 kA/m) в горизонтальной плоскости. Более высокую напряженность магнитного поля (до 80 kA/m) можно было получить при помощи трансформатора, в зазоре магнитопровода которого располагалась кювета с образцом. Катушки подключались к источнику постоянного тока, причем рукоятка регулятора напряжения источника приводилась во вращение при помощи низкооборотного электродвигателя, что позволяло увеличивать ток в катушках линейно за время ~ 8 s. Регистрация сигнала производилась фотоэлектронным умножителем ФЭУ-27 с подключенным к нему аналого-цифровым преобразователем ЛА-2М5.

Исследования прозрачности образца при включении магнитного поля показали, что знак изменения про-

зрачности зависит от ориентации магнитного поля относительно направления падающего света, а также от состояния поляризации последнего.

Случай, когда магнитное поле перпендикулярно направлению распространения света, будем называть поперечной конфигурацией поля, а случай параллельной ориентации поля и луча — продольной.

При поперечной конфигурации поля интенсивность света с горизонтальной поляризацией, прошедшего через образец, при включении поля уменьшалась (т. е. коллоидный раствор становился оптически более плотным), для света с вертикальной поляризацией — увеличивалась.

При продольной конфигурации поля исследуемый образец становился оптически менее плотным при любой поляризации падающего света.

В качестве параметра ОТЭ мы использовали величину $\delta D = (D_u - D_r)/D_r$, где D_u — оптическая плотность раствора с ориентированными частицами [7], D_r — оптическая плотность раствора, в котором частицы ориентированы хаотически.

Экспериментальные зависимости параметра ОТЭ от напряженности поля в поперечной конфигурации для горизонтально поляризованного света показаны на рис. 1 (диапазоны напряженности полей: *a* — 0–6, *b* — 6–65 kA/m).

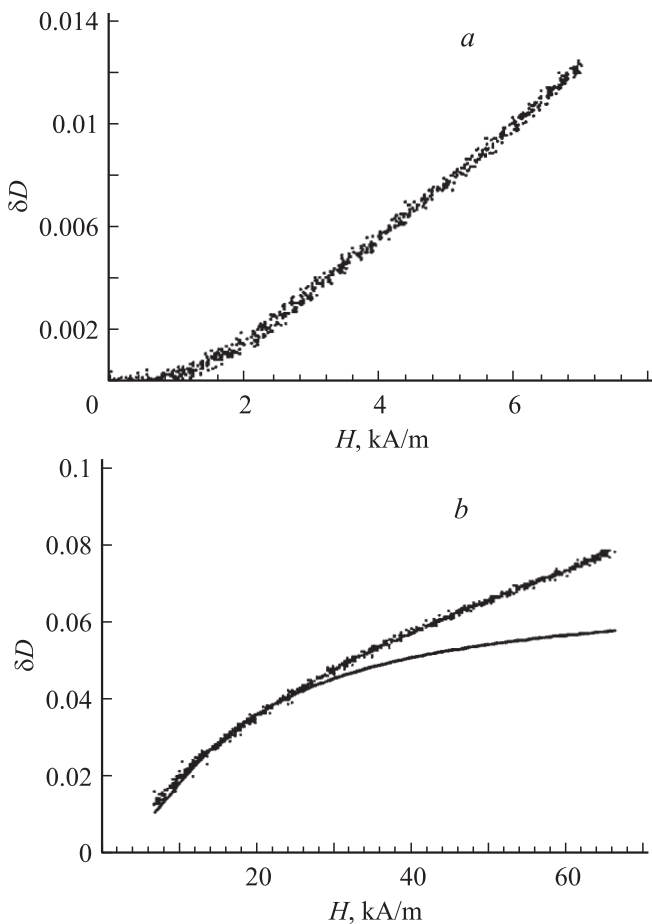


Рис. 1.

