ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

МКРТЧЯН ВИКТОРИЯ ДМИТРИЕВНА

ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАГНИТНЫМИ КОЛЛОИДАМИ

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Ставрополь – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

Научный руководитель:
Диканский Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры экспериментальной физики ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Официальные оппоненты:
Иванов Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией динамики дисперсных систем Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь
Виноградова Александра Сергеевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химической гидродинамики Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ведущая организация:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «24» декабря 2026 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.398.09 при Северо-Кавказском федеральном университете по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корпус 20, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, и на сайте:
https://ncfu.ru/upload/medialibrary/68f/wj2x4rvvfsbksq58bczehkp1ts6jhdtw/Dissertatsiya-Mkrtchyan-VD.pdf
Автореферат разослан «___»_____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.398.09
кандидат химических наук В. А. Тарала

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Магнитные ультрадисперсные коллоиды относятся к так называемым функциональным умным материалам, физическими свойствами которых можно управлять с помощью воздействия магнитными и электрическими полями. Благодаря их уникальным свойствам эффективно взаимодействовать с магнитными полями они вызывают интерес не только с точки зрения изучения их магнитомеханических, термомагнитных и магнитооптических свойств, но и возможностью их применения в машиностроении, приборостроении и медицине. В настоящее время синтез и изучение физико-химических свойств магнитных жидкостей продолжается как в нашей стране, так и за рубежом. В последнее время на основе магнитных жидкостей создаются композитные магнитные материалы – магнитные эмульсии и магнитные жидкости с мелкодисперсным немагнитным наполнителем. Большое количество работ в области магнитных жидкостей и их композитов посвящено исследованию их магнитных и структурных свойств, определяемых свойствами и взаимодействием составляющих их дисперсных частиц. Такие свойства зависят от ряда факторов, в том числе и от температуры. Исследованию зависимости свойств магнитных жидкостей от температуры посвящен ряд работ, вместе с тем некоторые аспекты влияния температуры остаются малоизученными. Это указывает на необходимость продолжения исследования зависимости свойств магнитных жидкостей и их композитов от температуры, а также эффектов, обусловленных ее изменением. На основании этого, можно сделать заключение, что предпринятые в настоящей работе исследования термоиндукционных эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с магнитными жидкостями, а также структурных трансформаций в магнитных эмульсиях, обусловленных термическими воздействиями, в настоящее время являются актуальными.

Целью настоящей работы является изучение возможности управления термоиндуцированными эффектами взаимодействия лазерного изучения с магнитными жидкостями с помощью магнитных полей, а также исследование влияния термических воздействий на структурные превращения в магнитных жидкостях и эмульсиях в электрическом и магнитном полях.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

– изучение термоиндуцированных лазерным излучением термокапиллярного эффекта, возникающего при воздействии лазерного пучка на поверхность магнитной жидкости, и эффекта тепловой линзы, наблюдающегося при прохождении луча лазера через слой магнитной жидкости, а также установление возможности управления ими с помощью магнитного поля;

– исследование особенностей возникновения и трансформации структурных решеток в тонких слоях магнитных жидкостей в постоянном электрическом поле, обусловленных тепловым воздействием (в том числе и лазерного излучения) и дополнительно приложенным магнитным полем;

– установление особенностей формирования структурных решеток в тонких слоях магнитной эмульсии в магнитном поле, обусловленных тепловым воздействием;

– изучение процессов формирования структуры в магнитных эмульсиях в

переменном электрическом поле и влияния на них магнитного поля и теплового воздействия.

Методология и методы исследования. При выполнении работы были использованы экспериментальные и теоретические методы исследования. Так при исследовании термоиндуцированных эффектов использовалась видеосъемка с последующей цифровой обработкой видеоматералов и снимков. Структурное состояние исследованных образцов и его изменение изучалось методами оптической микроскопии с применением компьютерного анализа полученных с ее помощью снимков. Физические параметры исследованных образцов определялись с помощью стандартных методов электрических, магнитных и реологических измерений. Теоретическое обоснование экспериментальных результатов осуществлялось с помощью аналитических методов и расчетов.

Научная новизна диссертации состоит в следующем.

Впервые показана возможность управления формированием термокапиллярного эффекта и эффекта тепловой линзы с помощью как однородного, так и неоднородного магнитных полей различной конфигурации. Обнаружены различия характера дефокусировки лазерного пучка, проходящего через слой магнитной жидкости в зависимости от интенсивности излучения (мощности лазера). Проведен анализ обнаруженных различий на основе рассмотрения механизмов дефокусировки луча, связанных как с осесимметричным распределением температуры вокруг лазерного луча, так и с возникновением термоконвекционных течений.

Исследованы особенности формирования и трансформации структурных решеток в тонких слоях магнитных жидкостей различного типа в постоянном электрическом поле, обусловленные изменением температуры и действием дополнительно приложенного магнитного поля. Впервые обнаружен индуцированный лазерным излучением эффект возникновения лабиринтной структуры в докритической области напряженностей постоянного электрического поля.

Впервые установлены особенности трансформации структурных решеток в тонких слоях магнитной эмульсии в магнитном поле, обусловленные тепловым воздействием – возрастание периода гексагональной решётки и убывание периода лабиринтной структуры при повышении температуры. Обнаружено влияние лазерного излучения на параметры таких структурных решеток, определены условия его проявления.

Изучены особенности формирования структуры в магнитных эмульсиях в переменном электрическом поле, обусловленные тепловым воздействием: показано, что ее характер существенно зависит не только от амплитуды и частоты поля, но также и от температуры. Обнаружена и исследована температурная зависимость пороговой частоты электрического поля, при которой возникает лабиринтная структура, а также частоты ее перехода в микрокапельную. Показана возможность влияния лазерного излучения достаточной мощности на пороговые частоты изменения характера структурных решеток.

Обнаружено влияние дополнительно приложенного магнитного поля на величину пороговой частоты электрического поля, соответствующей

возникновению лабиринтной структуры в слое магнитной эмульсии при различных температурах. Проведен анализ его механизма.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждена корректностью использованных методик исследования, применением стандартных приборов и оборудования при проведении измерений, анализом погрешностей измерений, отсутствием противоречия полученных результатов известным данным других авторов, использованием распространенных модельных представлений в разрабатываемой области исследований.

Научная и практическая значимость. При выполнении диссертации получен ряд новых результатов, которые вносят определенный вклад в развитие фундаментальных проблем физики магнитных коллоидных систем. Установлена возможность регулирования термоиндуцированными эффектами, возникающими при взаимодействии лазерного излучениями с магнитными жидкостями, с помощью воздействия магнитного поля. Установлены и интерпретированы особенности структурных превращений в магнитных жидкостях и магнитных эмульсиях в электрическом и магнитном полях, обусловленные тепловым воздействием. Показана возможность изменения структурного состояния таких сред, находящихся в электрическом и магнитном поле при воздействии лазерного излучения. Полученные результаты могут способствовать дальнейшему развитию практического приложения магнитных жидкостей и их композитов.

