

На правах рукописи

Петров Данил Александрович

**Ориентационные и магнитооптические
явления в ферронематиках**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2013

Работа выполнена на кафедре физики фазовых переходов ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Захлевных Александр Николаевич

Официальные оппоненты: Райхер Юрий Львович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии
наук, заведующий лабораторией кинетики
анизотропных жидкостей,

Кротов Лев Николаевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, заведующий
кафедрой прикладной физики,

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук

Защита состоится 19 ноября 2013 г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.189.06 в Пермском государственном национальном исследовательском университете по адресу: г. Пермь, ГСП, 614990, ул. Букирева, 15, ауд. 902.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного национального исследовательского университета; электронная версия автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru>.

Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук, доцент

В.Г. Гилев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из актуальных направлений современной физики является исследование процессов слабого воздействия на вещество, которое приводит к значительным изменениям физических свойств. По этой причине в последнее время ведутся интенсивные исследования мягких (soft) материалов. К их числу относятся жидкие кристаллы (ЖК) и суспензии магнитных наночастиц на их основе, называемые ферронематиками (ФН). Интерес к этим средам обусловлен тем, что ЖК, сочетая в себе свойства обычных (изотропных) жидкостей и кристаллов, обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Необычная физика ФН обусловлена тем, что, в отличие от чистых ЖК, они обладают двумя механизмами ориентационного отклика на приложенное магнитное поле. Первый из них связан с анизотропией диамагнитной восприимчивости ЖК-матрицы; другой механизм возникает только в системах, содержащих дисперсный ферромагнетик: взаимодействуя с магнитным моментом частицы, поле изменяет ее ориентацию, и затем силы сцепления между частицами и ЖК передают созданное механическое вращение матрице. Наличие двух мод магнито-ориентационного отклика порождает в ФН многочисленные новые эффекты, которые интересны не только для фундаментального физического материаловедения, но и чрезвычайно привлекательны с прикладной точки зрения.

Особый интерес вызывают явления спонтанного перехода между различными состояниями, приводящие к оптической бистабильности таких систем. Бистабильность ЖК часто связана со свойствами поверхности, ограничивающими ЖК ячейку. Если энергия сцепления ЖК с поверхностью допускает наличие двух минимумов с различной ориентацией директора, то переключение между этими состояниями можно осуществить наложением внешнего магнитного или электрического полей. Другая причина бистабильных явлений – индуцированные внешними полями переходы первого рода. Допирование ЖК наночастицами добавляет еще одну причину бистабильности; связанную с возможностью бистабильного сцепления между ЖК и внедренными в него частицами. Таким образом, речь идет о прогнозировании физических свойств нанокompозитов на основе анизотропной органической матрицы и магнитных частиц, меняющих электрические и магнитные свойства нанодисперсной жидкости под действием внешних факторов (электрических и магнитных полей и температуры) и выяснении механизмов управления ориентационными и оптическими свойствами ФН при помощи магнитного поля.

Исследования, представленные в диссертации, выполнялись при поддержке грантов аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы” (2009-2011 гг.), “Фундаментальные исследования и прикладные научные исследования в области образования” (2012-2013 гг.) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 10-02-96030 и 13-02-96001).

Целью диссертационной работы является развитие теории индуцированных внешним магнитным полем ориентационных переходов и магнитооптических явлений в ферронематиках с мягким сцеплением магнитных частиц с жидкокристаллической матрицей.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- показано, что при слабом сцеплении магнитных частиц с ЖК-матрицей, имеющей положительную диамагнитную анизотропию, с ростом магнитного поля ФН испытывает последовательность переходов однородная фаза – неоднородная фаза – однородная фаза – неоднородная фаза, которые могут быть переходами первого или второго рода в зависимости от параметра сегрегации;
- теоретически изучены ориентационные и магнитооптические свойства и трикритическое поведение ФН с отрицательной диамагнитной анизотропией;
- аналитически найдены значения параметра сегрегации, отвечающие трикритической точке, для переходов между неоднородным и однородным состояниями ФН;
- построена теория ориентационных переходов в магнитокомпенсированных ФН и установлен характер их ориентационного отклика на приложенное магнитное поле для жесткого и слабого сцепления дисперсной фазы с ЖК-матрицей.