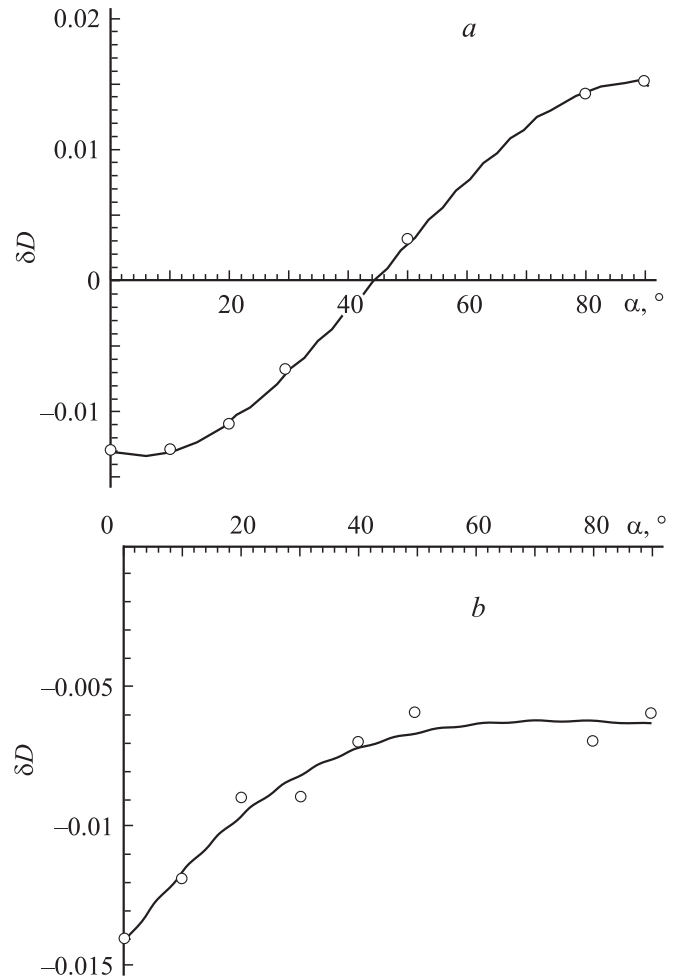


Рис. 2.

Зависимости параметра ОТЭ от угла между магнитным полем и направлением распространения света приведено на рис. 2 для света с горизонтальной (*a*) и вертикальной поляризацией (*b*).

Обсуждение результатов

Исследование светопропускания магнитных жидкостей как метод анализа их агрегативной устойчивости впервые предложено в работе [8]. В [7] изложена теория ориентационных оптических эффектов в дисперсных системах. Опираясь на результаты этих работ, проанализируем полученные экспериментальные данные.

Ослабление света поглощающей и рассеивающей дисперсной средой может быть охарактеризовано сечением ослабления

$$\sigma = \sigma_S + \sigma_a, \tag{1}$$

где σ_S, σ_a — сечения рассеяния и поглощения света соответственно. Экспериментально определяемая величина оптической плотности D прямо пропорциональна сечению ослабления.

Согласно работе [8], для неагрегированных частиц магнитных жидкостей размером $d \sim 10$ nm применимо приближение релеевского рассеяния ($2\pi d/\lambda \ll 1$), тогда

$$D_{\parallel} - D_r = 2(D_r - D_{\perp}) \text{ и } D_{\perp} = D_L. \quad (2a)$$

В [7] получены даже более строгие соотношения для этого случая

$$\delta D_{\parallel} = -2\delta D_{\perp} \text{ и } \delta D_{\perp} = \delta D_L, \quad (2b)$$

где D_{\parallel} , D_{\perp} — оптические плотности системы в поперечной конфигурации поля для света с параллельной и перпендикулярной полю поляризацией, D_L — оптическая плотность в продольной конфигурации поля.

