

УДК 544.72

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕТОК В ТОНКИХ СЛОЯХ МАГНИТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

© 2022 г. В. Д. Мкртчян¹*, Ю. И. Диканский¹

¹Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, 1, Ставрополь, 355017 Россия

*e-mail: vika_g96@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2022 г.

После доработки 08.08.2022 г.

Принята к публикации 09.08.2022 г.

Приведены результаты исследования формирования гексагональных и лабиринтных структурных решеток в тонких слоях магнитных эмульсий при воздействии магнитного поля, перпендикулярно плоскости слоя. Установлен характер температурной зависимости параметра решеток, обнаружено, что она качественно согласуется с рассчитанной на основе известных теоретических выражений только для решеток лабиринтного типа. Показано, что при использовании для подобных исследований источников лазерного излучения необходимо учитывать проявление термокапиллярных эффектов.

DOI: 10.31857/S0023291222600286

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие магнитного поля, перпендикулярно направленного плоскости слоя магнитной жидкости, содержащей микрокапельные агрегаты, может приводить к формированию в нем упорядоченных структурных решеток. Исследованию таких периодических концентрационных структур, возникающих в тонких слоях магнитных коллоидов, ранее было посвящено достаточно большое количество работ (например, [1–3]). Параметры возникающих структурных решеток определяются величиной магнитной проницаемости микрокапельных агрегатов и омывающей их среды, напряженностью поля и межфазным натяжением на границе капля–среда. Кроме того, существенную роль играет также изначальный размер микрокапель, в зависимости от величины которого могут формироваться как гексагональная, так и лабиринтная структурные решетки [4]. Теоретическое рассмотрение образования периодических концентрационных структур проводилось в работах [3, 5, 6], однако количественное подтверждение установленных закономерностей экспериментально представляет затруднения из-за сложности определения параметров микрокапельных агрегатов. В настоящей работе предприняты экспериментальные исследования структурных решеток, формирующихся в тонких слоях магнитных эмульсий, представляющих собой взвесь микрокапель магнитной жидкости на основе керосина в несмешивающемся с ней масле АМГ-10. Отличительной чертой таких эмульсий является малое межфазное натяжение на границах микрокапель,

в результате чего воздействие магнитного поля приводит к их деформации — вытягиванию вдоль направления поля [7]. Физические параметры микрокапель эмульсии определяются параметрами использованной магнитной жидкости и могут быть легко установлены, что дает возможность сравнения экспериментальных результатов с теоретическими. В ранее проводимых исследованиях структурных решеток основной упор делался на зависимость их параметров от величины напряженности воздействующего магнитного поля. Однако, существенное влияние на структуру решеток может также оказывать и изменение температуры, что и представилось необходимым изучить.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности формирования структурных решеток в магнитном поле изучались с помощью оптического микроскопа типа Биолам, не содержащего намагничивающихся деталей. Микроскоп был снабжен видеокамерой, сопряженной с компьютером. При проведении исследования использовалась установка, изображенная на рис. 1. Кювета представляла собой две прозрачные прямоугольные стеклянные пластины. Между поверхностями стекол помещалась фторопластовая пленка с круглым отверстием посередине, которое заполнялось магнитной эмульсией. Толщина слоя жидкости составляла 50–70 мкм и регулировалась подбором пленок полимера разной толщины. Кювету с исследуемой эмульсией прижимали с помощью механического зажима к термостатирующей системе, которая представляла собой массив-

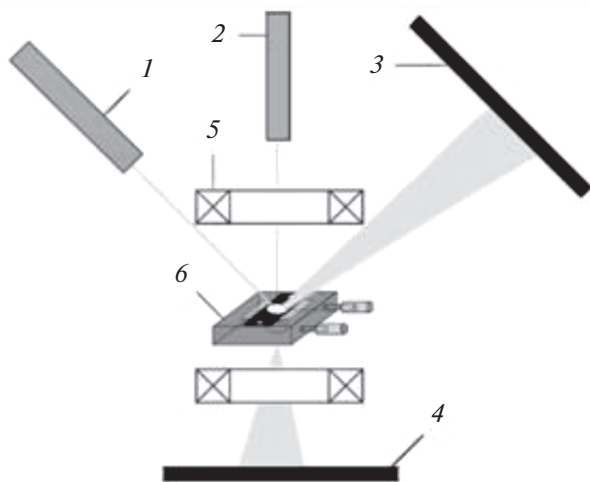


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1, 2 – лазеры, 3, 4 – экраны, 5 – катушки Гельмгольца, 6 – кювета с термостатирующей системой.

ный медный параллелепипед, через пазы в толще которого прокачивалась вода с заданной температурой с помощью жидкостного термостата LAUDA ALPHA. Температуру контролировали с помощью медь-константановой термопары, расположенной под прижатой к термостатирующей системе стенкой кюветы с эмульсией. Для осуществления воздействия магнитным полем, ячейка была снабжена намагничивающей системой (катушками Гельмгольца), создающей однородное поле в объеме, в несколько раз превышающем габариты кюветы

Определение размерных параметров структурных решеток проводилось как с помощью наблюдений в оптический микроскоп, так и исследования дифракционного рассеяния света. С этой целью через слой эмульсии пропускался луч лазера (LASOS, 15 мВт, 633 нм) перпендикулярно плоскости слоя. Возникающая дифракционная картина наблюдалась на экране, расположенном на расстоянии 55 см от кюветы с образцом.

