

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭКСТИНКЦИИ СВЕТА И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ В РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ

© 2021 г. Ю. Г. Соколовская^{1, *}, Н. Б. Подымова¹, А. А. Карабутов^{2, 3}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Международный учебно-научный лазерный центр,
Ленинские горы, д. 1, стр. 62, Москва, 119991 Россия

³Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
Ленинский проспект, д. 4, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yu.sokolovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2020 г.

После доработки 24.08.2020 г.

Принята к публикации 28.08.2020 г.

Продемонстрирована возможность применения лазерного оптико-акустического метода для исследования изменения коэффициента экстинкции света в магнитных жидкостях со временем. В качестве объекта исследования были взяты разбавленные магнитные жидкости на водной основе с различной концентрацией частиц магнетита. Зависимость временной формы переднего фронта оптико-акустического сигнала, возбуждаемого в исследуемой жидкости, от ее оптических свойств позволяет измерить коэффициент экстинкции света и восстановить его пространственное распределение по глубине жидкости. Экспериментально показано, что в разбавленной магнитной жидкости величина коэффициента экстинкции света уменьшается со временем вследствие ее структурных изменений.

DOI: 10.31857/S0023291221010134

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные (или ферромагнитные) жидкости представляют собой коллоидные системы, состоящие из частиц магнетита, несущей жидкости и стабилизатора. Эти жидкости сочетают в себе текучесть и вязкость жидкостей с магнитными свойствами твердой фазы [1, 2]. В настоящее время они находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–13]. Уникальность их оптических и магнитных свойств используется в оптике при создании различных устройств, таких как оптические решетки, модуляторы, фильтры и затворы [3–11]. Оптические свойства магнитных жидкостей используются и при создании датчиков магнитного поля, с помощью которых можно определить неизвестное значение напряженности внешнего магнитного поля, действующего на жидкость, по изменению интенсивности прошедшего через нее света [3]. Следует отметить, что в оптических устройствах могут применяться магнитные жидкости как с концентрацией частиц магнетита порядка нескольких десятков процентов (10–30%, см., на-

пример, ссылки [5, 6]), так и с более низкой концентрацией – от долей процента до 10% [3, 4, 7–11]. Магнитные жидкости также используются для создания герметизаторов, демпферов, центробежных датчиков и датчиков углов наклона, находят применение в медицине в качестве контрастных средств для магнитно-резонансной томографии [2, 12–14]. Особенности структуры и физических свойств делают магнитные жидкости объектом многих фундаментальных и прикладных исследований.

Одной из важных проблем, связанных с производством и применением магнитных жидкостей, является проблема стабильности магнитной жидкости как коллоидной системы. Из-за наличия между частицами сил притяжения (ван-дер-ваальсовых и магнитодипольных) возможно образование агрегатов частиц в жидкости [15–17]. В случае нарушения стабильности в системе возможны структурные изменения, ведущие к зависимости ее свойств от времени. Данная проблема решается использованием стабилизаторов (поверхностно-активных веществ), создающих за-

щитную оболочку на поверхности частиц магнетита и препятствующих их слипанию благодаря стерическим силам отталкивания между этими оболочками [2]. Несмотря на это, задача получения полностью неагрегированных магнитных жидкостей имеет технические трудности [17–19]. Многочисленные эксперименты показывают, что даже в стабилизированных магнитных жидкостях помимо однодоменных одиночных частиц магнетита обычно присутствует некоторое небольшое количество микроагрегатов из малого числа частиц [15–17, 20, 21]. И, хотя при изготовлении магнитные жидкости подвергаются сепарации с целью удаления первичных агрегатов, до конца избавиться от них все равно не удастся [18]. Агрегаты в стабилизированной с помощью поверхностно-активного вещества (ПАВ) магнитной жидкости образуются из-за нарушения баланса между межчастичными силами притяжения и силами отталкивания между их защитными оболочками. Основной причиной этого является наличие дефектов защитных оболочек частиц [16]. Разбавление несущей жидкостью, наличие свободного стабилизатора также могут приводить к образованию агрегатов в магнитной жидкости [17].

Появление агрегатов в магнитных жидкостях может негативно сказываться на возможности их применения в ряде технических устройств. Так, например, нестабильность структуры магнитной жидкости и последующее образование агрегатов оказывает влияние на ее оптические свойства, что может привести к зависимости коэффициентов поглощения, рассеяния и преломления света от времени (так как количество и распределение агрегатов по размерам могут изменяться со временем). Следовательно, исследование стабильности магнитных жидкостей актуально для их применения в оптических устройствах, таких как модуляторы, фильтры и т.д. Проблема стабильности магнитных жидкостей является актуальной при их применении и в других технических сферах, а также для проверки качества получаемых магнитных жидкостей при разработке новых методов их изготовления.