Научное и практическое значение работы. Развита теоретический подход к описанию равновесной ориентационной и магнитной структуры мягких ФН во внешнем магнитном поле. Результаты диссертационной работы расширяют представление об ориентационных откликах ФН на приложенное поле и могут использоваться при планировании экспериментальных исследований. Полученные аналитические формулы для пороговых полей и трикритических параметров могут применяться для определения энергии сцепления и материальных параметров ФН.

Основные положения, выносимые на защиту:

- вывод о том, что при слабом сцеплении дисперсной фазы и ЖК-матрицы с положительной анизотропией диамагнитной восприимчивости с ростом поля ориентационные искажения ведут себя немонотонно, приводя к переходам однородная фаза – неоднородная фаза – однородная фаза – неоднородная фаза;
- существование последовательности ориентационных переходов однородная фаза – неоднородная фаза – однородная фаза в ФН с отрицательной диамагнитной анизотропией;
- возможность бистабильного поведения ФН при переходах между возмущенной в однородной фазами для положительной и отрицательной маг-

нитной анизотропии ЖК-матрицы;

- вывод о том, что для компенсированных суспензий с мягким сцеплением директора и дисперсной фазы возможны переходы однородная фаза – неоднородная фаза – однородная фаза – неоднородная фаза, первый из которых является переходом второго рода, а два других могут быть переходами как первого, так и второго рода;
- вывод о том, что трикритическое поведение переходов между однородными и неоднородными фазами ФН обусловлено сегрегационными процессами,
- аналитические выражения для полей переходов между неоднородными и однородными фазами ФН и трикритических параметров,
- результаты расчета магнитооптических характеристик ФН.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректностью математической постановки задач; использованием проведенных аналитических и численных методов; согласием в предельных случаях с результатами других авторов и с экспериментальными данными.

Публикации и личный вклад автора. Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из них 8 – статей, в том числе 2 в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора. Аналитические и численные расчеты, разработка и тестирование численных алгоритмов проводились автором. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Конференция молодых ученых “Неравновесные процессы в сплошных средах” (Пермь, 2011, 2012); Российская конференция по магнитной гидродинамике (Пермь, 2012); Первая Всероссийская конференция по жидким кристаллам (Иваново, 2012); 24th International Liquid Crystal Conference (Mainz, Germany, 2012); 13th International Conference on Magnetic Fluids (New Delhi, India, 2013); II Всероссийский конгресс молодых ученых (Санкт-Петербург, 2013).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего **132** наименования. Полный объем диссертации **176** страниц, **59** рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, указаны научная новизна и практическая ценность работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, и дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации. В ней представлена классификация ЖК и даны общие сведения о суспензиях магнитных частиц в ЖК, приведены основные результаты имеющихся исследований ориентационных переходов в ФН и магнитооптических явлений. Из обзора следует, что имеющиеся экспериментальные данные нуждаются в последовательном теоретическом описании, требующем учета взаимовлияния дипольного и квадрупольного механизмов воздействия магнитного поля на ФН, мягкого сцепления частиц с матрицей и сегрегационных явлений.

Вторая глава посвящена последовательному теоретическому описанию магнитных ориентационных переходов в плоском слое ФН с учетом диамагнитных и сегрегационных эффектов.

Исследовался слой ФН с абсолютно жестким планарным сцеплением директора с границами и мягким планарным сцеплением феррочастиц с ЖК-матрицей (в отсутствие поля намагниченность и директор параллельны). Рассматривался ФН с положительной анизотропией диамагнитной восприимчивости ($\chi_a > 0$) ЖК-матрицы. Постоянное магнитное поле \mathbf{H} направлялось ортогонально границам слоя (рис. 1).

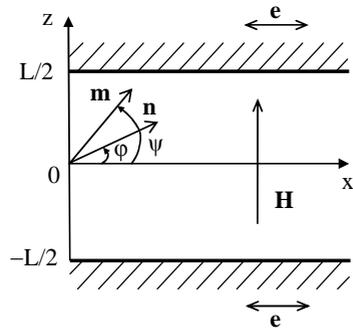


Рис. 1. Планарный слой ферронематика во внешнем магнитном поле. Выбор системы координат. \mathbf{n} – директор ЖК, \mathbf{m} – единичный вектор намагниченности, \mathbf{e} – ось легкого ориентирования

Задача решалась в рамках континуальной теории ЖК и суспензий на их основе [Brochard F., de Gennes P.G. J. de Physique. **31** (1970) 691; Burylov S.V., Raikher Yu.L. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **258** (1995) 107]. Плотность свободной энергии ФН содержит энергию ориентационно-упругих деформаций директора, энергию взаимодействия поля с магнитными частицами и нематиком, энергию сцепления феррочастиц с ЖК и вклад энтропии смешения невзаимодействующих друг с другом магнитных частиц.