На защиту выносятся:

1. Установленное и обоснованное влияние магнитных полей различной конфигурации на термоиндуцированные оптические эффекты в отраженном и проходящем свете, возникающие при воздействии лазерного излучения на слои однородной магнитной жидкости. Реализованный на этой основе способ полной компенсации термокапиллярного эффекта неоднородным магнитным полем.

2. Результаты исследования влияния теплового воздействия на время формирования и параметры структурных решеток в тонких слоях однородных магнитных жидкостей различного типа в постоянном электрическом поле, а также обнаруженный эффект индуцирования лазерным излучением лабиринтной структуры в магнитной жидкости в докритической области напряженностей постоянного электрического поля и его обоснование.

3. Установленные особенности характера изменения параметров структурных решеток в тонких слоях магнитной эмульсии в магнитном поле, обусловленные тепловым воздействием (возрастание периода гексагональной решётки и убывание периода лабиринтной структуры при повышении температуры) и их интерпретация.

4. Обнаруженное влияние воздействия лазерных источников света достаточной мощности на формирование структурных решеток в тонких слоях магнитной эмульсии в перпендикулярном к ним магнитном поле и результаты его исследования.

5. Результаты исследования и анализ формирования структуры в магнитных эмульсиях в переменном электрическом поле при дополнительном тепловом воздействии (в том числе и лазерного излучения), позволившие уточнить динамику формы микрокапель эмульсии в этих условиях и установить характер

температурной зависимости пороговых значений частот электрического поля, соответствующих формированию лабиринтной структурной решетки и ее последующему переходу в слабо упорядоченную гексагональную систему микрокапель.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и форумах: Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2021», VII Международная ставропольская конференция по магнитным коллоидам, VIII Международная ставропольская конференция по магнитным коллоидам, Пятая Российская конференция по магнитогидродинамике (RMHD 2024), XXI всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям, двадцать девятая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-29), тридцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-30), Международный симпозиум «Актуальные проблемы функциональных материалов» - 2025», V Российский научный семинар «Математическое и компьютерное моделирование свойств мягких магнитных материалов: от теории к экспериментам и приложениям».

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSRN-2026-0007).

Личный вклад автора. Автором лично проведены экспериментальные исследования, обработка результатов измерений и представленные в диссертационной работе расчеты. Основные выводы и положения диссертационной работы сформулированы лично автором.

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 14 работ, в их числе 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в международные базы данных Web of Science, Scopus и перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав основного содержания, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 165 страниц машинописного текста, содержит 74 рисунка, 1 таблицу и 230 ссылок на литературные источники.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разрабатываемой темы, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных свойствам магнитных жидкостей и созданных на их основе композитов. Кроме того, большое внимание уделено термоиндуцированным эффектам в гомогенных жидкостях и коллоидных системах. В частности, рассмотрены процессы термоконвекции и термооптические эффекты, индуцированные лазерным излучением. Также рассмотрены процессы структурообразования при воздействии электрического и магнитного полей на магнитные жидкости и их композиты. Глава закончена анализом проведенного литературного обзора и постановкой задач диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена исследованию термоиндуцированных эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучениями с магнитными жидкостями – термокапиллярного эффекта и эффекта тепловой линзы.

Представлены результаты исследования особенностей возникновения и формирования термокапиллярного отклика, возникающего при отражении луча лазера от поверхности слоя магнитной жидкости (рис. 1). Впервые показана возможность его регулирования с помощью магнитного поля при различной его ориентации относительно поверхности слоя. Установлено, что в тонком слое магнитного коллоида действие перпендикулярного к слою поля приводит к увеличению глубины лунки, возникшей в месте падения луча лазера в результате интенсивной термокапиллярной конвекции, и, как следствие, к росту размера и времени установления и релаксации стационарной картины термокапиллярного отклика. При направлении поля параллельно поверхности слоя жидкости происходит уменьшение полуосей картины термокапиллярного отклика с изменением его геометрической формы. На рис. 2 представлена зависимость относительных величин большой (a) и малой (b) полуосей внешнего светлого кольца стационарной картины ТК отклика от напряженности внешнего магнитного поля при трех различных его ориентациях относительно плоскости слоя.

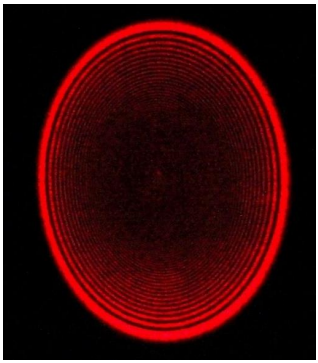


Рис. 1. Характерная картина термокапиллярного отклика при отражении луча лазера от поверхности слоя магнитной жидкости.

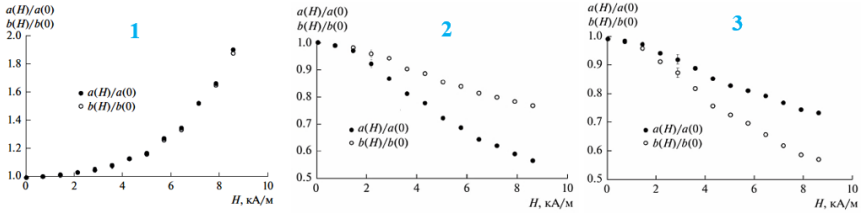


Рис. 2. Зависимость относительных величин большой (a) и малой (b) полуосей внешнего светлого кольца стационарной картины ТК отклика от напряженности внешнего магнитного поля: 1 – поле направлено перпендикулярно слою магнитной жидкости, 2 – поле параллельно слою и направлено вдоль плоскости распространения падающего и отраженного лучей лазера, 3 – поле параллельно слою и направлено в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения падающего и отраженного лучей лазера.

Обнаружено отличие зависимостей параметров наблюдающегося ТК отклика от напряженности магнитного поля при его воздействии перпендикулярно поверхности слоя магнитной жидкости, помещенного в кюветы цилиндрической формы разного диаметра. Показано, что это связано с отличием характера докритической деформации слоя – в кюветах малого диаметра (меньше 80 мм) наблюдается вогнутость поверхности, при больших диаметрах – выпуклость. Сделан вывод, что причиной разного характера зависимостей наблюдающегося ТК отклика от

напряженности поля является различие в изменении толщины слоя в точке падения луча.

Экспериментально установлено, что действие перпендикулярного слою неоднородного магнитного поля существенно уменьшает время образования лунки, нивелирует влияние толщины слоя и может приводить к полной компенсации термокапиллярной деформации.

Рассмотрена динамика эволюции картины термокапиллярного отклика. На рис. 3 представлены зависимости времени развития картины термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля при его различном направлении. Как видно из рисунка, наложение магнитного поля, направленного перпендикулярно поверхности слоя жидкости, приводит к возрастанию времени развития деформации поверхности. Напротив, действие параллельного к поверхности слоя магнитного поля уменьшает время формирования устойчивого профиля поверхности. Аналогичный характер имеют также зависимости времени восстановления поверхности после прекращения действия лазерного излучения.