Наличие связи между оптическими свойствами магнитной жидкости и ее структурой позволяет использовать различные оптические методы для характеристики структурных особенностей магнитной жидкости и динамики их изменения. Так, например, в [11, 21, 22] анализ структуры и оптических свойств магнитных жидкостей проводился путем исследования динамического и статического рассеяния света. С использованием данных методов было показано, что в магнитных жидкостях действительно имеется некоторое количество агрегатов частиц даже в отсутствие внешнего поля. Присутствие агрегатов также может оказывать влияние на магнитооптические эффекты в магнитных жидкостях, поэтому ана-

лиз поведения магнитной жидкости в магнитном поле может проводиться и другими оптическими методами, основанными на исследовании анизотропии (двулучепреломления и дихроизма), возникающей во внешнем поле [15]. В настоящей работе для исследования оптических свойств магнитных жидкостей и динамики изменения их структуры во времени предлагается использовать оптико-акустический (ОА) метод.

ОА-методы диагностики основаны на термооптическом механизме возбуждения акустических волн при поглощении импульсного или модулированного непрерывного лазерного излучения исследуемой средой (см., например, [23, 24]). Если в рассматриваемой среде происходит поглощение лазерного импульса, длительность которого много меньше времени пробега акустической волны по области тепловыделения, то профиль давления возбуждаемого ОА-сигнала будет повторять пространственное распределение источников тепла в этой среде [23, 24]. Временной профиль возбуждаемого ОА-импульса, соответствующий пространственному распределению интенсивности света в среде, будет определяться коэффициентами поглощения и рассеяния света. Анализ формы переднего фронта возбуждаемого в исследуемой жидкости ОА-сигнала позволяет измерить величину коэффициента экстинкции света и восстановить его пространственное распределение по глубине жидкости. Примеры применения ОА-метода для исследования оптических свойств некоторых коллоидных сред можно найти, например, в работах [24, 25].

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей ОА-метода для исследования динамики изменения оптических свойств разбавленных магнитных жидкостей со временем. Для этого проводится измерение коэффициента экстинкции света в магнитных жидкостях сразу после разбавления, а затем после некоторого определенного промежутка времени. Преимущество метода заключается в том, что он позволяет измерить как средний по глубине коэффициент экстинкции света в магнитной жидкости, так и восстановить его распределение по глубине с достаточно высоким пространственным разрешением.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭКСТИНКЦИИ

Пусть в исследуемой жидкой среде поглощается короткий лазерный импульс, такой, что $\mu_{\text{eff}}c_0\tau_L \ll 1$ (где μ_{eff} – коэффициент экстинкции света в среде, определяемый коэффициентами поглощения и рассеяния, c_0 – скорость звука в этой среде, τ_L – длительность лазерного импульса). В рассматриваемом случае передний фронт давления ОА-сигнала $p(\tau < 0)$ повторяет пространственное распре-

деление интенсивности света в этой среде, а временной профиль сигнала будет определяться коэффициентом экстинкции света μ_{eff} [23, 24]. Время $\tau = t - z/c_0$ соответствует системе координат, бегущей со скоростью распространения акустической волны в данной среде. Подробное описание теории ОА-эффекта для поглощающих и рассеивающих сред изложено в работе [24]. При использовании схемы с прямой регистрацией ОА-сигналов в исследуемой жидкости (излучатель – лазерный пучок и приемник находятся с противоположных сторон от исследуемой среды) время $\tau = 0$ будет соответствовать моменту прихода на приемник сигнала, возбуждаемого на поверхности жидкости ($z = 0$). Временной и пространственный масштабы связаны как $z = -c_0\tau$, ось z направлена в глубину среды. Рассмотрим случай, когда исследуемая среда имеет пространственную неоднородность распределения коэффициента экстинкции. Если характерный радиус лазерного пучка a много больше глубины проникновения света в среду $z_L \approx \mu_{\text{eff}}^{-1}$, то лазерный пучок может считаться коллимированным [24]. Это позволяет ограничиться одномерной задачей термооптического возбуждения звука в жидкости и рассматривать распределение экстинкции только по ее глубине z . В таком случае имеет место зависимость $\mu_{\text{eff}}(z)$, а формула для переднего фронта ОА-сигнала может быть записана следующим образом [23, 24]:

$$p(\tau) \sim \mu_{\text{eff}}(-c_0\tau) \exp\left(-\int_0^{-c_0\tau} \mu_{\text{eff}}(\xi) d\xi\right). \quad (1)$$

Используя (1), можно определить величину коэффициента экстинкции света и восстановить его пространственное распределение $\mu_{\text{eff}}(z)$ в исследуемой жидкости:

$$\frac{\partial \ln p(\tau)}{c_0 \partial \tau} = \mu_{\text{eff}}(-c_0\tau) = \mu_{\text{eff}}(z). \quad (2)$$