Исследования были проведены для двух образцов эмульсий. Образец № 1 был получен путем эмульгирования магнитной жидкости на основе керосина с магнетитовыми частицами в масле типа АМГ-10. Аналогичным образом был получен образец № 2, однако для его получения была использована не однородная магнитная жидкость (как для образца № 1), а содержащая хорошо развитую систему намагниченных агрегатов, исследование особенностей намагничивания которой ранее проводилось в [8, 9].

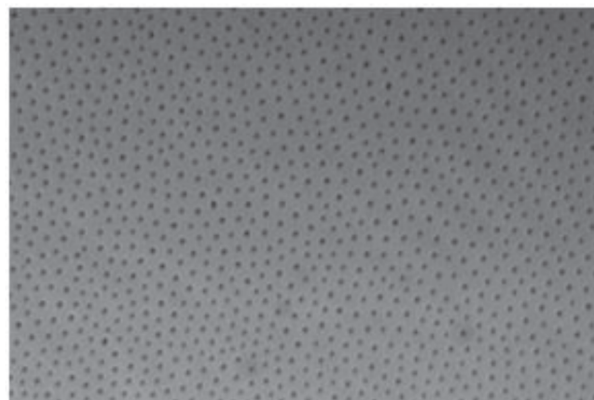


Рис. 2. Гексагональная решетка, сформированная при температуре 308 К в слое образца № 1 в перпендикулярном слое магнитном поле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выяснено, что воздействие магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости тонкого слоя исследованных образцов, приводит к формированию гексагональной структурной решетки, аналогичной полученной ранее для магнитной жидкости с микрокапельными агрегатами [1, 2]. В качестве примера на рис. 2 приведена гексагональная решетка, наблюдавшаяся в образце № 1. Оказалось, что период полученной решетки существенно зависит не только от напряженности воздействующего магнитного поля, но и температуры. На рис. 3 приведена температурная зависимость периода решетки, полученная при использовании образца № 1.

Как можно видеть из рисунка, после первоначального увеличения, рост периода решетки за-

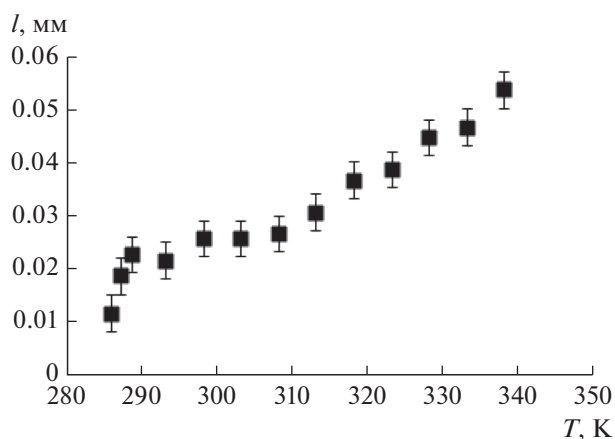


Рис. 3. Температурная зависимость периода решетки, сформированной магнитным полем в тонком слое образца № 1.

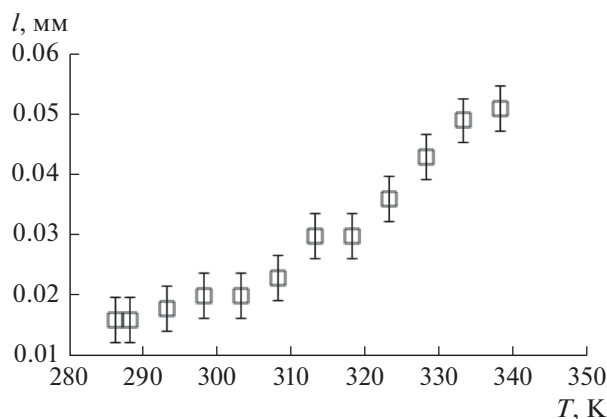


Рис. 4. Температурная зависимость периода решетки, сформировавшейся в образце № 2.

медляется в интервале температур 293–308 К, после чего период вновь монотонно возрастает. Зависимость периода аналогичной решетки, полученной при использовании образца № 2, приведена на рис. 4. Для этой решетки также наблюдается увеличение роста ее периода после достижения температуры 303 К.

При пропускании лазерного луча через слой эмульсии, с сформировавшейся под действием магнитного поля гексагональной решеткой, на экране наблюдалась дифракционная картина в виде одного или нескольких колец (рис. 5, образец № 2). На рис. 6 приведены температурные зависимости относительного радиуса первого дифракционного кольца, полученные на дифракционных решетках, сформировавшихся в образцах № 1 и № 2. Очевидно, результаты исследований дифракционного рассеяния свет на упорядоченных структурах могут быть использованы для оценки их размерных параметров. Для этого, необходимо определить связь углового диаметра дифракционного кольца и периода гексагональной решетки.

Явление дифракции света на гексагональной структуре ранее было рассмотрено в [3]. Интенсивность дифрагированного света определяется значениями функций интерференции на сфере Эвальда [10], из построения которых вытекает условие для углового диаметра дифракционного круга $\theta = 7\lambda/2\pi l$ (λ – длина волны света, l – расстояние между двумя соседними вытянутыми каплями). Таким образом, размерный параметр (период) решетки может быть оценен при использовании экспериментально определенного значения углового диаметра дифракционного кольца, который в свою очередь, определяется значением его радиуса. В соответствии с этим соотношением наблюдается удовлетворительная корреляция температурных зависимостей периода дифракционной решетки и радиуса дифракционного кольца.