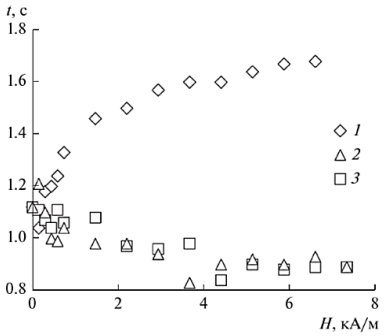


Рис. 3. Графики зависимости времени установления стационарной картины термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля: 1 – поле направлено перпендикулярно слою магнитной жидкости, 2 – поле параллельно слою и направлено вдоль плоскости распространения падающего и отраженного лучей лазера, 3 – поле параллельно слою и направлено в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения падающего и отраженного лучей лазера.

Проведено обсуждение полученных результатов.

Обнаруженные особенности влияния магнитного поля на форму и размер ТК отклика связаны с действием пондеромоторных сил, изменяющих как глубину лунки, так и толщину слоя в месте падения луча лазера. Это согласуется с экспериментально установленной убывающей зависимостью глубины лунки, возникающей в результате термокапиллярной деформации поверхности слоя МЖ под действием лазерного излучения, от толщины слоя.

В существующих теоретических работах, посвященных задаче об устойчивости слоя магнитной жидкости при неоднородном нагреве в однородном магнитном поле, учитываются возмущения намагниченности жидкости и напряженности магнитного поля, вызванные возмущениями температуры. При этом в качестве определяющих поведение системы безразмерных параметров можно рассмотреть следующие величины, характеризующие относительный вклад различных сил [1]:

$Ma = \dfrac{\beta_\sigma \gamma l^2}{\eta\kappa}$ – число Марангони, определяемое как соотношение сил поверхностного натяжения и вязкого трения и описывающее термокапиллярный

механизм конвекции, обусловленный градиентом коэффициента поверхностного натяжения на свободной поверхности жидкости;

$Gr = \frac{\beta_\rho g \gamma l^4}{\nu^2}$ – число Грасгофа, описывающее термогравитационную конвекцию – представляет собой соотношение между выталкивающей Архимедовой силой (разностью гравитационных сил, обусловленной разностью плотностей, возникшей из-за перепада температур) и силами вязкого трения.

$D = \frac{\mu_0 K^2 \gamma^2 l^4}{\rho \nu^2 (1+\chi_r)}$ – критерий, характеризующий термомагнитную конвекцию в возмущенном однородном магнитном поле с градиентом $\frac{K\gamma}{\mu_r}$, который в явном виде описывает вклад возмущений напряженности магнитного поля (обусловленных движением неизотермической жидкости) в магнитостатическую силу;

$Si = \frac{\mu_0 M_n^2}{\sqrt{\rho g \sigma}}$ – критерий поверхностной неустойчивости, характеризующий устойчивость поверхности слоя МЖ относительно ее возмущений в перпендикулярном магнитном поле – представляет собой соотношение магнитостатической, гравитационной и капиллярной сил;

где $\beta_\sigma = -\partial\sigma / \partial T$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения, σ – коэффициент поверхностного натяжения, T – температура, $\gamma = |\nabla T|$ – градиент температуры, l – характерный размер системы, η – коэффициент динамической вязкости, κ – коэффициент температуропроводности, $\beta_\rho = -1/\rho(\partial\rho / \partial T)$ – коэффициент теплового расширения, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения, ν – кинематическая вязкость, μ_0 – магнитная постоянная, $K = (\partial M / \partial T)_{S,H}$ – пиромагнитный коэффициент (температурный коэффициент в термомагнитной конвекции, играющий роль β_ρ в гравитационной), M – намагниченность, $\chi_r = (\partial M / \partial H)_{\rho,T}$ – дифференциальная магнитная восприимчивость, H – напряженность магнитного поля, $\mu_r = \chi_r + 1$ – дифференциальная магнитная проницаемость, M_n – нормальная составляющая намагниченности.

Расчеты показали, что для тонкого слоя магнитного коллоида *Ma* и *Si* на 5-6 порядков превосходят *Gr* и *D*. Таким образом, основным механизмом тепломассопереноса в условиях проведенных экспериментов является термокапиллярная конвекция, вызванная тепловым действием лазерного излучения, а изменение формы и размеров ТК отклика связано с дополнительным действием деформирующих магнитостатических сил на образовавшееся термокапиллярное углубление.

Как было установлено экспериментально, действие перпендикулярного магнитного поля может приводить к увеличению толщины слоя магнитного

коллоида в точке падения луча лазера в кюветах большого диаметра и ее уменьшению в кюветах малого диаметра. Это оказывает существенное влияние на развивающиеся конвективные процессы, обусловленные термокапиллярным, термогравитационным и термомагнитным механизмами. С ростом толщины слоя значения *Gr* и *D* оказываются одного порядка с *Ma*, что способствует подавлению термокапиллярной конвекции, т.е. приводит к уменьшению глубины лунки, при этом параметр *Si* оказывается пренебрежимо мал в сравнении с ними. Это значит, что воздействие перпендикулярного магнитного поля играет роль не столько в деформации самой лунки, как в случае с тонким слоем, сколько в изменении толщины слоя в точке падения луча лазера, что, в свою очередь, приводит к изменению интенсивности термокапиллярной конвекции, определяющей глубину лунки.

В этой же главе приведены результаты исследования эффекта тепловой линзы, наблюдающегося при распространении луча лазера через слой магнитной жидкости перпендикулярно его поверхности. Схема использовавшейся экспериментальной установки, в которой предусмотрена возможность воздействия магнитного поля, приведена на рис. 4.

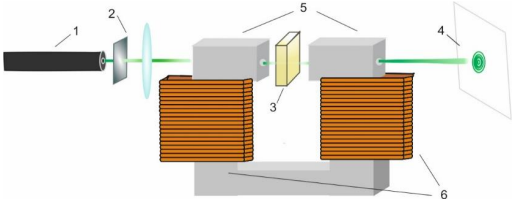


Рис 4. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – нейтральный светофильтр, 3 – кювета с образцом, 4 – экран, 5 – полюсные наконечники, 6 – электромагнит.

На рис. 5 показана эволюция светового пятна в точке падения луча лазера на экран после прохождения через слой жидкости в течении некоторого времени после его включения.