Для исследования оптических свойств магнитных жидкостей в данной работе использовалась экспериментальная установка, показанная на рис. 1. ОА-сигналы возбуждались в жидкости излучением импульсного Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности. Длина волны излучения составляла 1064 нм, характерная длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 10 мДж, частота повторения импульсов 10 Гц. Величина энергии лазерного импульса могла варьироваться нейтральными светофильтрами, с помощью поворотной призмы излучение направлялось на кювету с исследуемой средой. Для создания коллимированного падающего пучка с гладким распределением интенсивности света использовался стеклянный светорассеиватель, устанавливаемый над кюветой. Диаметр кюветы составлял 2 см, высота

слоя исследуемой магнитной жидкости – 5 мм. Диафрагма создает воздушный слой между рассеивателем и жидкостью для реализации акустически свободной границы. ОА-сигнал, возбуждаемый в магнитной жидкости в данном режиме, представляет собой импульс сжатия и последующий импульс разрежения, временная форма фронтов которого зависит от оптических и акустических свойств жидкости [23]. Оптическое излучение попадает в исследуемую жидкость и возбуждает в ней ОА-сигнал, который регистрируется встроенным в дно кюветы широкополосным пьезоэлектрическим приемником, изготовленным на основе поливинилиденфторидной пленки толщиной 30 мкм и имеющим рабочую полосу частот 0.1–30 МГц. Электрические сигналы с пьезоприемника передавались на цифровой двухканальный запоминающий осциллограф Tektronix с аналоговой полосой частот 200 МГц и максимальной чувствительностью 2 мВ/деление, а затем обрабатывались на персональном компьютере.

Максимальная величина коэффициента экстинкции света, которую возможно измерить с использованием предлагаемой методики, зависит от длительности лазерного импульса τ_L . Оценка максимальной величины μ_{eff} проводится на основе результатов детально описанной в [23, 26] теории термооптического возбуждения звука в жидкостях с низкой теплопроводностью при произвольной длительности лазерного импульса. Анализ изменения формы фронта ОА-сигнала при увеличении параметра $\mu_{\text{eff}}c_0\tau_L$ позволяет сделать вывод, что для измерения коэффициента экстинкции в жидкости необходимо выполнение условия $\mu_{\text{eff}} < 0.5/c_0\tau_L$ [23, 26]. Для малых значений μ_{eff} ограничения возникают из-за сильного падения амплитуды регистрируемого сигнала, близкой к уровню шумов, а также из-за дифракции низкочастотных компонент спектра акустического сигнала. Для жидкостей с $c_0 \approx 1400$ м/с при $\tau_L = 10$ нс диапазон измеряемых значений коэффициента экстинкции составляет 5–350 см^{-1} .

ИССЛЕДУЕМЫЕ ЖИДКОСТИ

Магнитные жидкости состоят из диспергированных в несущей среде однодоменных магнитных частиц нанометрового размера (5–20 нм), покрытых ПАВ, необходимым для стабилизации дисперсной системы [17, 18, 21]. В качестве стабилизатора чаще всего используются жирные кислоты: олеиновая, линолевая или стеариновая. В магнитных жидкостях, стабилизированных олеиновой кислотой, основной причиной образования микроскопических агрегатов наночастиц являются дефекты защитных оболочек [16]. В таком случае могут образовываться как сферические

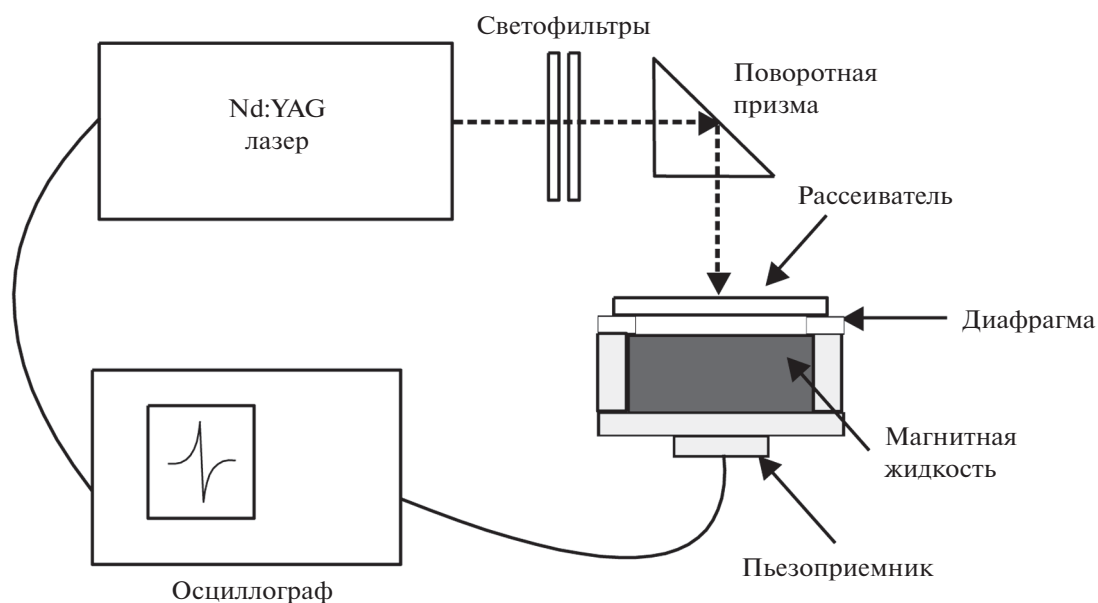


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (пояснения в тексте).