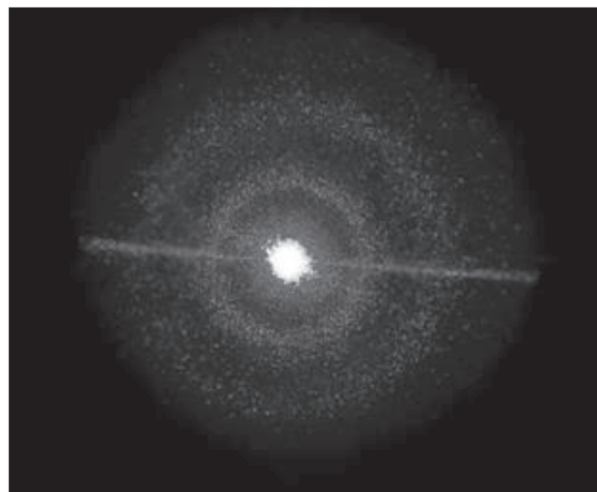


Рис. 5. Дифракционная картина, наблюдающаяся при пропускании лазерного луча через слой эмульсии в перпендикулярном слое магнитном поле.

Следует отметить, что при использовании лазерных источников света для исследования структуры жидких объектов необходимо учитывать возможность локального изменения температуры в результате воздействия лазерного излучения. Оно может привести к проявлению термокапиллярных эффектов, существенным образом влияющих на структуру объекта. Так, известно [11–13], что воздействие луча лазера на свободную поверхность жидкости вызывает термокапиллярную конвекцию, обусловленную изменением поверхностного натяжения. В результате этого происходит деформация поверхности в виде углубления, профиль которого определяется рядом факторов. Результаты исследования такого эффекта на поверхности магнитных коллоидов приведены нами ра-

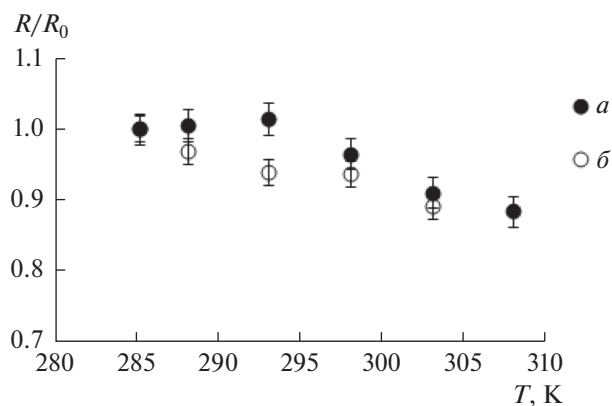


Рис. 6. Температурные зависимости относительного радиуса первого дифракционного кольца, полученные на гексагональных решетках: *a* – образец № 1, *б* – образец № 2.

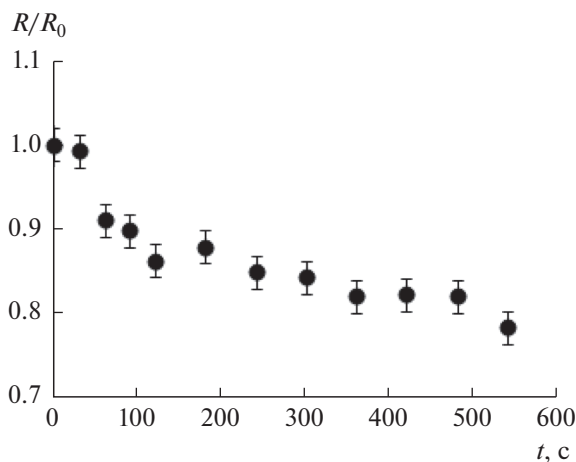


Рис. 7. Зависимость относительной величины радиуса дифракционного кольца от времени после включения лазера (структурная решетка, сформирована магнитным полем в слое эмульсии, ограниченном с обеих сторон стеклянными поверхностями).

нее в [14]. Очевидно, в случае магнитной эмульсии, являющейся двухфазной средой изменение температуры приведет к изменению не только поверхностного натяжения ее свободной поверхности, но и межфазного натяжения на границах микрокапель, на что уже обращалось внимание выше. Сочетание таких факторов может привести к существенному изменению структуры эмульсии, сформировавшейся при воздействии магнитного поля.

Действительно, при использовании более мощного лазера (Laser 301, 532 нм, 500 мВт) было замечено изменение радиуса дифракционного кольца в течение некоторого времени после включения лазера (рис. 7). Очевидно, это связано как с изменением межфазного натяжения, так и намагниченности среды микрокапель в результате нагрева образца в области падения лазерного луча.