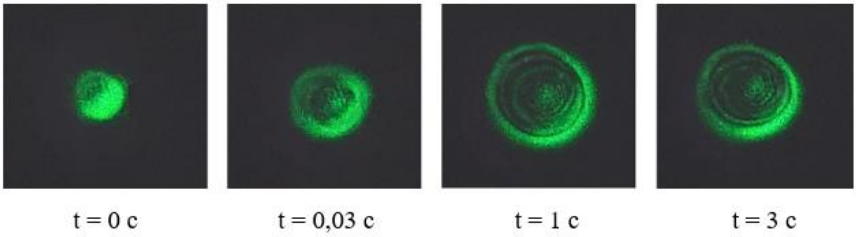
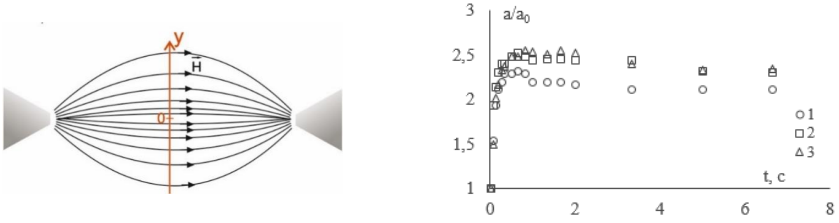


Рис. 5. Эволюция размера пятна со временем в отсутствие внешнего магнитного поля.

Было установлено, что воздействие однородного магнитного поля, направленного вдоль направления луча лазера, с максимальным значением напряженности 280 кА/м не приводит к заметному изменению размера пятна, напротив, в неоднородном магнитном поле, созданном двумя конусообразными полюсными наконечниками электромагнита (рис. 6а), степень дефокусировки лазерного пучка увеличивалась в среднем на 10% (рис. 6б, кривые 2 и 3).



а б

Рис. 6: а) – схема установки для создания неоднородного поля, б) – зависимость относительной величины вертикального размера пятна от времени при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля *H* в центре кюветы: 1 – 0 кА/м, 2 – 182 кА/м, 3 – 238 кА/м.

В дальнейшем конфигурация магнитного поля была изменена, путем замены одного из конусообразных полюсных наконечников на наконечник плоской формы. В этом случае магнитное поле и градиент его напряженности были направлены вдоль светового пучка. Было установлено увеличение степени дефокусировки лазерного пучка, распространяющегося противоположно градиенту напряженности магнитного поля, и ее уменьшение при распространении луча лазера вдоль градиента напряженности магнитного поля (рис. 7).

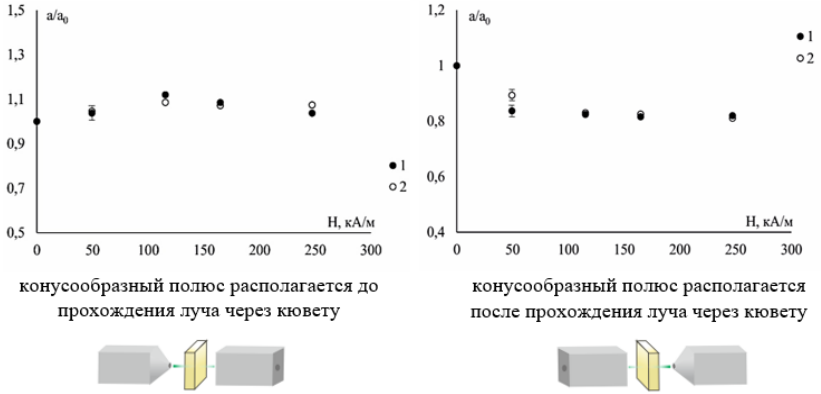
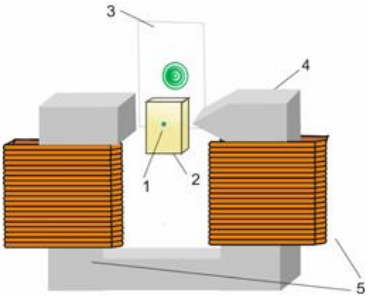
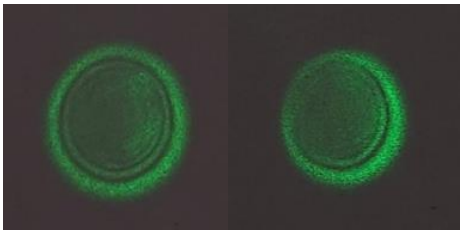


Рис. 7. Зависимость относительной величины вертикального размера пятна от величины внешнего магнитного поля: 1 – размер пятна, соответствующий максимуму зависимости размера пятна от времени; 2 – размер пятна после стабилизации картины.

Кроме того, было исследовано влияние на процесс дефокусировки неоднородного магнитного поля, направленного перпендикулярно световому пучку. В этом случае использовались плоский и клиновидный полюсные наконечники, при этом луч лазера направлялся вдоль ребра клина полюсного наконечника (рис. 8а). Установлено, что воздействие такого поля приводит к утолщению кольцевой границы пятна со стороны клиновидного полюсного наконечника и уменьшению размера пятна в целом (рис. 8б). Отметим, что в однородном магнитном поле, направленном перпендикулярно лучу, подобного эффекта не наблюдалось.



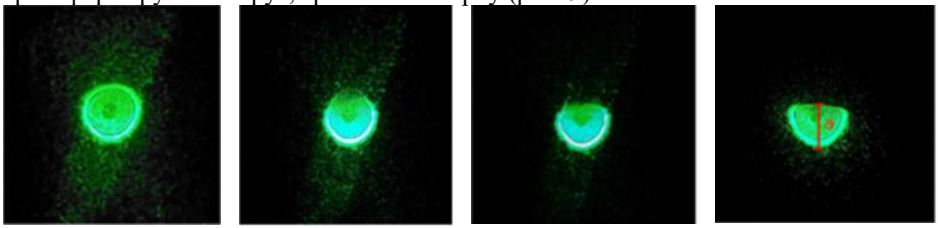
а



б

Рис. 8. Схема установки (а) для создания неоднородного магнитного поля, перпендикулярного световому лучу, и результаты его воздействия (б).

В дальнейшем были проведены исследования особенностей распространения через слой магнитной жидкости лазерного излучения более высокой интенсивности. В этом случае использовался лазер, применявшийся в вышеописанных экспериментах, но без фильтра, уменьшавшего в предыдущих исследованиях интенсивность его излучения. Было обнаружено, что в случае горизонтального направления луча (перпендикулярного плоскости кюветы) на экране в момент включения лазера наблюдалось световое пятно с круговой симметрией, с хорошо различимыми дифракционными кольцами. Сразу после появления пятно начинает изменять форму и примерно через 0,3 с трансформируется в круг, срезанный сверху (рис. 9).



а б в г

Рис. 9. Картина, полученная при прохождении луча мощностью 500 мВт сквозь слой магнитной жидкости: а) в момент включения лазера, t = 0 с; б) t = 0,1 с; в) t = 0,23 с; г) t = 0,4 с.

Сделан вывод, что причиной среза первоначально круговой формы картины термоиндуцированного отклика является развитие вертикально направленного термоконвекционного потока вследствие большей мощности излучения. Подтверждения этого вывода может служить отсутствие такого среза при вертикальном направлении луча лазера, что достигалось путем изменения положения всей установки – ее поворота на 90° в вертикальной плоскости вокруг оси, перпендикулярной лучу.

Обнаружено, что воздействие магнитного поля (как однородного, так и неоднородного), приложенного вдоль луча в горизонтальном направлении, приводит к незначительному увеличению размера пятна, но не изменяет его срезанной формы.