микроагрегаты, так и короткие цепочки (из 2–3 частиц) [16, 17]. Характерные размеры агрегатов определяются количеством дефектов и их распределением по поверхности частиц. Стабильность магнитной жидкости, как уже было сказано, обусловлена балансом сил притяжения и отталкивания между частицами и зависит от соотношения магнетита, ПАВ и несущей жидкости. При разбавлении это соотношение изменяется, поэтому в разбавленной магнитной жидкости количество агрегатов увеличивается по сравнению с неразбавленной. Кроме того, в разбавленных магнитных жидкостях возможна десорбция ПАВ с поверхностей частиц, вследствие чего увеличивается вероятность их слипания (т.е. увеличивается число дефектов защитных оболочек) [16, 27]. Наличие свободного ПАВ также может влиять на процесс агрегации частиц [17]. В отличие от случая неразбавленных стабилизированных магнитных жидкостей, в процессе разбавления могут появляться цепочечные, а также квазисферические агрегаты из более чем 3-х частиц. Таким образом, разбавление магнитной жидкости приводит к нарушению ее стабильности и образованию агрегатов частиц (в дополнение к тем, которые образовались в процессе производства). Распределение агрегатов по размерам и их количество в разбавленной магнитной жидкости может изменяться со временем [21].

Исходя из сказанного выше, для демонстрации возможности исследования изменения оптических свойств магнитной жидкости вследствие утраты стабильности в качестве примера можно взять разбавленную жидкость. В настоящей работе были исследованы магнитные жидкости на ос-

нове воды с различной объемной концентрацией n частиц магнетита (Fe_3O_4). Концентрация частиц варьировалась путем разбавления исходной магнитной жидкости дополнительным количеством несущей жидкости. Для проведения экспериментов были получены две группы образцов магнитных жидкостей – с более высоким содержанием магнетита и с более низким. Процентный состав компонентов в исследуемых магнитных жидкостях приведен в табл. 1. В первую группу входят жидкости с n частиц магнетита от 3.15 до 4.2%, во вторую – с n от 0.35 до 1.4%. Под объемной концентрацией олеиновой кислоты в случае неразбавленной магнитной жидкости подразумевается объемная доля ПАВ, адсорбированного на частицах, а для исследуемых разбавленных жидкостей (см. табл. 1) – общее количество стабилизатора, адсорбированного на частицах и свободного (при разбавлении вследствие десорбции часть олеиновой кислоты может переходить в свободное состояние). Диапазон концентраций выбирался исходя из возможностей применения таких магнитных жидкостей в оптических устройствах [3, 4, 7–9, 11], а также с учетом ограничений, накладываемых методом при данных условиях экспериментов. Для измерения коэффициента экстинкции света по предложенной методике, как было сказано выше, необходимо, чтобы имело место неравенство $\mu_{\text{eff}}c_0\tau_L < 0.5$; для исследуемых концентраций при $\tau_L = 10$ нс данное условие выполняется. Следует отметить, что при использовании лазера с длительностью импульса 10 нс восстановление распределения оптических свойств по предлагаемой методике можно проводить до величины μ_{eff}

Таблица 1. Состав исследованных магнитных жидкостей

Магнитные жидкости	Номер образца	Несущая жидкость, %	Fe ₃ O ₄ , %	Стабилизатор (олеиновая кислота), %
Группа 1 (более высокая концентрация магнетита)	1	94	4.2	1.8
	2	94.5	3.85	1.65
	3	95	3.5	1.5
	4	95.5	3.15	1.35
Группа 2 (более низкая концентрация магнетита)	5	98	1.4	0.6
	6	98.5	1.05	0.45
	7	99	0.7	0.3
	8	99.5	0.35	0.15

$= 350 \text{ см}^{-1}$, что соответствует концентрации частиц магнетита $n \approx 7\%$. Для изучения жидкостей с концентрацией магнетита порядка десятков процентов необходимо использовать лазер с более короткими импульсами.