Более существенное влияние термокапиллярного эффекта на результаты исследования рассеяния света тонкими слоями жидких сред наблюдается при открытой поверхности слоя. В этом случае при отражении лазерного луча от образовавшегося на поверхности жидкости углубления формируется интерференционная картина, называемая ТК откликом. При достаточно малой толщине слоя можно также наблюдать интерференционное пятно и в проходящем свете. Подобный эффект искажает дифракционную картину, сформировавшуюся структурной решеткой эмульсии. Так на рис. 8а приведена дифракционная картина, полученная после пропускания через слой эмульсии (образец № 1) с открытой поверхностью луча лазера типа Laser 301, интенсивность которого предварительно была уменьшена на 75% за счет фильтра. Как можно видеть, она аналогична полученной при использовании лазера малой

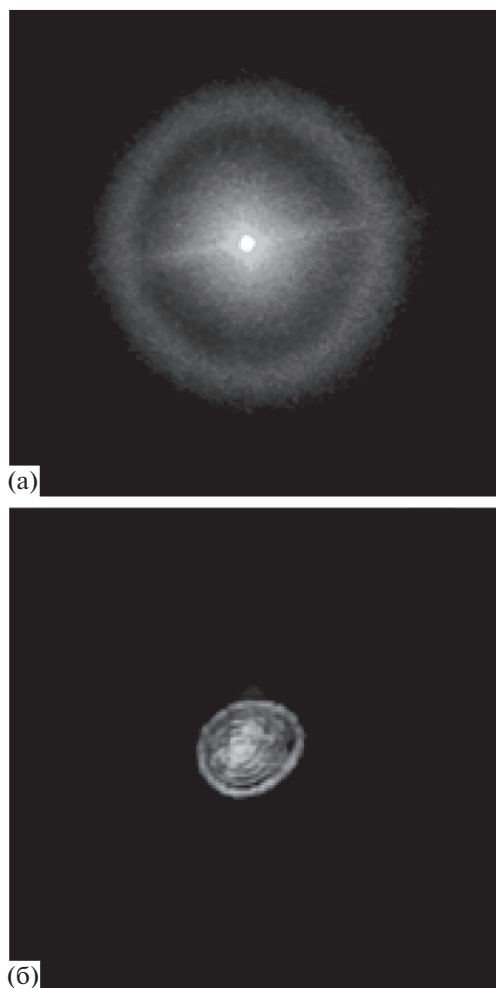


Рис. 8. Дифракционная картина, полученная после пропускания через слой эмульсии с открытой поверхностью луча лазера: (а) с использованием нейтрального фильтра, (б) без фильтра.

мощности при пропускании его луча через слой эмульсии, ограниченном твердыми поверхностями. При удалении фильтра дифракционная картина претерпевает существенные изменения (рис. 8б), при этом отраженный луч формирует на экране характерную для термокапиллярного эффекта интерференционную картину (рис. 9).

Оказалось, что повышение объемного содержания микрокапель в эмульсии может привести к изменению характера структуры, формирующейся в ее тонких слоях при воздействии перпендикулярно направленного поля. Так, в этом случае может наблюдаться не гексагональная, а лабиринтная структурная решетка. Ее период зависит как от величины напряженности приложенного магнитного поля, так и температуры. В качестве примера на рис. 10 представлены фотографии такой структуры, полученные при различной температуре.

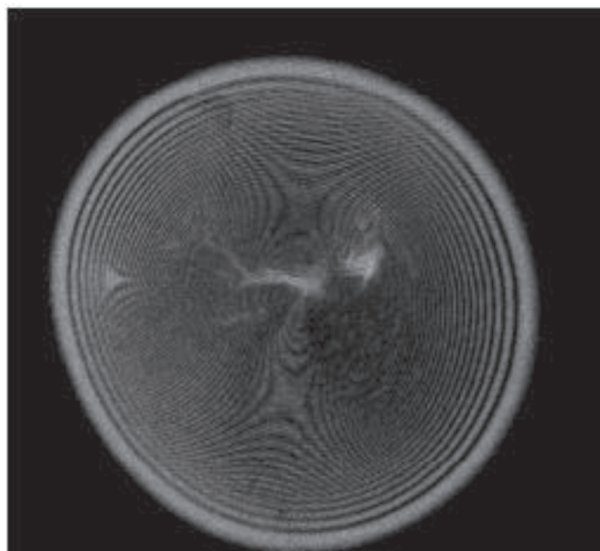


Рис. 9. Дифракционная картина, полученная при отражении луча лазера от слоя эмульсии с открытой поверхностью.

При пропускании через такую структуру луча лазера небольшой мощности наблюдается дифракционная картина в виде колец (рис. 11), по характеру аналогичная полученной на гексагональной решетке. На рис. 12 представлены графики зависимости радиуса первого дифракционного кольца от напряженности приложенного магнитного поля (а) и температуры (б), характеризующие изменение периода структуры. Ранее в работе [15] нами наблюдалась подобная дифракционная картина, полученная на решетках лабиринтного типа, формирующихся в тонком слое эмульсии в переменном электрическом поле низкой частоты. Анализ рассеяния света подобными структурами был проведен методом численного расчета дифракционной картины, на основе микроскопических изображений наблюдаемых структур. Результаты проведенных расчетов подтвердили характер визуально наблюдаемой дифракционной картины.

Установлено, что лабиринтная структура, образующаяся в слое эмульсии с открытой поверхностью в большей степени подвержена воздействию температуры, чем гексагональная решетка, полученная в ограниченном слое эмульсии. Так, изменение радиуса дифракционного кольца от времени после включения лазера наблюдается даже при использовании лазера небольшой мощности (рис. 13). При этом наблюдается его увеличение со временем, а не уменьшение, как в подобной ситуации в случае дифракции на гексагональной структуре. Последнее обусловлено увеличением радиуса кольца (уменьшение периода решетки) при первоначальном повышении температуры (рис. 12б).

