

УДК 544.77.03:537.632

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МАГНИТНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ СУБМИКРОННЫМИ КАПЛЯМИ

© 2024 г. С. С. Белых¹, *, К. В. Ерин¹, И. В. Алферьев¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, Россия

*E-mail: sergeyb.stav@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Исследован эффект изменения прозрачности магнитных эмульсий с деформируемыми каплями субмикронного размера при воздействии магнитного поля. Обнаружено влияние концентрации микрокапель, ориентации и напряженности магнитного поля на амплитуду изменения прозрачности. Выполнено сопоставление экспериментальных данных полевой зависимости магнитооптического эффекта и зависимости от угла ориентации магнитного поля с расчетами в приближении аномальной дифракции. Проанализирована возможность оценки межфазного натяжения в магнитных эмульсиях на основе исследования процессов релаксации оптических эффектов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитная эмульсия, светопропускание, аномальная дифракция, межфазное натяжение

DOI: 10.31857/S0367676524100068, EDN: DTLVST

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные эмульсии относятся к новому типу структурированных систем, синтезированных на основе магнитных жидкостей. Они представляют собой устойчивые эмульсии микрокапель магнитной жидкости, взвешенных в различных немагнитных жидких средах. Магниточувствительные эмульсии были синтезированы на рубеже 1970—1980 гг. [1]. С использованием магниточувствительных эмульсий предложены методы измерения вязкости и поверхностного натяжения жидкостей [2], определения содержания метилового спирта [3] и др. Высокая чувствительность магнитных жидкостей к воздействию магнитного поля и возможность управления формой и поведением при внешнем воздействии [4] делает такие системы перспективным материалом для датчиков магнитного поля и оптических нейтральных фильтров с регулируемым полем ослабления [5], а также они могут выступать в роли дифракционных решеток [6], газовых счетчиков и дозаторов [7]. Особенностью оптических эффектов в дисперсных системах является их значительная зависимость от размера частиц. Так как размер капель магнитных эмульсий с низким межфазным натяжением, как правило, сравним или больше длины волн света, то разные размеры капель могут влиять не только на величину оптических эффектов, но и на знак изменения оптических свойств. В работе [8] нами обнаружены такие

изменения в процессе коалесценции капель магнитной эмульсии микронного размера при длительном воздействии магнитного поля. Было показано [9], что в процессе коалесценции, сопровождающейся ростом среднего размера капель, происходит изменение амплитуды и знака магнитооптического эффекта изменения прозрачности под действием поля. Было высказано предположение об определяющем влиянии характерного размера микрокапли на знак относительного изменения прозрачности эмульсии под действием поля. Однако исследования в агрегативно неустойчивых эмульсиях не позволяют установить характер зависимости магнитооптических свойств от размера с достаточной достоверностью. В настоящей работе мы приводим результаты исследования эффекта изменения прозрачности под действием магнитного поля в магнитных эмульсиях с низким межфазным натяжением, синтезированных на основе масла гидросистем АМГ-10, с существенно меньшим размером микрокапель, сравнимым с длиной волны света. Такой размер микрокапель в 3—5 раз меньше, чем в эмульсиях, исследованных в [8—10].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследований мы синтезировали магнитную эмульсию с низким межфазным натяжением, в которой в качестве дисперсионной среды использовано

авиационное масло гидросистем (АМГ-10). АМГ-10 является гидравлическим маслом красного оттенка, с плотностью 835 кг/м^3 и поверхностным натяжением $\sigma \approx 0.0245 \text{ Н/м}$. Это масло хорошо зарекомендовало себя в качестве дисперсионной среды [5, 8–11]. В качестве дисперсной фазы использовалась магнитная жидкость на керосиновой основе с частицами, имеющими размер порядка 10 нм , которая была синтезирована в ПНИЛ Прикладной феррогидродинамики (г. Иваново). Объемная концентрация наночастиц магнетита измерялась по плотности исходной жидкости и составляла около 13% , намагниченность насыщения 37.3 кА/м , начальная магнитная восприимчивость $\chi = 3.7$ и плотность $\rho = 1358 \text{ кг/м}^3$. Эмульсия с наибольшей объемной концентрацией микрокапель (3%) приготавливалась путем механического перемешивания исходной магнитной жидкости в масле АМГ-10 без применения стабилизаторов. Образцы эмульсии с меньшей объемной концентрацией микрокапель ($2, 1$ и 0.25%) получали путем разбавления 3% эмульсии чистым носителем до необходимого значения концентрации микрокапель. Это позволило нам получить достаточно устойчивую магнитную эмульсию со средним броуновским размером микрокапель около 0.7 мкм .