При взаимодействии лазерного излучения (на используемой длине волны 1064 нм) с исследуемой магнитной жидкостью в ней одновременно будет происходить поглощение и рассеяние света частицами магнетита. Рассеянный свет также дополнительно поглощается этими частицами. Кроме того, некоторое поглощение света имеет место и в несущей жидкости. Таким образом, форма возбуждаемого в магнитной жидкости ОА-сигнала определяется коэффициентом экстинкции света и зависит от суммарного поглощения падающего и рассеянного излучений. Для последующего восстановления пространственного распределения μ_{eff} возбуждаемый в жидкости ОА-сигнал усреднялся по 128 реализациям, время эксперимента с каждым образцом составляло менее минуты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пример зарегистрированного в магнитной жидкости ОА-сигнала показан на рис. 2а. Время по оси абсцисс соответствует $\tau = t - z/c_0$ (см. выше). Переход от временного представления к координатному осуществляется через соотношение $z = -c_0\tau$ (где z соответствует глубине зондирования исследуемой среды). Передний фронт ОА-сигнала в координатном представлении показан на рис. 2б.

Максимально возможная глубина зондирования z_{max} при исследовании магнитной жидкости зависит от величины коэффициента экстинкции света и динамического диапазона D системы регистрации акустических сигналов. Динамический диапазон применяемой в данной работе системы позволяет измерять экстинкцию света в приповерхностном слое жидкости до глубины

$z_{\text{max}} \approx 3\mu_{\text{eff}}^{-1}$. Таким образом, для исследуемого образца магнитной жидкости с минимальной концентрацией z_{max} достигает 1700–3000 мкм (в зависимости от изменения величины μ_{eff} со временем), а для образца с максимальной концентрацией –

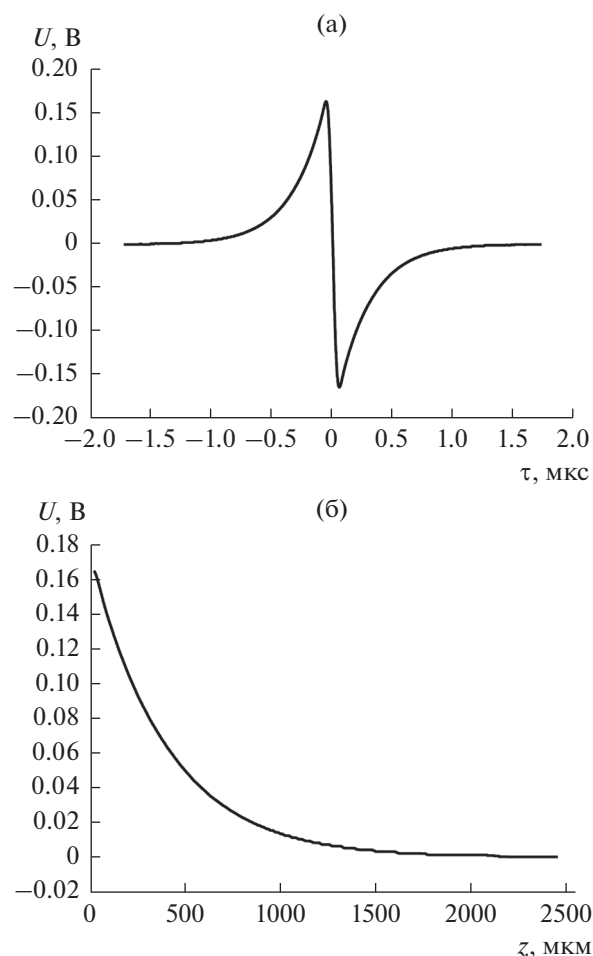


Рис. 2. Временной профиль зарегистрированного в магнитной жидкости ОА-сигнала (а) и передний фронт этого сигнала в координатном представлении (б).