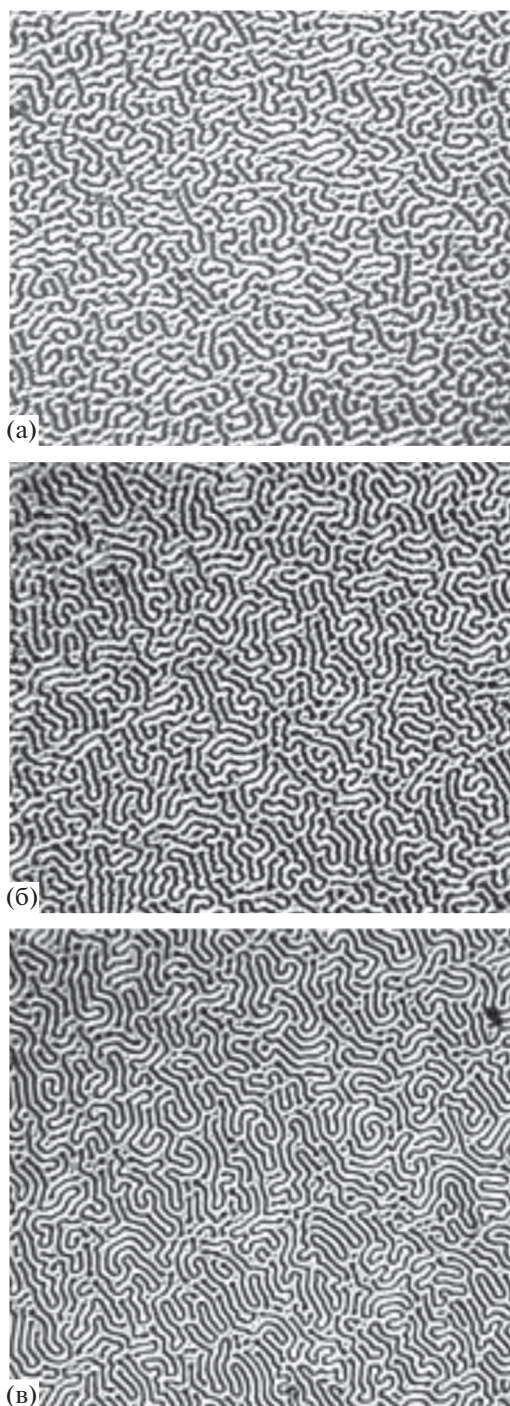


Рис. 10. Образование лабиринтной структуры в слое образца № 1 при различных температурах: (а) $T = 288$ К, (б) $T = 303$ К, (в) $T = 323$ К.

Воздействие на лабиринтную структуру луча лазера типа Laser 301 без использования ослабляющего его интенсивность фильтра приводит к кардинальному изменению ее характера вследствие возникновения термокапиллярного эффекта. В качестве подтверждения этого на рис. 14

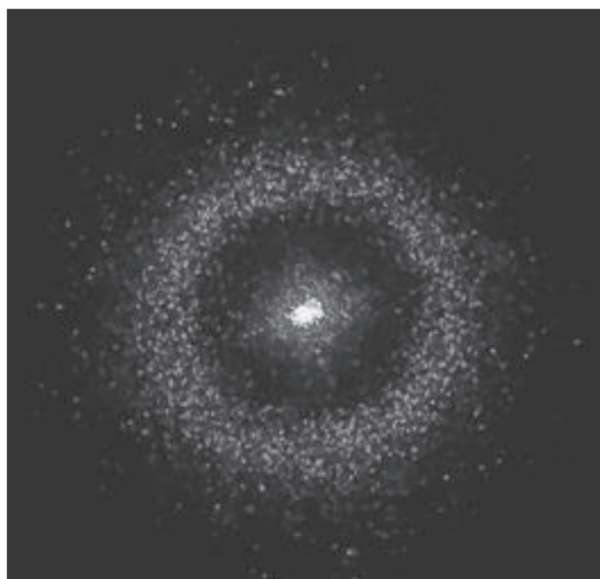


Рис. 11. Дифракционная картина, образующаяся при пропускании лазерного луча небольшой мощности через лабиринтную решетку, сформировавшуюся в слое эмульсии в магнитном поле.

приведена фотография изменения лабиринтной структуры при воздействии на образец луча такого лазера (точка падения луча находится вне видимого поля вблизи правого верхнего угла фотографии). Очевидно, наблюдающиеся структурные изменения связаны с термокапиллярной конвекцией, вызванной тепловым действием лазера. Как видно из рис. 14, возникающие локальные конвективные течения приводят к выпрямлению изогнутых полос лабиринтной структуры в непосредственной близости от точки падения луча.

Следует указать на различный характер температурных зависимостей параметров гексагональной и лабиринтной решеток, что хорошо видно из сравнения температурных зависимостей радиусов дифракционных колец, полученных при пропускании через эти структуры луча лазера малой мощности (рис. 6 и 12б). Для выяснения причин этого различия необходимо рассмотреть условия устойчивости обеих структурных решеток. Анализ условий образования гексагональной структуры ранее был рассмотрен А.О. Цеберсом [3]. Им было получено выражение для характерного масштаба решетки в виде:

$$l = \pi\sqrt{2\pi\sigma h}/\sqrt{\mu_0(M_2 - M_1)}, \quad (1)$$

где h – толщина слоя, σ – межфазное натяжение на границе полоса–среда, $(M_2 - M_1)$ разность намагниченностей полос и окружающей их среды.