Для исследований магнитооптического эффекта изменения прозрачности магнитных эмульсий использовали оптическую установку, состоящую из гелий-неонового лазера ГН-2П с длиной волны 633 нм и мощностью излучения 2 мВт , луч которого пропускали через образец, помещенный в стеклянную кювету толщиной 1 мм . Кювета находилась в области однородного магнитного поля катушек Гельмгольца. Направление поля можно было изменять относительно лазерного луча путем поворота катушек без изменения положения кюветы. Интенсивность падающего света ограничивали нейтрально-серыми светофильтрами НС-8, чтобы избежать эффекта тепловой линзы, а интенсивность прошедшего света регистрировали с помощью фотомножителя ФЭУ-27 и цифрового осциллографа AURIS B-423, подключенного к компьютеру. Питание катушек осуществлялось источником питания с компьютерным управлением АКТАКОМ АТН-7333. В исследованиях использовали импульсное магнитное поле с длительностью импульса до 12 с и промежутком между импульсами до 20 с . Длительность промежутка между импульсами подбирали исходя из необходимости полной релаксации эффекта после прекращения воздействия поля. Спектры пропускания магнитных эмульсий были измерены на эллипсометрическом комплексе ЭЛЛИПС-1891, работающем в режиме спектрофотометра.

Мы изучали оптический эффект изменения оптической плотности магнитной эмульсии под действием магнитного поля различной величины и направления. Для оценки величины магнитооптического эффекта и удобства представления результатов эксперимента использовался параметр относительного изменения оптической плотности, который определялся в виде:

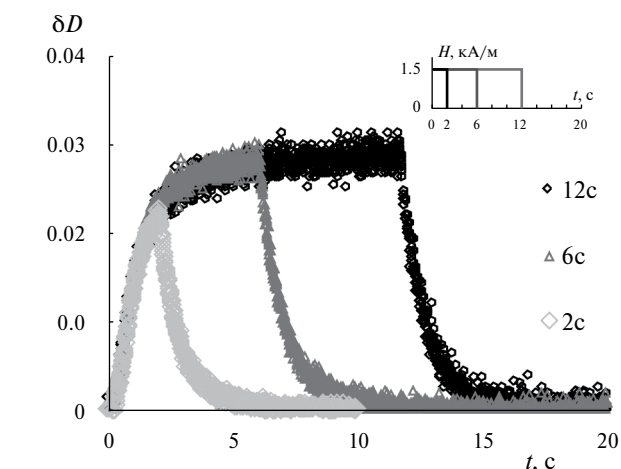


Рис. 1. Изменение оптической плотности магнитной эмульсии при воздействии магнитного поля разной длительности: 2 (1), 6 (2), и 12 с (3). На вставке — форма импульса действующего магнитного поля. $H = 1.5 \text{ кА/м}$, направлено параллельно лучу лазера. Объемная концентрация капель МЖ 3% .

$\delta D = (D - D_0) / D_0$, где D_0 — это оптическая плотность образца без воздействия поля, D — при воздействии внешнего магнитного поля.

На рис. 1 представлена кривая зависимости изменения прозрачности образца под действием импульсов магнитного поля длительностью $t = 2, 6$ и 12 с , направленного параллельно лучу падающего света. Из этого графика следует, что при воздействии магнитного поля прозрачность образцов эмульсии уменьшается, а после выключения поля происходит процесс релаксации с восстановлением первоначальной прозрачности. Таким образом, в данном случае параметр магнитооптического эффекта δD положителен. На вкладке рис. 1 изображена форма импульса магнитного поля. Эксперимент показал, что изменение длительности импульса от 2 до 12 с не приводит к принципиальным изменениям формы магнитооптического отклика. При длительности импульса более 5 с эффект приходит в состояние насыщения и его максимальная величина в дальнейшем не изменяется. Также длительность действия поля практически не влияет на характерное время релаксации оптического эффекта τ (уменьшение значения эффекта в e раз), которое составляет около 1 с . Из этого можно сделать вывод о том, что характерный размер капель эмульсии и их концентрация не меняются при длительностях действия поля до 12 с .