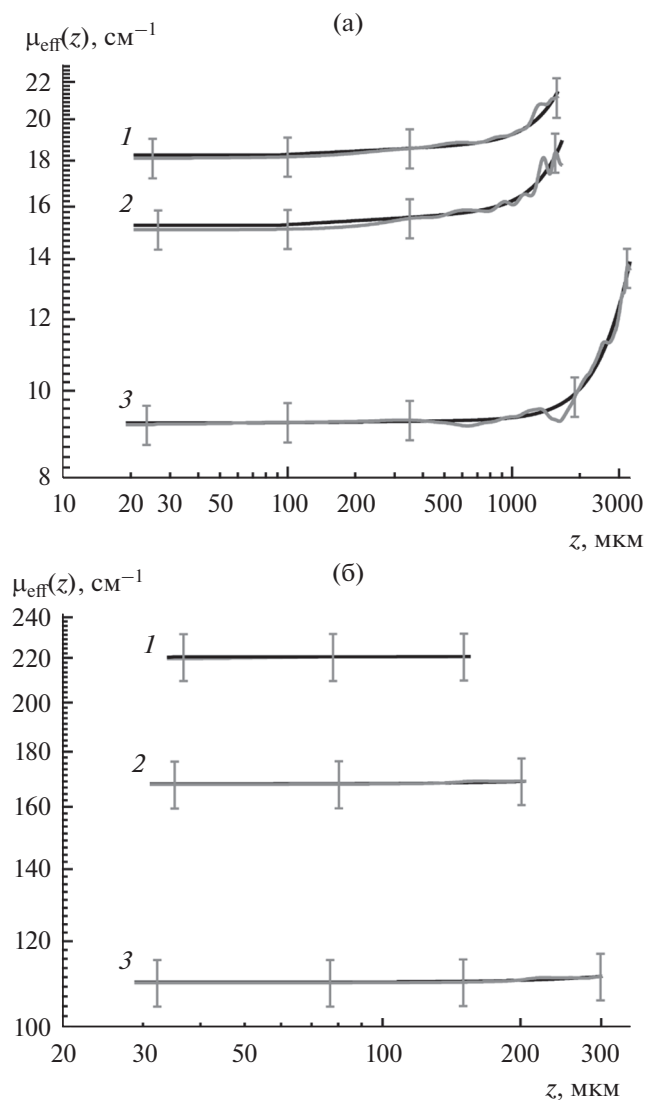


Рис. 3. Распределения коэффициента экстинкции света по глубине магнитных жидкостей с $n = 0.35\%$ (а) и $n = 4.2\%$ (б): 1 – исходная жидкость сразу после разбавления, 2 – через 7 дней, 3 – через 30 дней.

150–300 мкм. Минимальная глубина для восстановления распределения μ_{eff} будет также зависеть от его величины и соответственно концентрации исследуемой магнитной жидкости. Это связано с тем, что величина $\mu_{\text{eff}}c_0\tau_L$ оказывает влияние на форму возбуждаемого в среде ОА-сигнала, и ее увеличение выражается в появлении сглаженности вершины сигнала [23, 26]. Для малых глубин зондирования возникает изменение формы фронта, не связанное с реальной неоднородностью коэффициента экстинкции. Таким образом, проводить процедуру восстановления распределения коэффициента μ_{eff} по формуле (2) следует только на том участке фронта, где нет влияния этой сглаженности.

Восстановление пространственного распределения коэффициента экстинкции света по глубине исследуемой магнитной жидкости $\mu_{\text{eff}}(z)$ проводилось с использованием формулы (2), расчет производных осуществлялся с помощью стандартных программных средств. Восстановленные зависимости $\mu_{\text{eff}}(z)$ для магнитных жидкостей с наименьшей ($n = 0.35\%$) и наибольшей ($n = 4.2\%$) концентрацией частиц показаны на рис. 3. Кривые 1–3 на рис. 3 соответствуют различным моментам времени после разбавления. Ошибки измерения μ_{eff} определяются точностью метода расчета производной и точностью измерения скорости звука и составляют около 5%. Отметим, что на данных распределениях отдельные поглощающие свет частицы магнетита не будут различимы, а видно лишь неоднородность распределения коэффициента экстинкции, вызванную совокупным действием неравномерно распределенных поглощающих частиц. Это связано с тем, что время релаксации температуры светопоглощающих частиц $\tau_p = R_p^2/4\chi_p$ и время релаксации напряжений в среде τ_a гораздо меньше длительности лазерного импульса (для разрешения сигналов от отдельных частиц необходимо, чтобы τ_p и $\tau_a = d/2c_0$ были больше или равны длительности лазерного импульса).

Из рис. 3а следует, что для магнитной жидкости с $n = 0.35\%$ наблюдается некоторое возрастание коэффициента экстинкции света с глубиной, превышающее погрешность измерений. Величина относительного изменения коэффициента экстинкции в данном диапазоне глубин $\Delta\mu_{\text{eff}} = (\mu_{\text{eff}}^{\text{max}} - \mu_{\text{eff}}^{\text{min}})/\mu_{\text{eff}}^{\text{max}}$ является функцией времени. Для исходного состояния магнитной жидкости (сразу после разбавления) при $n = 0.35\%$ (рис. 3а) $\Delta\mu_{\text{eff}}$ составляет 16%, через 7 дней $\Delta\mu_{\text{eff}}$ увеличивается до 19%, а через 30 дней – до 33%. Подобное увеличение $\Delta\mu_{\text{eff}}$, хотя и в меньшей степени, наблюдается и для других малых концентраций $n = 0.7, 1.5$ и 1.4% . В то же время для образца с исходной концентрацией $n = 4.2\%$, вне зависимости от времени, прошедшего после разбавления, $\mu_{\text{eff}}(z) = \text{const}$ в доступном для измерений диапазоне глубин с учетом погрешностей эксперимента. Для других магнитных жидкостей из группы более концентрированных ($n = 3.15, 3.5$ и 3.85%) в пределах погрешностей измерения также $\mu_{\text{eff}}(z) \approx \text{const}$. Таким образом, в магнитных жидкостях из группы с меньшей концентрацией частиц Fe_3O_4 в исследуемом диапазоне глубин наблюдается некоторое изменение коэффициента экстинкции света с глубиной. Это, по-видимому, связано с особенностями изменения структуры жидкости при разбавлении и с последующей агрегацией частиц.