Последнее выражение может быть представлено в виде:

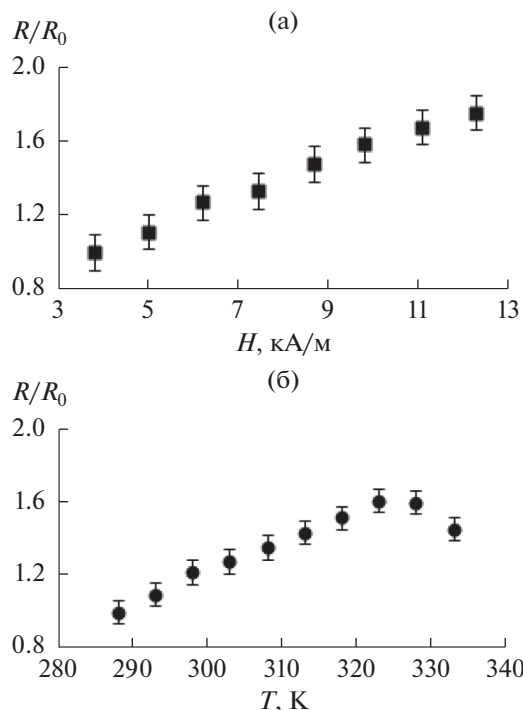


Рис. 12. Зависимость радиуса дифракционного кольца от напряженности приложенного магнитного поля (а) и температуры (б).

$$l = \pi h / \sqrt{B_m}, \quad (2)$$

где $B_m = \mu_0 M^2 / 2\pi\sigma$ – магнитное число Бонда (здесь учтено, что элементы из магнитной жидкости омываются немагнитной средой).

Как следует из (1), характер температурной зависимости масштаба гексагональной структуры

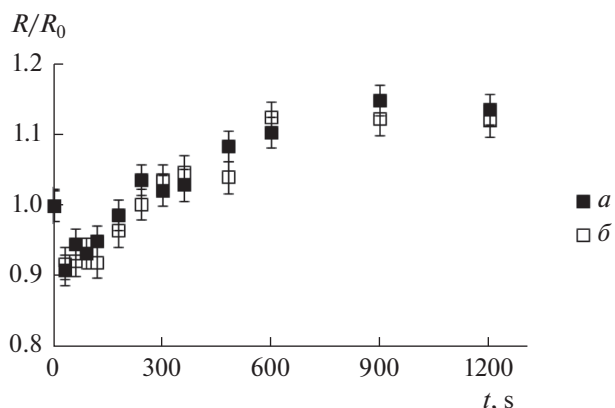


Рис. 13. Зависимость радиуса дифракционного кольца от времени после включения лазера: (а) получена при использовании лазера типа LASOS мощностью 15 мВт, (б) при использовании лазера типа Laser 301 мощностью 500 мВт с фильтром, ослабляющим его интенсивность на 75%.

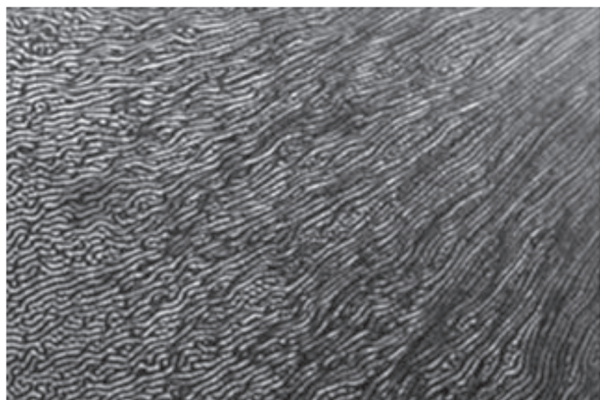


Рис. 14. Изменение характера структурной решетки при воздействии на нее луча лазера типа Laser 301 без ослабляющего фильтра.

определяется температурными зависимостями намагниченности M и межфазного натяжения σ . С учетом этого была рассчитана температурная зависимость параметра структурной решетки l , при этом зависимости $M(T)$ и $\sigma(T)$ были определены экспериментально.

Определение температурной зависимости величины межфазного натяжения было проведено на основе анализа результатов измерения деформации микрокапли магнитной эмульсии в однородного стационарном магнитном поле при различных значениях температуры. При этом были использовано достаточно слабое магнитное поле, в котором форму капли можно считать эллипсоидальной. Расчет численных значений межфазного натяжения осуществлялся при использовании аналитической зависимости, приведенной в [16]:

$$H^2 = \frac{2\sigma}{\mu_0 R} \left(\frac{1}{\mu - 1} + N \right)^2 \times \frac{(3 - 2e)^2/e^2 - (3 - 4e^2) \arcsin e / (e^3(1 - e^2)^{1/2})}{(1 - e^2)^{2/3} [(3 - e^2) \ln((1 + e)/(1 - e)) / e^5 - 6/e^4]}, \quad (3)$$

где N – деполяризующий фактор деформированной капли,

$$N = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\ln \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right), \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}},$$

μ – магнитная проницаемость магнитной жидкости, R – радиус капли.