Однако, совсем другая ситуация развивается при воздействии

неоднородного вертикально направленного магнитного поля (перпендикулярного лучу лазера), схема реализации которого представлена на рис. 10. Оказалось, что увеличение напряженности поля в этом случае приводит к восстановлению верхней части картины (круговой симметрии пятна). При этом размер пятна увеличивается (рис. 11). Сделан вывод, что возврат круглой формы пятна путем воздействия неоднородным магнитным полем оказывается возможным за счет возникающей термомагнитной конвекции.

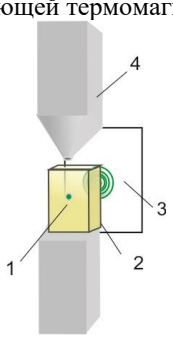


Рис. 10. Схема установки для создания вертикального неоднородного поля, перпендикулярного лазерному лучу: 1 – лазер, 2 – кювета с образцом, 3 – экран, 4 – полюсные наконечники.

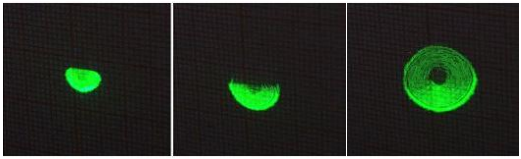
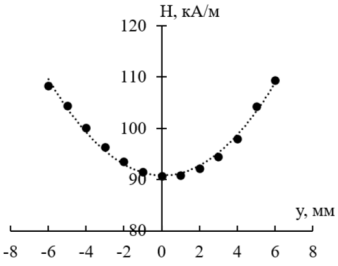
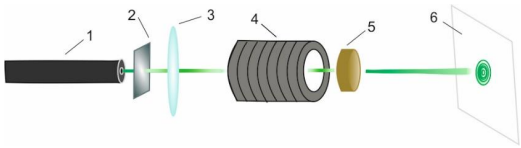


Рис. 11. Восстановление круговой симметрии светового пятна отклика с помощью воздействия вертикального неоднородного магнитного поля.

В дальнейшем, с целью управления степенью дефокусировки лазерного луча использовалась намагничивающая система, представляющая собой постоянный магнит цилиндрической формы, состоящий из неодимовых кольцевых магнитов. Особенность такой намагничивающей системы заключается в том, что градиент ее напряженности направлен перпендикулярно лазерному лучу, а величина напряженности поля в ее центре минимальна. Изменение напряженности магнитного поля вдоль радиуса такого цилиндрического магнита представлено на рис. 12а, а схема установки, применявшейся при использовании этого магнита, приведена на рис. 12б.



а

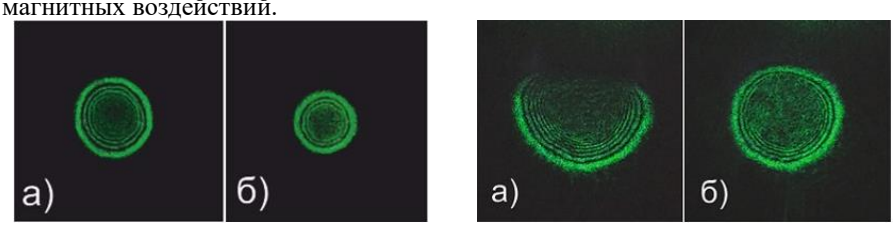


б

Рис. 12. а) Магнитное поле, создаваемое кольцевыми магнитами; б) Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – нейтральный светофильтр, 3 – линза, 4 – кольцевые магниты, 5 – кювета с образцом, 6 – экран.

Оказалось, что при вертикальном направлении лазерного луча (оптической оси установки) воздействие такого поля приводит к уменьшению диаметра картины термолинзового отклика (рис. 13А). В случае горизонтального расположения луча при удаленном фильтре воздействие поля такой конфигурации приводило не только к уменьшению степени дефокусировки (уменьшение диаметра светлого пятна на экране), но восстановлению его круговой симметрии (рис. 13Б).

Проведено обсуждение механизмов возникновения эффекта тепловой линзы в исследуемой магнитной жидкости с учетом ее параметров и внешних тепловых и магнитных воздействий.



А Б

Рис. 13. Изменение размера картины термолинзового отклика при воздействии поля цилиндрического магнита: А – при вертикальном направлении луча, Б – при горизонтальном его направлении и удаленном фильтре; а) – без поля, б) – при нахождении кюветы в центре намагничивающей системы.

Сделан вывод, что при выяснении особенностей наблюдаемых эффектов в первую очередь должны быть учтены локальные температурные изменения в среде, обусловленные лазерным излучением. Вследствие этого температура жидкости по краям лазерного пучка ниже, чем в его центре на некоторую величину ΔT, а показатель преломления изменяется на величину $\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T}\Delta T$. Создающееся осесиметричное распределение показателя преломления в направлении, перпендикулярном лучу, и создает эффект рассеивающей линзы. Альтернативой такого механизма в двухкомпонентной среде является эффект Соре, однако проведенные расчеты его вклада для используемого магнитного коллоида, согласно критериям, представленным в теоретическом анализе [2], позволили им пренебречь. Важным фактором влияния магнитного поля на исследуемые процессы является действие магнитостатических сил $\mu_0\left(\vec{M}\nabla\right)\vec{H}$. Существенная зависимость намагниченности магнитных жидкостей от температуры приводит к различию таких сил, действующих на слои жидкости с различной температурой. Это приводит к их пространственному перераспределению. Кроме того, при достаточной мощности лазерного излучения необходим учет возникающих термоконвекционных потоков. В этом случае уравнение движения магнитного коллоида имеет вид:

$$\rho\frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \eta\Delta\vec{v} + \rho\vec{g} + \mu_0\left(\vec{M}\nabla\right)\vec{H} \qquad (1)$$

из которого, после операции применения rot, следует условие термомагнитной устойчивости $(v = 0)$ в приближении пространственной однородности коллоида [3]:

$$\vec{g}\frac{d\rho}{dT} = -\mu_0 \frac{\partial M}{\partial T}\nabla H\,. \qquad (2)$$

Сделан вывод, что возможность восстановления круговой формы пятна термоиндуцированного отклика связана с выполнением условия (2), т.е. с остановкой возникшего за счет теплового действия лазера термоконвекционного потока. Правомерность этого вывода подтверждена экспериментально, путем дополнительного воздействия искусственно созданных течений.

В третьей главе исследованы особенности возникновения и трансформации структурных решеток в тонких слоях магнитных жидкостей и эмульсий на их основе во внешних электрических и магнитных полях, обусловленные изменением температуры, в том числе и под воздействием лазерного излучения.

Приведены результаты исследования особенностей возникновения и трансформации структурных решеток в тонких слоях магнетитовых магнитных жидкостей различного типа в постоянном электрическом поле, обусловленные изменением температуры и дополнительным воздействием магнитного поля.