На рис. 4 показаны зависимости среднего коэффициента экстинкции света (μ_{eff}) от исходной концентрации магнитных жидкостей сразу после их разбавления, через 7 сут и через 30 сут (величина $\langle \mu_{\text{eff}} \rangle$ соответствует среднему коэффициенту экстинкции по данной глубине зондирования). Из полученных данных следует, что через 7 сут величина коэффициента экстинкции уменьшается на 18–23% относительно начальной (в зависимости от концентрации), а через 30 сут — на 50%. При этом небольшое уменьшение коэффициента экстинкции света, не сильно превышающее ошибку измерения, регистрируется уже на следующие сутки после разбавления.

Обнаруженное уменьшение величины коэффициента экстинкции света со временем является следствием структурных изменений, происходящих в разбавленной магнитной жидкости. Разбавление магнитной жидкости дополнительным количеством несущей жидкости приводит к нарушению ее стабильности и возникновению агрегатов частиц, причем распределение этих агрегатов по размерам неустойчиво и может изменяться со временем, что приводит к изменению оптических свойств образца. Характер установления распределения агрегатов по размерам зависит от исходных характеристик магнитной жидкости [21].

Следует отметить, что изменение коэффициента экстинкции света и его пространственного распределения со временем может быть следствием не только образования агрегатов частиц, но и седиментации агрегатов и частиц. В данной работе влияние седиментации частиц и агрегатов предполагается слабым относительно влияния агрегации. Для уменьшения влияния седиментации на пространственное распределение частиц (и, как следствие, на распределение коэффициента экстинкции) жидкость не оставляли в ячейке на нескольких дней до следующего измерения, а удаляли и затем помещали в ячейку заново, предварительно тщательно перемешав. Как было сказано выше, время проведения эксперимента с каждым помещенным в ОА-ячейку образцом магнитной жидкости составляло менее минуты. За данное время изменения пространственного распределения коэффициента экстинкции отмечено не было, что говорит о том, что какой-либо заметной седиментации за это время не происходит.

Таким образом, проведенное исследование разбавленных магнитных жидкостей на водной основе демонстрирует изменение коэффициента экстинкции света и его пространственного распределения со временем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продемонстрировано использование лазерного оптико-акустического

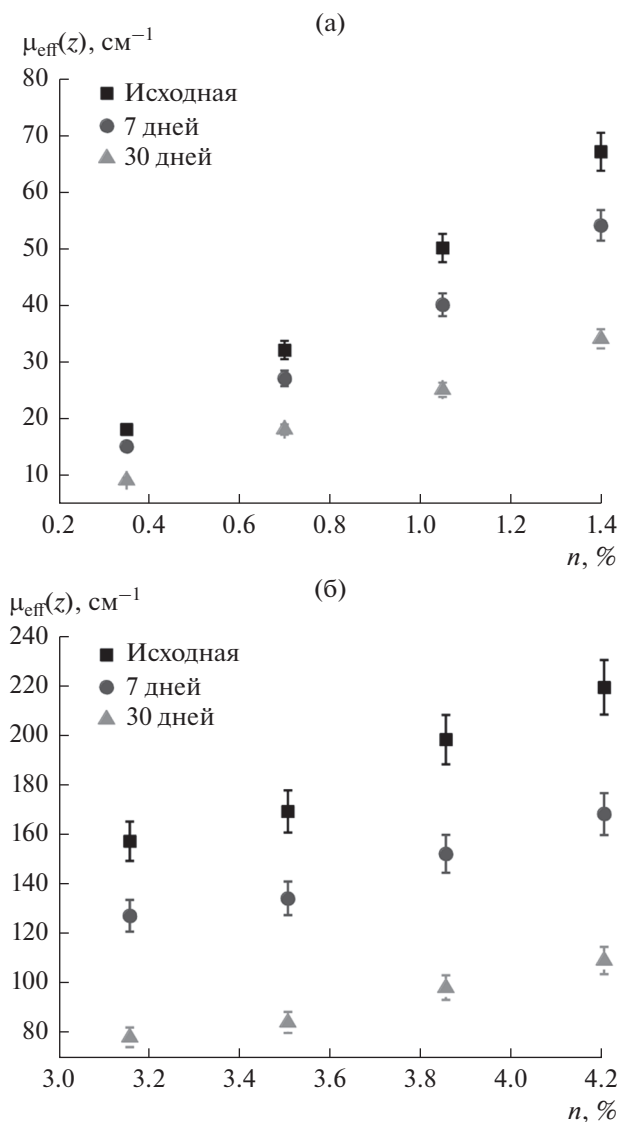


Рис. 4. Изменения во времени среднего по глубине коэффициента экстинкции света магнитных жидкостей с концентрациями $n = 0.35\text{--}1.4\%$ (а) и $n = 3.15\text{--}4.2\%$ (б) после их разбавления.