Расчет температурной зависимости намагниченности проводился при использовании предварительно полученной экспериментально зависимости магнитной восприимчивости χ от температуры. Измерение последней осуществлялось мостовым методом, согласно методике, подробно описанной в [17]. Значение намагниченности магнитной жидкости при фиксированных температурах опре-

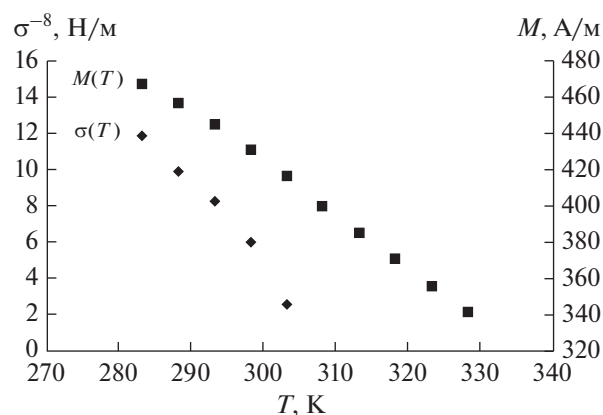


Рис. 15. Температурные зависимости межфазного натяжения σ на границе капля–среда и намагниченности M магнитной жидкости.

делялось по формуле $M = \chi H$, что является правомерным вследствие проведения экспериментальных исследований структурных изменений в достаточно слабых полях, где сохраняется линейность зависимости $M(H)$.

На рис. 15 приведены полученные температурные зависимости σ и M . Рассчитанная при их использовании температурная зависимость периода гексагональной решетки представлена на рис. 16 (кривая 2). Для сравнения на этом же рисунке приведена аналогичная зависимость, полученная экспериментально (кривая 1), соответствующая представленной выше на рис. 4. Как можно видеть из рис. 16, рассчитанная зависимость не согласуется с полученной экспериментально. Так, согласно рассчитанной зависимости, параметр гексагональной решетки должен уменьшаться при увеличении температуры, тогда как экспериментально полученная зависимость указывает на его увеличение в этой ситуации. Можно сделать предположение, что это связано с тепловым расширением составляющих эмульсии жидкостей, которое не учитывалось при расчетах. Кроме того, причиной этого может быть также проявление капиллярных эффектов, характерных для используемой измерительной ячейки. Вместе с тем, очевидно, что этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Формирование устойчивой лабиринтной структуры, ранее рассматривалось в ряд работе [16, 18–20]. В [20] для выяснения условий устойчивости такой структуры был проведен расчет полной энергии полосы, шириной d сформировавшейся в слое магнитной жидкости толщиной h и взаимодействующей с другими такими же полосами. Минимизация этой энергии по безразмерному параметру d/h позволила определить равновесное магнитное число Бонда N_B^0 как функцию равновесной безразмерной ширины полосы $x_0 = d_0/h$:

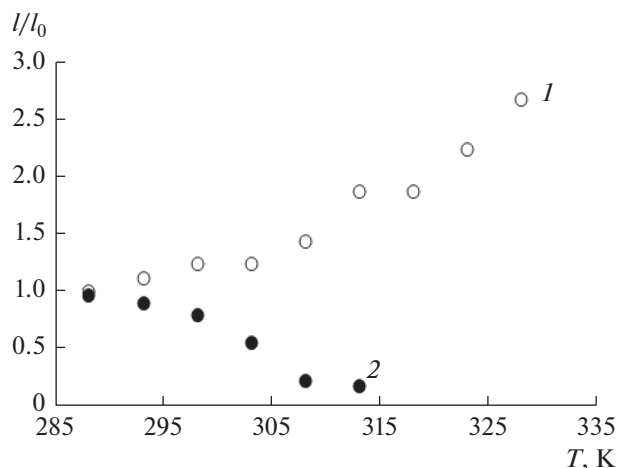


Рис. 16. Температурная зависимость относительной величины периода гексагональной решетки: 1 – экспериментальная кривая, 2 – теоретическая кривая.

$$N_B^0(x_0) = \frac{2 \left(\frac{1 + \chi D(x_0)}{\chi} \right)}{1 - \frac{\chi x_0}{1 + \chi D(x_0)} \left(\frac{dD}{dx} \right)_{x=x_0}}, \quad (4)$$

где $D = D_0 + \frac{3.289\Phi_0^2}{2\pi\chi}$ – размагничивающий фактор системы полос, χ – магнитная восприимчивость магнитной жидкости, Φ_0 – доля площади лабиринтной структуры, заполненная магнитной жидкостью (полагается равной отношению ширины полосы к расстоянию между полосами).

Формула (4) содержит неявную зависимость параметра решетки от температуры, определение которой, однако, в аналитическом виде затруднительно.

В [16] при анализе механизма и условий образования подобных лабиринтных структур было указано на аналогию подобных структур доменной структуре Киттеля в тонких слоях ферромагнетика [21]. При этом, показано, что при равном содержании магнитной и немагнитной фаз справедливо выражение

$$\frac{2l}{h} = 1.56 \left(\frac{\sigma}{M^2 h} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где $2l$ – ширина магнитной полоски.

Проведенные расчеты температурной зависимости параметра лабиринтной решетки по формуле (5) при использовании экспериментально определенных температурных зависимостей намагниченности и межфазного натяжения показали ее удовлетворительное согласие с аналогичной экспериментально полученной зависимостью (рис. 17).