Как показали наблюдения, воздействие постоянного электрического поля приводит при некотором пороговом, конкретном для каждого образца, значении напряженности поля к появлению в них структурных решеток. Как оказалось, изменение температуры приводит не только к изменению порогового значения напряженности электрического поля, соответствующего формированию лабиринтной структуры, но и оказывает также существенное влияние на характер образующейся в электрическом поле структурной решетки (рис. 14).

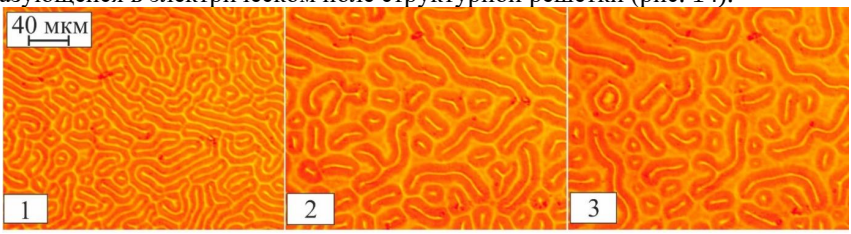


Рис. 14. Изменение лабиринтной структуры при понижении температуры образца: 1 – T = 298 K, 2 – T = 293 K, 3 – T = 288 K.

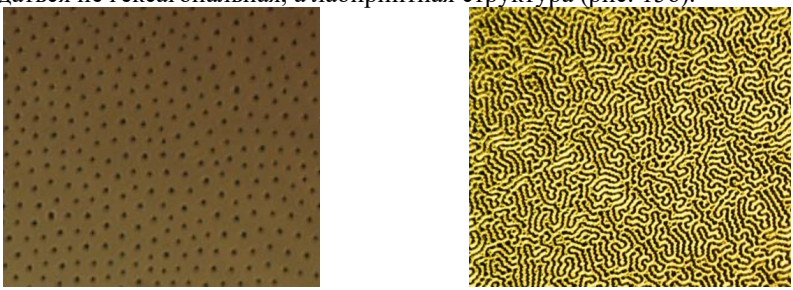
Дополнительно приложенное однородное магнитное поле, направленное вдоль слоя образца, приводит к трансформации лабиринтной структурной решетки в полосовую.

При изучении дифракционного рассеяния света на полученной лабиринтной решетке был обнаружен индуцированный лазерным излучением эффект возникновения лабиринтной структуры в докритической области напряженностей постоянного электрического поля. Так при использовании лазера малой мощности в докритической области напряженностей электрического поля, когда формирования структуры еще нет, дифракция света не наблюдается. Напротив,

при прохождении луча более мощного лазера типа Laser 301 (532 нм, 500 мВт) через образец в тех же условиях, на экране наблюдается дифракционная картина в виде одного или двух колец.

В этой же главе изучены особенности формирования структурных решеток в тонких слоях эмульсий в перпендикулярном магнитном поле при наличии теплового воздействия. Получение эмульсий осуществлялось диспергированием магнитной жидкости на основе керосина в масле АМГ-10.

Выяснено, что воздействие магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости тонкого слоя исследованных образцов, приводит к формированию гексагональной структурной решетки, аналогичной для магнитной жидкости с микрокапельными агрегатами (рис. 15а). Оказалось, что при повышении объемного содержания микрокапель в эмульсии может привести к изменению характера структуры, формирующейся в ее тонких слоях при воздействии магнитного поля такого направления. В этом случае может наблюдаться не гексагональная, а лабиринтная структура (рис. 15б).



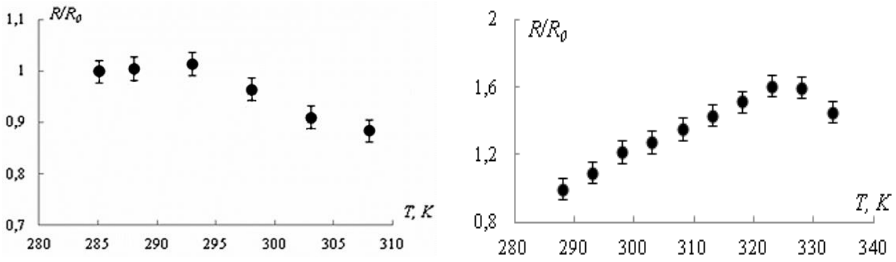
а б

Рис. 15. Формирование гексагональной (а) и лабиринтной (б) структурных решеток в тонких слоях эмульсии при воздействии перпендикулярного магнитного поля.

При пропускании лазерного луча небольшой мощности через слой эмульсии, со сформировавшейся под действием магнитного поля, как гексагональной, так и лабиринтной структурных решеток на экране наблюдалась дифракционная картина в виде одного или нескольких колец, не претерпевающая изменений со временем.

Было установлено, что размерные параметры структурных решеток существенно зависят не только от напряженности воздействующего магнитного поля, но и температуры. Так как период решетки обратен по величине угловому радиусу дифракционного кольца, оценка характера его температурной зависимости может быть проведена по температурной зависимости радиуса наблюдаемого дифракционного кольца. На рис. 16 приведены температурные зависимости радиуса первого дифракционного кольца, полученные при пропускании лазерного луча малой мощности через гексагональную и лабиринтную структурные решетки (кривые а и б соответственно).

Оказалось, что использование лазера более высокой мощности может также приводить к изменению параметров структурных решеток. В этом случае происходит изменение радиуса дифракционного кольца в течение некоторого времени после включения лазера.



а б

Рис. 16. Температурные зависимости относительного радиуса первого дифракционного кольца, полученного при пропускании луча лазера через гексагональную и лабиринтную решетки, сформировавшихся в тонком слое эмульсии (а и б соответственно).

Очевидно, это связано как с изменением межфазного натяжения σ, так и намагниченности M среды микрокапель в результате нагрева образца в области падения лазерного луча. Так характерный параметр гексагональной решетки имеет вид [4]: $l = \pi h / \sqrt{B_m}$, где $B_m = \mu_0 M^2 / 2\pi\sigma$ – магнитное число Бонда. Для лабиринтной структуры ширина магнитной полоски l определяется выражением [5]: $\frac{2l}{h} = 1{,}56\left(\frac{\sigma}{M^2 h}\right)^2$. Проведенные расчеты температурной зависимости параметра полученных структурных решеток по этим формулам при использовании экспериментально определенных температурных зависимостей M и σ показали удовлетворительное согласие рассчитанной и экспериментально полученной зависимостей для лабиринтной структуры. В то же время такого согласия аналогичных зависимостей для размерного параметра гексагональной решетки не наблюдается.

Изучены также особенности формирования структуры в магнитных эмульсиях в переменном электрическом поле при наличии, как постоянного магнитного поля, так и теплового воздействия.

Установлено, что воздействие переменного электрического поля приводит к структурным изменениям эмульсии, характер которых существенно зависит от амплитуды и частоты поля, а также температуры.