Было обнаружено, что на амплитуду магнитооптического эффекта изменения оптической плотности влияет концентрация капель МЖ в образце, а также напряженность действующего поля. На рис. 2 представлена зависимость от напряженности поля амплитудного значения изменения оптической плотности δD_i (в данном случае под амплитудным значением мы подразумеваем значение параметра эффекта в момент

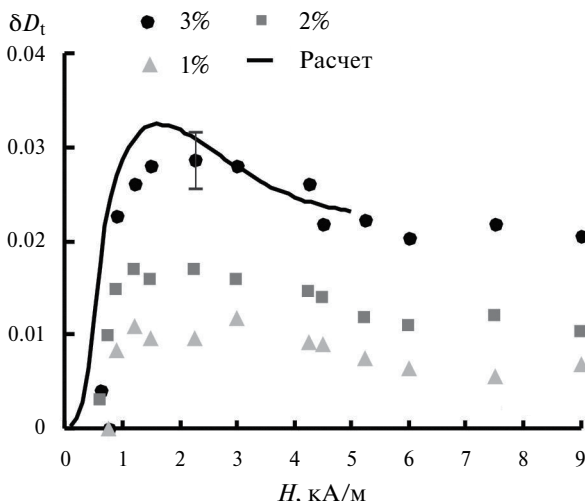


Рис. 2. Зависимость амплитуды изменения оптической плотности от напряженности магнитного поля при разных концентрациях образца. Поле направлено параллельно лучу лазера.

прекращения действия магнитного поля, когда система находилась в состоянии близкому к насыщению в момент времени $t = 6$ с). Точки соответствуют экспериментальным значениям, а непрерывная линия — расчет, который будет обсуждаться далее. В эксперименте увеличение концентрации капель МЖ в образце приводит к увеличению амплитудных значений эффекта в диапазоне исследованных концентраций капель (до 3%). Кроме того, полевая зависимость эффекта во всех образцах имеет немотонный характер с максимумом в диапазоне от 1.5 до 2.3 кА/м. При дальнейшем увеличении напряженности величина эффекта достигает некоторого стационарного значения в полях свыше 6 кА/м.

На рис. 3 представлены результаты исследования зависимости амплитудного значения изменения оптической плотности δD_t при различных ориентациях

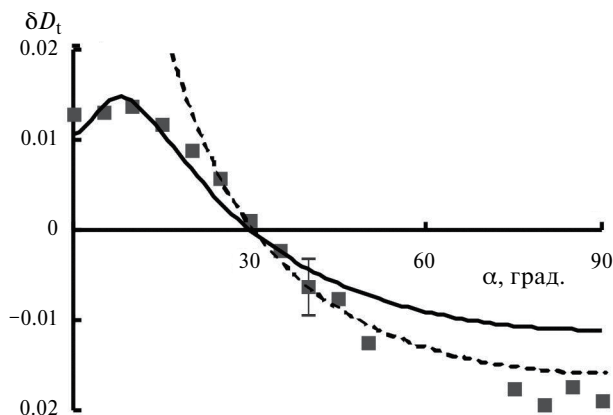


Рис. 3. Зависимость амплитуды изменения оптической плотности от ориентации магнитного поля. $H = 1.5$ кА/м, об. концентрация капель МЖ 1%.

магнитного поля относительно луча света. Исследования проводились с образцом эмульсии с концентрацией капель МЖ 1%, воздействие магнитным полем осуществлялось импульсами длительностью $t = 2$ с и амплитудой 1.5 кА/м. Точками на графике обозначены экспериментальные значения, а непрерывная и прерывистая линии — расчет при разных параметрах размера микрокапель, межфазного натяжения и комплексного показателя преломления МЖ. Из представленной экспериментальной зависимости можно сделать вывод о том, что при изменении ориентации магнитного поля с продольной на поперечную параметр магнитооптического эффекта меняет знак. При угле ориентации поля относительно луча света около 30—40 градусов величина параметра эффекта близка к нулю.