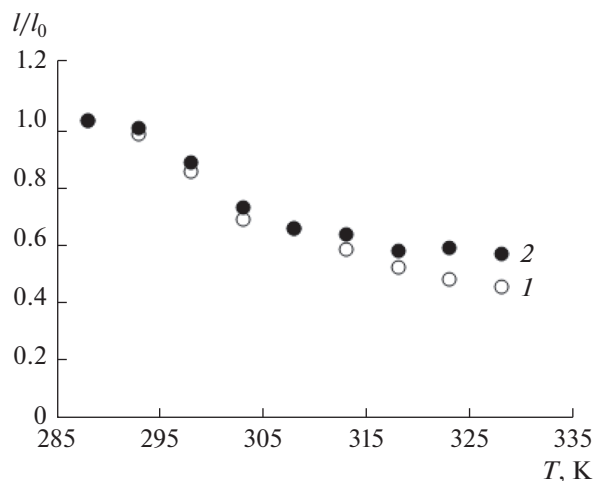


Рис. 17. Зависимость периода лабиринтной решетки от температуры, определенная расчетным путем (кривая 1) и полученная экспериментально (кривая 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе исследованы особенности формирования в тонких слоях магнитных эмульсий решеток гексагонального и лабиринтного типа при воздействии перпендикулярного слоя магнитного поля. Определен характер и особенности полевых и температурных зависимостей параметров таких решеток, исследованы особенности наблюдающегося на них дифракционного рассеяния света. Установлено, что экспериментально полученные температурные зависимости параметров исследованных решеток согласуются с рассчитанными с помощью полученных ранее в теоретических работах выражений для условий устойчивости таких структур только для решеток лабиринтного типа. Показано, что при использовании лазерных источников света для исследования подобных структурных образований необходимо учитывать дополнительное влияние на них термокапиллярных явлений, связанных с воздействием теплового излучения как на микрокапли, так и на открытую поверхность исследуемого слоя эмульсии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 0795-2020-0030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диканский Ю.И., Катранова Н.И., Темирчев Г.И. О дифракции света в агрегированной магнитной жидкости // Материалы 18-й Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. Калинин. 1988. С. 856–857.

2. Диканский Ю.И., Цеберс А.О. Концентрационные доменные структуры в тонких слоях магнитной жидкости и дифракция света // Магнитная гидродинамика. 1990. № 2. С. 47–53.
3. Bacri J.C., Salin D. Optical scattering of ferrofluid agglomerates // J. Physique (Lettres). 1982. V. 43. P. 771–777.
4. Диканский Ю.И., Бондаренко Е.Н., Рубачева В.И. Дифракция света на структурных образованиях в магнитной жидкости // Материалы 13-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике. Рига. 1990. Т. 3. С. 15–16
5. Цеберс А.О. К вопросу об образовании коллоидными ферромагнетиками периодических структур в плоских слоях // Магнитная гидродинамика. 1986. № 4. С. 132–135.
6. Цеберс А.О. Пространственные структуры ферроколлоидов в плоских слоях // Магнитная гидродинамика. 1988. № 2. С. 57–62.
7. Zakinyan A., Dikansky Y. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion // Colloids Surf. A. 2011. V. 380. P. 314.
8. Диканский Ю.И., Вегера Ж.Г., Закинян Р.Г., Нечаева О.А., Гладких Д.В. О возможности структурного и магнитного упорядочения в магнитных коллоидах // Коллоид. журн. 2005. Т. 67. № 2. С. 161–166.
9. Dikansky Y.I., Gladkikh D.V., Zakinyan A.A., Ispiry-an A.G., Zakinyan A.R. Magnetic and structural properties of magnetic colloids with a well-developed system of magnetized aggregates // Journal of Molecular Liquids. 2020. P. 319.
10. Линье А. Рентгенография кристаллов / Пер. с франц. М.: Гос. изд-во физ.- мат. лит., 1961. 604 с.
11. Da Costa G., Bentolila F, Ruiz E. Interaction between light beams in thermocapillary liquid media // Phys. Lett. A. 1983. V. 95. P. 313.
12. Bezugly V.A., Flyagin V.M. Thermocapillary convection in a liquid layer with a quasi-point heat source in the substrate // Izv. RAS. Mechanics of Liquid and Gas. 2007. № 6. P. 124.
13. Мизев А.И. Экспериментальное исследование влияния толщины газовой фазы на устойчивость и структуру течения в двухслойной системе жидкость–газ // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45. С. 14–18.
14. Диканский Ю.И., Закинян А.Р., Мкртчян В.Д., Усманов Г.Х. Фотоиндуцированная термокапиллярная деформация поверхности магнитной жидкости, регулируемая магнитным полем // Коллоид. журн. 2020. Т. 82. № 5. С. 553–559.
15. Бекетова Е.С., Нечаева О.А., Мкртчян В.Д., Закинян А.Р., Диканский Ю.И. Структурные превращения в магнитных эмульсиях при их взаимодействии с переменным электрическим полем // Коллоид. журн. 2021. Т. 83. № 2. С. 157–170.
16. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 386 с.
17. Dikansky Yu.I., Ispiry-an A.G., Kunikin S.A., Zakhar-zhevskii M. and Drozdov A.S. Temperature dependences of the magnetic susceptibility of water-based magnetic fluids // Journal of Nanofluids. 2020. V. 9. P. 90.
18. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 357 с.
19. Цеберс А.О., Майоров М.М. Структура границы раздела пузырька в магнитной жидкости в поле // Магнитная гидродинамика. 1980. № 3. С. 15.
20. Elias F., Flament C., Bacri J.C., and Neveu S. Macro-organized patterns in ferrofluid layer: experimental studies // J. Phys. I France. 1997. V. 7. P. 711–728.
21. Привороцкий И.А. Термодинамическая теория ферромагнитных доменов // УФН. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 43–80.