Так, при постоянной температуре воздействие низкочастотного поля (20–30 Гц) при малых значениях напряжения на ячейке (до 40 В) приводит к деформации капель (сплющиванию вдоль направления поля). При повышении амплитуды напряженности поля происходит развитие электрогидродинамических течений и разрушение микрокапельной структуры. Однако последующее повышение частоты поля приводит к уменьшению интенсивности течений и, при некотором пороговом значении частоты (около 1.5 кГц), формированию лабиринтной структурной сетки. При дальнейшем увеличении частоты происходило утоньшение ее фрагментов с последующими разрывами и, при некотором значении частоты (около 2 кГц), трансформация в систему микрокапель, равномерно распределенных в плоскости слоя эмульсии.

Выяснено, что при повышении температуры образца пороговая частота образования лабиринтной структуры увеличивается, как и частота, при которой эта структура трансформируется в систему отдельных микрокапель (рис. 17). Дополнительно приложенное магнитное поле приводит к уменьшению пороговой частоты возникновения лабиринтной структуры во всем изученном температурном диапазоне.

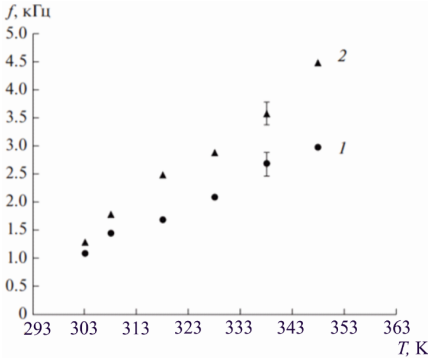


Рис. 17. Температурные зависимости пороговой частоты возникновения лабиринтной структуры, а также ее трансформации в систему отдельных капель в образце №1 (кривые 1 и 2 соответственно).

Нагревание образца со сформировавшейся под воздействием электрического поля относительно высокой частоты структурой в виде системы отдельных капель, приводит при достижении некоторого критического значения температуры к ее переходу в лабиринтную, и полному разрушению при дальнейшем повышении температуры. Последующее охлаждение позволяет воспроизвести процесс в обратном направлении – при некотором значении температуры возникает лабиринтная структура, преобразующаяся в систему капель при понижении температуры до первоначального значения. Аналогичные процессы наблюдались и при воздействии лазерного излучения достаточно высокой мощности (около 80 мВт).

Обсуждение полученных результатов проведено на основе характерных времен релаксации процессов, лежащих в основе наблюдаемых структурных изменений. К ним относятся максвелловское время релаксации заряда, характеризующее накопление заряда на межфазных границах микрокапель, приводящее к возникновению течений внутри и вне капли:

$$\tau_{м} = \frac{\varepsilon_0 (2\varepsilon_e + \varepsilon_i)}{2\gamma_e + \gamma_i} \qquad (3)$$

где ε_i и ε_e – диэлектрические проницаемости, а γ_i и γ_e – электрические проводимости капли и окружающей её дисперсионной среды соответственно.

Благодаря возникающим течениям капля может сплющиваться при определенном соотношении диэлектрических проницаемостей и проводимостей капли и среды. Такое состояние может быть устойчивом при условии, если время релаксации ее формы τ_a меньше времени ее поворота τ_E под действием электрического поля, т.е.:

$$\tau_a = \frac{r_0 (16\eta_e + 19\eta_i)(3\eta_e + 2\eta_i)}{40\sigma(\eta_i + \eta_e)} < \tau_E = \frac{\delta}{\varepsilon_0 r_0^{\,3} E^2}, \qquad (4)$$

где η_e и η_i – вязкости вещества капли и ее омывающей среды соответственно, r_0 - радиус невозмущенной капли, δ – коэффициент вращательного трения эллипсоидальной капли.

Еще одной из характеристик электроконвекционных явлений является время гидродинамической релаксации жидкости в слое. Его оценка возможна при использовании выражения:

$$\tau_{\text{г}} = \frac{2\rho d^2}{\eta}, \qquad (5)$$

где ρ и η – плотность и вязкость жидкой среды соответственно, d – толщина слоя.

Показано, что характер структурных изменений определяется определенным сочетанием значений представленных времен релаксации и периода воздействующего электрического поля, а влияние температуры связано с зависимостью от нее характерных времен релаксации, указанных выше.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Изучены особенности возникновения и формирования термокапиллярного отклика при отражении луча лазера от поверхности магнитной жидкости, обусловленные воздействием постоянного магнитного поля. Установлено, что в зависимости от толщины слоя магнитной жидкости действие перпендикулярного к поверхности слоя однородного магнитного поля может приводить как к росту, так и уменьшению размера стационарной картины термоотклика и времени его формирования. Однородное магнитное поле, ориентированное параллельно поверхности магнитной жидкости, сглаживает возникающие на ней возмущения, что проявляется в уменьшении размеров картины термокапиллярного отклика, времени его формирования и изменении формы интерференционных колец.

2. Показано, что действие перпендикулярного слою магнитной жидкости неоднородного магнитного поля существенно уменьшает глубину термокапиллярного углубления и время формирования термокапиллярного отклика, нивелирует влияние толщины слоя и может приводить к полной компенсации термокапиллярной деформации и, как следствие, нивелированию термокапиллярного отклика. Проведено обсуждение механизмов влияния полей различного направления и конфигураций на исследованный термокапиллярный эффект.

3. Исследованы термоиндуцированные лазерным излучением оптические эффекты при его прохождении через слой однородной магнитной жидкости – дефокусировка лазерного луча и искажение его круговой симметрии при достаточно большой интенсивности излучения. Обсуждение результатов исследования проведено на основе учета изменения показателя преломления жидкости в радиальном направлении по отношению к лучу и развития термоконвективных течений при достаточной мощности лазерного излучения. Обнаружено и обсуждено влияние магнитных полей различной конфигурации на степень дефокусировки светового пучка. Показана возможность возврата круглой

формы пятна путем воздействия неоднородным магнитным полем определенной конфигурации.

4. Исследованы особенности возникновения и трансформации структурных решеток в тонких слоях магнитных жидкостей различного типа в постоянном электрическом поле, обусловленные изменением температуры и дополнительным воздействием магнитного поля:

– исследовано влияния теплового воздействия на время формирования и параметры структурных решеток в тонких слоях однородных магнитных жидкостей различного типа в постоянном электрическом поле и дополнительно приложенном магнитном поле;

– обнаружен индуцированный лазерным излучением эффект формирования лабиринтной структуры в докритической области напряженностей электрического поля, проведено его обоснование.

5. Исследованы особенности формирования структурных решеток в тонких слоях магнитной эмульсии в магнитном поле, обусловленные тепловым воздействием:

– установлены особенности трансформации структурных решеток в тонких слоях эмульсии, обусловленные тепловым воздействием – возрастание периода гексагональной решётки и убывание периода лабиринтной структуры при повышении температуры. Проведено обсуждение полученных результатов на основе существующих теоретических представлений;

– установлено влияние теплового воздействия лазерных источников света на формирование структурных решеток в тонких слоях эмульсии в этих условиях – изменение периода структурных решеток в ограниченном с обеих сторон слое.