Магнитное поле изменяет также спектр пропускания магнитных эмульсий. Результаты представлены на рис. 4. Для исследований использовался образец магнитной эмульсии с объемной концентрацией микрокапель 0.25%, т. к. чувствительность спектрофотометра не позволяла исследовать более концентрированные образцы. Исследования проводились в магнитном поле напряженностью от 3 до 30 кА/м, направленном перпендикулярно направлению луча света. Под прозрачностью мы понимаем коэффициент светопропускания, т. е. отношение интенсивностей прошедшего и падающего на кювету света. Формы спектров пропускания магнитной эмульсии при воздействии и при отсутствии магнитного поля подобны друг другу. При длинах волн менее 400 нм прозрачность эмульсии очень низкая и прошедший свет практически не регистрируется. С увеличением длины волны прозрачность возрастает и достигает максимального значения при длине волны 800 нм, а далее начинает монотонно убывать. Воздействие внешнего поля приводит к увеличению абсолютной величины прозрачности магнитной эмульсии, при этом в диапазоне длин волн 400—600 нм влияние поля незначительно, а начиная с 600 нм изменение прозрачности в поле растет и достигает максимума

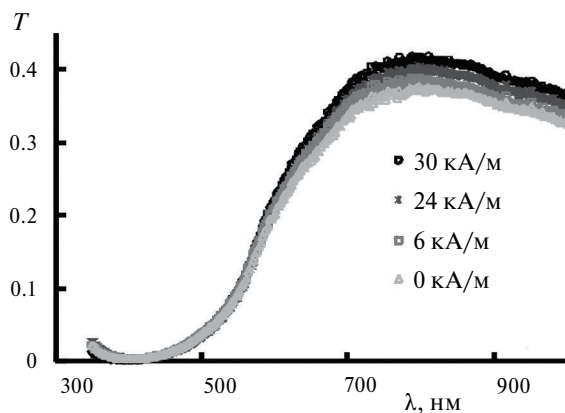


Рис. 4. Влияние магнитного поля на спектры пропускания магнитной эмульсии.

при 800 нм. Эти данные согласуются с результатами исследования магнитооптического эффекта в поле, перпендикулярном лучу света (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В случае малого межфазного натяжения на границе капля-среда γ и под воздействием магнитного поля капли магнитной жидкости, взвешенные в образце эмульсии, сильно деформируются и вытягиваются вдоль линий напряженности внешнего магнитного поля. Для интерпретации наблюдаемых эффектов мы предлагаем использовать приближение аномальной дифракции. Его предложил Ван де Хюлст [12] и оно справедливо при следующих условиях. Размер частиц r должен быть больше длины волны света λ , что оценивается соотношением $x = 2\pi r/\lambda \gg 1$, и при этом рассеивающие частицы должны быть оптически «мягкими», т. е. коэффициенты преломления дисперсной фазы n и дисперсионной среды n_0 должны находиться в соотношении $m = n/n_0 \approx 1$. Для исследуемой эмульсии эти параметры равны $x \approx 7$, $m \approx 1.06$. С помощью закона Бугера—Ламберта по изменению сечения ослабления света частицей можно рассчитать изменение оптической плотности δD , которое связано с изменением прозрачности δT :

$$\delta D = \frac{\sigma_H - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{1}{D_0} \lg \frac{1}{\delta T + 1}, \tag{1}$$

здесь σ_H и σ_0 — сечения ослабления деформированной под действием поля и недеформированной капли соответственно, D_0 — начальная оптическая плотность образца в отсутствие поля. Сечение ослабления в приближении аномальной дифракции определяется как

$$\sigma = Q \left[\pi r_0^2 \sqrt[3]{p} \sqrt{1 + (p^{-2} - 1) \cos^2 \alpha} \right], \tag{2}$$

где выражение в скобках определяет площадь геометрической тени вытянутого эллипсоида с приведенным радиусом r_0 , т. е. радиусом сферы эквивалентного объема, $p = a/b$ — отношение длинной и короткой оси эллипсоида, α — угол между длинной осью и направлением падающего света, а Q — фактор эффективности ослабления света. Выражение для Q в приближении аномальной дифракции выглядит следующим образом [12]:

$$Q = 2 - \frac{4}{e^{\rho \tan \beta}} \frac{\cos \beta}{\rho} \left(\sin(\rho - \beta) + \frac{\cos \beta}{\rho} \cos(\rho - 2\beta) \right) + 4 \left(\frac{\cos \beta}{\rho} \right)^2 \cos 2\beta. \tag{3}$$