Для малых агрегатов, содержащих до нескольких десятков частиц, можно применить приближение Релея–Дебая–Ганса ($2\pi d(m-1)/\lambda \ll 1$, m — показатель преломления частиц относительно дисперсионной среды). В этом случае для оптических плотностей системы будут выполняться соотношения [8]:

$$D_{\parallel} - D_r = 2(D_r - D_{\perp}), \text{ но } D_{\perp} \neq D_L. \quad (3)$$

Для больших частиц, размер которых значительно превышает длину волны, применимо приближение геометрической оптики. В этом случае оптическая плотность в поперечной конфигурации поля не будет зависеть от состояния поляризации света и ни одно из равенств (2) выполняться не будет [8].

Анализ наших экспериментальных результатов показывает (рис. 2):

$$\frac{D_{\parallel} - D_r}{D_r - D_{\perp}} = -\frac{\delta D_{\parallel}}{\delta D_{\perp}} = 2.1 \pm 0.3,$$

$$\frac{D_L}{D_{\perp}} = 0.99, \text{ однако } \frac{\delta D_L}{\delta D_{\perp}} \approx 2.$$

Таким образом, с учетом равенств (2a) и (2b), можно сделать вывод о том, что ОТЭ в исследованном нами образце магнитной жидкости объясняется ориентацией частиц надрелеевских размеров, т.е. агрегатов однодоменных частиц. Оценить размеры таких агрегатов можно либо по характеру полевой зависимости ОТЭ, определив соответствующий агрегату магнитный момент, либо по измерениям коэффициента вращательной или поступательной броуновской диффузии.

Полевая зависимость ОТЭ для частиц, обладающих постоянным магнитным моментом m_0 , определяется выражением [9]:

$$\delta D = \delta D_{\infty} \left[1 - \frac{3L(\xi)}{\xi} \right], \quad (4)$$

где $L(\xi)$ — функция Ланжевена, $\xi = m_0 H/kT$ — отношение энергии частицы в магнитном поле к ее тепловой энергии, δD_{∞} — величина эффекта при полной ориентации частиц.

Сравнение расчета по формуле (4) и экспериментального графика (рис. 1, b) показало, что добиться согласия экспериментальных и расчетных значений невозможно, если исходить из магнитного момента однодоменной частицы магнетита размером около 10 nm ($m_0 \approx 10^{-18}$ l/s · cm³). На рис. 1, b сплошной линией изображена кривая, рассчитанная по формуле (4), при значениях параметров $m_0 \approx 10^{-15}$ l/s · cm³ и $\delta D_{\infty} = 0.07$. Подбор параметров осуществлялся исходя из наилучшего согласия с экспериментальной зависимостью в области напряженности поля до 16 кА/м. Такое большое значение магнитного момента подтверждает предположение о том, что ОТЭ в данном случае определяется агрегатами однодоменных частиц. Если считать, что магнитные моменты частиц в агрегате параллельны, оценка размера такого агрегата дает значение 100–120 nm.

Для того чтобы убедиться в присутствии в образце агрегатов таких размеров, нами были проведены измерения коэффициента поступательной броуновской диффузии частиц методом динамического рассеяния света [10].

Установка для исследования магнитных жидкостей методом динамического рассеяния света была собрана из стандартных компонентов. Источником света являлся упомянутый выше лазер ГН-2П. Свет, рассеянный на угол $\theta = 90^\circ$, фокусировался при помощи линзы на вертикальной щели шириной 0.1 mm, за которой располагался фотокатод фотоэлектронного умножителя. Сигнал с фотоумножителя через предварительный широкополосный усилитель М-60Г и АЦП заносился в память ЭВМ. Обработка полученного файла данных сводилась к построению автокорреляционной функции фототока $g^{(2)}(\tau) = \langle i(t)i(t+\tau) \rangle$. Как известно, для монодисперсных систем [10] автокорреляционная функция