6. Изучено влияние температуры на формирование структуры в магнитных эмульсиях в переменном электрическом поле при использовании микроскопических наблюдений и дифракции лазерного луча на сформированных структурных решетках:

– обнаружена и исследована температурная зависимость пороговой частоты электрического поля, соответствующей образованию лабиринтной и микрокапельной структур в тонких слоях магнитной эмульсии, проведен ее анализ на основе сопоставления периода воздействующего переменного поля с максвелловским временем релаксации свободного заряда, зависящим от температуры;

– исследовано влияние теплового лазерного излучения различной мощности на процессы формирования структуры в тонких слоях магнитных эмульсий при воздействии на них переменного электрического поля. Сделан вывод об ограниченности использования для зондирования структуры таких сред лазерных источников света мощностью выше 5 мВт, вследствие возможности вызова ими локального изменения температуры;

– обнаружено влияние дополнительно приложенного магнитного поля на величину пороговой частоты электрического поля, соответствующей возникновению лабиринтной структуры в слое магнитной эмульсии при различных температурах, проведен анализ его механизма.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. – Москва: Химия, 1989. – 238 с.
2. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Оптическая диагностика полимерных наночастиц // Фунд. Иссл. – 2015. – № 11. – С. 85-88.
3. Блум Э.Я., Михайлов Ю.А., Озолс Р.Я. Тепло- и массообмен в магнитном поле. Рига: Зинатне. 1980. 354 с.
4. Цеберс А.О. К вопросу об образовании коллоидными ферромагнетиками периодических структур в плоских слоях // Магнитная гидродинамика. 1986. № 4. С. 132–135.
5. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига: Зинатне, 1989. – 386 с.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, и журналах, индексируемых Web of Science, Scopus:

1. Диканский, Ю. И. Фотоиндуцированная термокапиллярная деформация поверхности магнитной жидкости, регулируемая магнитным полем / Ю. И. Диканский, А. Р. Закинян, **В. Д. Мкртчян,** Г. Х. Усманов // Коллоидный журнал. – 2020. – Т. 82, № 5. – С. 553–559. – 0,7 п.л. / 0,2 п.л.
2. Бекетова, Е. С. Структурные превращения в магнитных эмульсиях при их взаимодействии с переменным электрическим полем / Е. С. Бекетова, О. А. Нечаева, **В. Д. Мкртчян,** А. Р. Закинян, Ю. И. Диканский // Коллоидный журнал. – 2021. – Т. 83, № 2. – С. 157–170. – 1,3 п.л. / 0,2 п.л.
3. **Мкртчян, В. Д.** Особенности формирования структурных решёток в тонких слоях магнитных эмульсий / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Коллоидный журнал. – 2022. – Т. 84, № 6. – С. 752–760. – 0,9 п.л. / 0,5 п.л.
4. Бекетова, Е. С. Особенности формирования лабиринтной структуры в тонких слоях магнитных жидкостей в постоянном электрическом поле / Е. С. Бекетова, **В. Д. Мкртчян,** Ю. И. Диканский // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2024. – Т. 88, № 10. – С. 1594–1601. – 0,8 п.л. / 0,3 п.л.
5. **Mkrtchyan, V. D.** Influence of the magnetic field on photoinduced thermocapillary deformation of the surface of a magnetic fluid layer / V. D. Mkrtchyan, Yu. I. Dikanskii // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89, No. 7. – P. 1093–1098. – 0,7 п.л. / 0,4 п.л.

Публикации в других научных изданиях:

6. **Мкртчян, В. Д.** О термоиндуцированных эффектах в магнитных коллоидах / В. Д. Мкртчян // Материалы Международного молодёжного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» / отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. – М.: МАКС Пресс, 2021. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – 0,2 п.л. / 0,2 п.л.
7. **Мкртчян, В. Д.** Особенности формирования структурных решёток в тонких слоях магнитных эмульсий / В. Д. Мкртчян // VII Международная ставропольская конференция по магнитным коллоидам (5–9 сентября 2021 г.):

сборник научных трудов / под ред. С. А. Куникина. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2021. – С. 85-90. – 0,6 п.л. / 0,6 п.л.

8. **Мкртчян, В. Д.** Особенности формирования лабиринтной структуры в тонких слоях магнитных жидкостей в постоянном электрическом поле / В. Д. Мкртчян, Е. С. Бекетова // Материалы VIII Международной Ставропольской конференции по магнитным коллоидам (10–14 сентября 2023 г.): сборник научных трудов / под ред. С. А. Куникина. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2023. – С. 14-18. – 0,4 п.л. / 0,2 п.л.

9. **Мкртчян, В. Д.** Влияние магнитного поля на фотоиндуцированную термокапиллярную деформацию поверхности слоя магнитной жидкости / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Материалы Пятой Российской конференции по магнитогидродинамике (RMHD 2024) (Пермь, 2024 г.). – Пермь, 2024. – С. 23 – 0,1 п.л. / 0,05 п.л.

10. **Мкртчян, В. Д.** Влияние магнитного поля на термолинзовый эффект в наномагнитных коллоидах / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Материалы XXI Всероссийской с международным участием Плёсской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям (Плёс, 2024 г.). – Плёс, 2024. – С. 118-122. – 0,6 п.л. / 0,4 п.л.

11. **Мкртчян, В. Д.** Воздействие магнитного поля на термодиффузию в магнитных жидкостях / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Сборник тезисов Двадцать девятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-29; Москва – Пушкино – Черноголовка – Дубна): материалы конференции, тезисы докладов: в 1 т. Т. 1. – Новосибирск: Издательство АСФ России, 2025. – С. 110. – 0,7 п.л. / 0,2 п.л.

12. **Мкртчян, В. Д.** Влияние магнитного поля на термолинзовый эффект в магнитных коллоидах / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Международный симпозиум «Актуальные проблемы функциональных материалов» – 2025: сборник тезисов (16–20 июня 2025 г., Ставрополь). – Ставрополь, 2025. – С. 108. – 0,1 п.л. / 0,05 п.л.

13. **Мкртчян, В. Д.** Эффект термолинзы в магнитной жидкости / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Сборник тезисов Тридцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-30; Волгоград) / отв. за выпуск А. Арапов. – Новочеркасск; Екатеринбург; Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2026. – С. 59. – 0,1 п.л. / 0,05 п.л.

14. **Мкртчян, В. Д.** Термоиндуцированные особенности распространения лазерного излучения через слой магнитной жидкости / В. Д. Мкртчян, Ю. И. Диканский // Сборник тезисов докладов V Российского научного семинара «Математическое и компьютерное моделирование свойств мягких магнитных материалов: от теории к экспериментам и приложениям» (24–28 мая 2026 года, г. Екатеринбург). – Екатеринбург, 2026. – С. 22. – 0,1 п.л. / 0,05 п.л.

Подписано в печать: 23.10.2026 г.
Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз.
Заказ № 02765

Отпечатано в типографии ООО «Бюро новостей», г. Ставрополь, ул. Серова, 278/А
тел.: 8 (8652) 528–777, www.типография7.рф