здесь $\rho = \frac{4\pi r_0}{\lambda} \frac{m - 1}{\sqrt[3]{p} \sqrt{1 + (p^{-2} - 1) \cos^2 \alpha}}$ — фазовый сдвиг луча, проходящего через каплю. Таким образом,

с учетом (2) и (3) уравнение для изменения оптической плотности принимает вид:

$$\delta D = \frac{\sigma_H(\alpha, p) - \sigma_0}{\sigma_0}. \tag{4}$$

Изменение оптической плотности зависит от угла α ориентации капли относительно луча света и степени ее вытянутости p , которые определяются направлением и величиной напряженности магнитного поля соответственно. Аналитического решения подобной задачи в общем случае на настоящий момент не существует, однако, возможно использование численных методов. Так, мы определили эксцентриситет вытянутой капли e из условия минимума свободной энергии капли [11], состоящей из поверхностной энергии межфазного натяжения и магнитоэлектронной энергии намагничивающейся капли:

$$W = 2\pi r_0^2 \gamma^3 \sqrt[3]{1 - e^2} \left(1 + \frac{\arcsin e}{e\sqrt{1 - e^2}} \right) - \frac{2\pi r_0^3}{3} \mu_0 H^2 \left(\frac{\chi}{1 + \chi N_a} \right), \tag{5}$$

где N_a — размагничивающий фактор вдоль длинной оси капли, γ — межфазное натяжение на границе капля — окружающая среда, H — напряженность магнитного поля, χ — начальная магнитная восприимчивость магнитной жидкости, а эксцентриситет капли связан с вытянутостью соотношением $e = \sqrt{1 - 1/p^2}$. В уравнении (5) предполагается случай малого поля и линейной связи между намагниченностью магнитной жидкости и внешним полем.

Таким образом, с использованием выражений (2—5) и измеренных нами значений для показателя преломления масла АМГ-10 $n_{AMG} = 1.487$, начальной магнитной восприимчивости магнитной жидкости $\chi_{MЖ} = 3.7$ и среднего броуновского размера микрокапель эмульсии $r_0 = 700$ нм, мы получили расчетные зависимости для изменения оптической плотности в зависимости от напряженности магнитного поля и его ориентации. У авторов не было возможности непосредственно измерить комплексный показатель преломления микрокапель магнитной жидкости и межфазное натяжение на границе капля-среда с необходимой точностью. При произведении вычислений мы опирались на значения комплексного показателя преломления МЖ, которое было получено методом эллипсометрии при отражении света от свободной поверхности. Мы полагаем, что значения комплексного показателя преломления микрокапель магнитной жидкости в эмульсии может отличаться от данных измерений свободной поверхности как в большую, так и в меньшую сторону. С учетом этого, мы оценивали действительную и мнимую части показателя преломления МЖ в диапазоне $Re(n) = 1.5 - 1.6$ и $Im(n) = 0.1 - 0.4$. Диапазон значений величины межфазного натяжения составлял $\gamma = 10^{-8} - 10^{-6}$ Н/м,

что соответствует известным литературным данным. На рис. 2 линией обозначена расчетная зависимость изменения оптической плотности от напряженности магнитного поля, рассчитанная для концентрации каплей 1% с межфазным натяжением на границе капля-среда $\gamma = 5 \cdot 10^{-8}$ Н/м. Расчеты для полей свыше 5 кА/м не проводились, т. к. в расчетах для сравнительно высоких напряженностей магнитного поля степень вытяжения каплей очень значительная (больше 100), что не позволяет использовать известное выражение для поверхностной энергии эллипсоида (5). Расчетные значения удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями, полученными для той же концентрации. На рис. 3 приведены две расчетные зависимости амплитуды изменения оптической плотности от угла между направлениями луча света и линиями напряженности магнитного поля. Расчеты производились при следующих параметрах: для непрерывной кривой — $r = 650$ нм, $\gamma = 8 \cdot 10^{-8}$ Н/м, $n = 1.51 + i \cdot 0.015$, для прерывистой кривой — $r = 550$ нм, $\gamma = 5 \cdot 10^{-8}$ Н/м, $n = 1.503 + i \cdot 0.023$. Значительное различие расчетных кривых между собой объясняется сильной зависимостью результата от действительной и мнимой частей показателя преломления магнитной жидкости n , межфазного натяжения γ и размера каплей r . Учет полидисперсности каплей может добиться лучшего согласия расчета с экспериментом. В случае продольной ориентации каплей больший вклад вносят более крупные микрокапли в эмульсии, тогда как для поперечной ориентации на эффект влияют также капли меньшего размера.