метода для наблюдения изменения коэффициента экстинкции света в нестабильных магнитных жидкостях со временем. Для нарушения стабильности исходных магнитных жидкостей они были дополнительно разбавлены несущей жидкостью. Проведено восстановление пространственного распределения коэффициента экстинкции света по глубине исследуемой магнитной жидкости с достаточно высоким пространственным разрешением. Показано, что через 7 сут после разбавления коэффициент экстинкции света уменьшается примерно на 20%, а через 30 сут его величина уменьшается в два раза. При этом структурные изменения в магнитной жидкости, вызывающие деградацию ее оптических свойств,

начинает проявляться уже через 1–2 сут после разбавления жидкости.

Предлагаемый ОА-метод, во-первых, может быть использован для исследования оптических свойств магнитных жидкостей и их пространственного распределения по глубине при разработке оптических устройств на их основе. Во-вторых, данным методом можно оценивать стабильность магнитных жидкостей, получаемых по новым технологиям, и магнитных жидкостей с новым типом стабилизатора или несущей жидкости. Это позволит судить о возможности применения таких магнитных жидкостей в оптических устройствах. Наконец, ОА-метод может быть использован для анализа изменения оптических свойств магнитных жидкостей во внешних электромагнитных полях. Также возможно применение описанного ОА-метода для анализа оптических свойств и структуры других коллоидных систем, в том числе биологических.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Odenbach S.* // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1993. V. 46. P. 263.
2. *Такетоми С., Тикадзуми С.* Магнитные жидкости. М.: Мир, 1993.
3. *Ji H., Pu S., Wang X., Yu G.* // *Optics Commun.* 2012. V. 285. P. 4435.
4. *Zhao Y., Zhang Y., Lv R., Wang Q.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2011. V. 323. P. 2987.
5. *Hong H.E., Hong C.-J., Yang H.C.* // *J. Phys. Chem. Solids.* 2001. V. 62. P. 1749.
6. *Hong C.-Yi.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. V. 201. P. 178.
7. *Hong H.E., Yang S.Y., Tse W.S., Yang H.C., Luo W., Hong C.-Yi.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2002. V. 252. P. 104.
8. *Luo Ya., Lei X., Shi F., Peng B.* // *Optik.* 2018. V. 174. P. 252.
9. *Ying Yu., Xu K., Si G.* // *Optik.* 2020. V. 200. 163561.
10. *Jin J., Jing D.* // *Solar Energy.* 2017. V. 155. P. 51.
11. *Mohapatra D.K., Philip J.* // *Opt. Mater.* 2018. V. 76. P. 97.
12. *Nakatsuka K.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1993. V. 122. P. 387.
13. *Lagutkina D.Yu., Saikin M.S.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V. 431. P. 149.
14. *Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радионов А.В., Ефремов Д.В.* // *Коллоид. журн.* 2015. Т. 77. С. 207.
15. *Chikazumi S., Taketomi S., Ukita M., Mizukami M., Miyajima H., Setogawa M., Kurinara Y.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1987. V. 65. P. 245.
16. *Ляхтина Е.В., Пшеничников А.Ф.* // *Коллоид. журн.* 2006. Т. 68. С. 327.
17. *Ляхтина Е.В., Пшеничников А.Ф.* // *Коллоид. журн.* 2010. Т. 72. С. 231.
18. *Зубарев А.Ю.* // *Коллоид. журн.* 2012. Т. 74. С. 731.
19. *Шуленина А.В., Авдеев М.В., Беседин С.П., Волков В.В., Хойду А., Томбац Е., Аксенов В.Л.* // *Кристаллография.* 2012. Т. 57. С. 94.
20. *Ерин К.В.* // *Коллоид. журн.* 2010. Т. 72. С. 481.
21. *Ерин К.В.* // *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. С. 32.
22. *Ерин К.В.* // *Оптика и спектроскопия.* 2016. Т. 120. С. 333.
23. *Гусев В.Э., Карабутов А.А.* Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
24. *Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Скипетров С.Е.* // *Квантовая электроника.* 1999. Т. 29. С. 215.
25. *Пеливанов И.М., Белов С.А., Соломатин В.С., Хохлова Т.Д., Карабутов А.А.* // *Квантовая электроника.* 2006. Т. 36. С. 1089.
26. *Бурмистрова Л.В., Карабутов А.А., Портнягин А.И., Руденко О.В., Черепецкая Е.Б.* // *Акуст. журн.* 1978. Т. 24. С. 655.
27. *Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.* // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. № 4. С. 75.