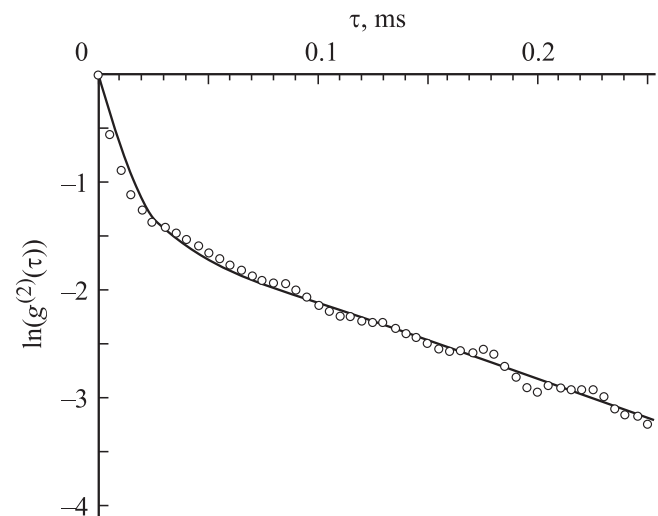


Рис. 3.

фототока представляет собой экспоненту

$$g^{(2)}(\tau) = 1 + \gamma \exp(-2q^2 D_t \tau), \quad (5)$$

где γ — константа, определяемая установкой, $q = (4\pi/\lambda) \sin(\theta/2)$. Коэффициент поступательной броуновской диффузии D_t связан с размером частицы известным соотношением Эйнштейна–Стокса

$$D_t = \frac{kT}{3\pi\eta d}. \quad (6)$$

Здесь η — коэффициент динамической вязкости. На рис. 3 показана автокорреляционная функция фототока в полупологарифмическом масштабе.

Резко нелинейная зависимость автокорреляционной функции фототока рис. 3 говорит о значительном различии размеров рассеивающих центров. Сплошной линией на рис. 3 обозначена автокорреляционная функция, рассчитанная для модели двух фракций с размерами частиц $d_1 = 10$ и $d_2 = 110$ nm. Таким образом, наличие в исследованном нами образце магнитной жидкости как отдельных частиц, так и агрегатов размером около 100 nm подтверждается независимым методом.

Выводы

Экспериментальные исследования ОТЭ в магнитном поле показывают, что наблюдаемый эффект не может быть объяснен ориентацией частиц в приближении Реллея. Вычисления магнитного момента частиц из полевой зависимости ОТЭ дают значение, приблизительно на три порядка превышающее магнитный момент однодоменной частицы магнитной жидкости, что позволяет говорить о наличии в жидкости агрегатов частиц размером около 100 nm. Наличие в исследуемом образце агрегатов таких размеров подтверждается данными динамического рассеяния света.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору Н.Г. Хлебцову (Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН) за полезные обсуждения при подготовке работы.

Список литературы

- [1] Скибин Ю.Н. Молекулярно-кинетический механизм электро- и магнитооптических явлений магнитных жидкостей. Автореф. докт. дис. Ставрополь. 1996. 319 с.
- [2] Chikazumi S., Teketomi S., Ukita M. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1987. Vol. 65. P. 245.
- [3] Socoliuc V. // J. Magn. Magn. Mater. 1999. Vol. 210. P. 146.
- [4] Падалка В.В., Ерин К.В. // Коллоидн. журн. 2001. Т. 63. № 3. С. 389.
- [5] Скрипаль А.В., Усанов Д.А. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 17. С. 7.
- [6] Толстой Н.А., Спартаков А.А. Электрооптика и магнитооптика дисперсных систем. СПб: Изд-во СПбГУ, 1996. 244 с.

- [7] Хлебцов Н.Г. Ослабление и рассеяние света в дисперсных системах с неупорядоченными, ориентированными и фрактальными частицами. Автореф. докт. дис. Саратов. 1996. 556 с.
- [8] Mehta R.V. // J. Magn. Magn. Mater. 1983. Vol. 39. P. 64.
- [9] Электрооптика коллоидов / Под ред. С.С. Духина. Киев: Наук. думка, 1977. 200 с.
- [10] Pecora R. // J. Nanopart. Res. 2000. Vol. 2. P. 123.