Кроме процессов, происходящих под действием магнитного поля, были рассмотрены процессы релаксации магнитооптического эффекта. В магнитных эмульсиях реализуется механизм релаксации магнитооптического эффекта, отличный от хорошо разработанных механизмов ориентационной релаксации в дисперсных системах с твердыми частицами. Отличие заключается в том, что в эмульсиях процесс релаксации не является ориентационным и определяется релаксацией формы жидкой деформированной капли в вязкой среде. Этот процесс можно описать в рамках предложенной Тейлором и расширенной Маффетоне и Минале теории малых деформаций [13,14]. Характерное время релаксации формы жидкой деформированной капли можно оценить по формуле [14]:

$$\tau = \frac{\eta_{амг} r_0}{\gamma} \frac{(2\tilde{\eta} + 3)(19\tilde{\eta} + 16)}{40(\tilde{\eta} + 1)}, \quad (6)$$

где r_0 — радиус капли эквивалентного объема, а $\tilde{\eta} = \eta_{мж} / \eta_{амг}$ — отношение вязкостей жидкостей внутри и снаружи капли. На рис. 5 в логарифмическом масштабе показан график расчетной зависимости характерного времени релаксации от величины межфазного натяжения для различных значений размера капли. Точка на графике обозначает время

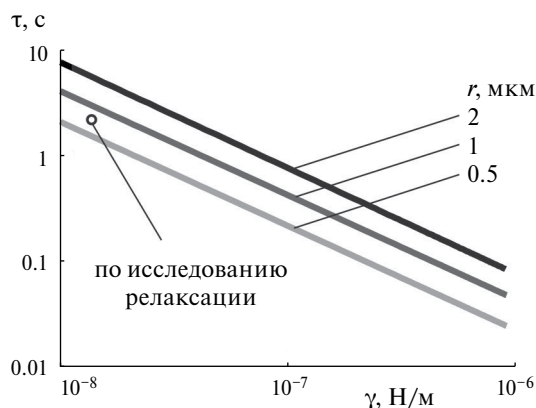


Рис. 5. Расчетная зависимость времени релаксации формы деформированной капли от величины межфазного натяжения для капель разного размера.

релаксации магнитооптического эффекта, полученное в эксперименте для капли эмульсии со средним размером 700 нм. Этому значению соответствует величина межфазного натяжения $\gamma = 10^{-8}$ Н/м, что по порядку величины совпадает с используемым значением в расчетах для графиков 2 и 3. Величины межфазного натяжения, полученные из исследований процессов релаксации и из изучения статических эффектов в магнитном поле, дают несколько различающиеся значения, что можно объяснить ограниченностью возможности использования формул (5) и (6) для каплей с высокой степенью деформации. Кроме того, при сильном вытяжении микрокапли могут принимать форму, отличную от эллипсоидальной, что также ограничивает возможности описания систем сильно деформированных каплей на основе простых приближений. Вместе с тем, использование зависимостей, подобных изображенной на рис. 5, позволяет сделать оценку, в том числе, и температурной зависимости межфазного натяжения для микрокапель, для которой имеются противоречивые экспериментальные данные [15,16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования дают совершенно новое представление об особенностях магнитооптического эффекта в магнитных эмульсиях с различным размером микрокапель. Ранее [9] подобные исследования проводились в магнитной эмульсии с размерами каплей порядка 3–6 мкм, т. е. существенно больше, чем длина волны света. При этом наблюдались положительный знак магнитооптического эффекта и совершенно другая зависимость величины эффекта от угла ориентации поля. Отличия в особенностях магнитооптического эффекта в магнитной эмульсии, описанной в настоящей работе, очевидно связаны с тем, что в представленном эксперименте использовалась магнитная эмульсия с меньшим размером каплей (около 0.7 мкм), сравнимым с длиной волны

света гелий-неонового лазера (0.63 нм). Этот результат подтверждает представление о том, что размер капель магнитной эмульсии влияет не только на величину, но и на знак параметров магнитооптического эффекта. Знак и величина эффекта в магнитной эмульсии с частицами, сравнимыми с длиной волны света, также могут быть успешно интерпретированы в рамках анизотропного приближения аномальной дифракции, как это уже делалось нами ранее в [8, 15] для систем с каплями микронного размера. Такой подход позволяет объяснить парадоксальный, на первый взгляд, эффект уменьшения прозрачности магнитной эмульсии с субмикронными каплями в продольном по отношению к лучу света поле. Простое объяснение этого может быть сформулировано как неприменимость простых модельных представлений геометрической оптики для описания оптических эффектов в магнитных эмульсиях с каплями субмикронных размеров.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки России на выполнение научно-исследовательских работ (проект FSRN-2023-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Romankiw L.T., Briachift N.Y.* Stable emulsion and method for preparation thereof: US Patent 3981844, 1976.
2. *Backholm M., Vuckovac M. et al.* // *Langmuir*. 2017. V. 33. P. 6300.
3. *Mahendran V., Philip J.A.* // *Sens. Actuators B*. 2013. V. 185. P. 488.
4. *Тятюшкин А.Н.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 7. С. 885; *Тятюшкин А.Н.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 7. P. 804.
5. *Закинян А.А., Белых С.С., Закинян А.Р., Ерин К.В.* // *Опт. журн.* 2021. Т. 88. № 3. С. 61; *Zakinyan A.A., Belykh S.S., Zakinyan A.R., Yerin K.V.* // *J. Opt. Tech.* 2021. V. 88. No. 3. P. 158.
6. *Белых С.С., Ерин К.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 7. С. 962; *Belykh S.S., Yerin C.V.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 7. P. 878.
7. *Ряполов П.А., Соколов Е.А., Шельдешова Е.В. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 3. С. 343; *Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Shel'deshov E.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87. No. 3. P. 295.
8. *Белых С.С., Ерин К.В.* // *Опт. и спектроск.* 2021. Т. 129. № 9. С. 1166; *Belykh S.S., Erin K.V.* // *Opt. Spectrosc.* 2021. V. 129. P. 1200.
9. *Belykh S.S., Yerin C.V.* // *IEEE Magn. Lett.* 2022. V. 13. P. 1.
10. *Yerin C.V., Belykh S.S.* // *IEEE Trans. Magn.* 2022. V. 58. No. 2. Art No. 4600704.
11. *Закинян А.Р., Диканский Ю.И.* Магнитные и электрические свойства магнитных эмульсий. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 156 с.
12. *Ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 536 с.; *Van de Hulst H.C.* Light Scattering by Small Particles. N.Y.: John Wiley&Sons, 1957. 470 p.
13. *Taylor G.I.* // *Proc. Royal Soc. Lond.* 1934. V. 146. P. 501.
14. *Maffettone P.L., Minale M.* // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 1998. V. 78. P. 227.
15. *Белых С.С., Ерин К.В., Фурсова В.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 3. С. 333; *Belykh S.S., Yerin C.V., Fursova V.V.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87. P. 287.
16. *Ivanov A.S.* // *Phys. Fluids.* 2018. V. 30. No. 5. Art. No. 052001-9.

Magneto-optical effect in magnetic emulsions with deformable submicron droplets

S. S. Belykh¹, *, C. V. Yerin¹, I. V. Alferiev¹

¹North Caucasus Federal University, Stavropol 355017, Russia

*e-mail: sergeyb.stav@mail.ru

The effect of changes in the transparency of magnetic emulsions with deformable droplets of submicron size under the influence of a magnetic field has been studied. The influence of microdroplet concentration, orientation, and magnetic field strength on the amplitude of transparency changes was discovered. A comparison has been made of experimental data on the field dependence of the magneto-optical effect and the dependence on the angle of magnetic field orientation with calculations in the anomalous diffraction approximation. The possibility of estimating interfacial tension in magnetic emulsions based on studying the processes of relaxation of optical effects is discussed.

Keywords: magnetic fluid, magnetic emulsion, light transmission, anomalous diffraction, interface tension.