Путем минимизации свободной энергии получена система интегральных уравнений для углов ориентации директора $\varphi(\zeta)$ и намагниченности $\psi(\zeta)$, а также концентрации феррочастиц $f(\zeta)$ ($\zeta = z/L$ – безразмерная координата) в зависимости от напряженности поля $h = HL\sqrt{\chi_a/K_1}$, энергии сцепления $\sigma = w_p \bar{f} L^2 / (K_1 d)$ частиц с матрицей, сегрегационного параметра $\kappa = k_B T \bar{f} L^2 / (K_1 \nu)$, параметра анизотропии ориентационной упругости

$k = K_3/K_1$ и параметра $b = M_s f L / \sqrt{K_1 \chi_a}$, характеризующего относительный вклад дипольного ($b > 1$) или квадрупольного ($b < 1$) механизмов влияния магнитного поля на ФН.

Показано, что система уравнений равновесия, наряду с неоднородным решением, допускает при $h \neq 0$ решение $\varphi(\zeta) \equiv 0$, $\psi(\zeta) \equiv \pi/2$, отвечающее однородной планарной текстуре ФН, для которой $\mathbf{n} \parallel \mathbf{e}$, а магнитные моменты феррочастиц ориентированы вдоль поля ($\mathbf{m} \perp \mathbf{n}$ и $\mathbf{m} \parallel \mathbf{H}$, фаза магнитного насыщения). Аналитически найдена зависимость поля перехода h_r между неоднородной и однородной фазами как функция энергии сцепления σ и материальных параметров (показана на рис. 2 для разных режимов влияния магнитного поля на ориентационную структуру ФН). Область, ограниченная кривой $h_r(\sigma)$, отвечает состоянию магнитного насыщения, вне этой кривой находится область неоднородной фазы [h_{r1} и h_{r2} соответствуют значениям $h_r(\sigma)$ на нижней ($h_r < h_m$) и верхней ($h_r > h_m$) ветвях].

В отсутствие поля ФН имеет однородную планарную текстуру, для которой $\mathbf{n} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{e}$ (рис. 1). Включение поля, ортогонального слою, приводит к ее искажению и ФН беспороговым образом намагничивается вдоль поля. Показано, что при заданном наборе материальных параметров ФН имеется пороговое значение энергии сцепления σ_m , определяющее характер ориентационного отклика на приложенное поле. При $\sigma \geq \sigma_m$ (сильное сцепление частиц с матрицей) включение поля вызывает беспороговый переход ФН в неоднородную фазу, в которой \mathbf{n} и \mathbf{m} стремятся ориентироваться в направлении поля. Эта картина качественно меняется при слабом сцеплении ($\sigma \leq \sigma_m$). Для $\sigma \leq \sigma_m$ область, ограниченная прямой $h = 0$ и нижней ветвью двужанной кривой h_r , отвечает неоднородному состоянию ФН, для которого \mathbf{n} и \mathbf{m} отклонены от оси легкого ориентирования в направлении поля (см. рис. 3). Угол ориентации намагниченности меняется от $\psi = 0$ при $h = 0$ до $\psi = \pi/2$ при $h = h_{r1}$, а угол отклонения директора от оси легкого ориентирования увеличивается с ростом поля и достигает максимума, а затем уменьшается до нуля при $h = h_{r1}$ (см. рис. 3). Здесь деформации поля дирек-

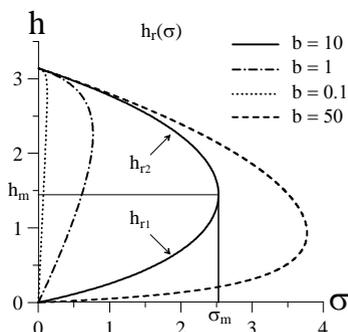


Рис. 2. Пороговое поле h_r как функция энергии сцепления σ магнитных частиц с ЖК-матрицей для $b = 50$, $b = 10$ ($\sigma_m = 2.53$, $h_m = 1.45$), $b = 1$, $b = 0.1$

тора вызваны дипольным механизмом, поэтому небольшой проигрыш (мягкое сцепление) в ориентационной энергии частиц компенсируется выигрышем в энергии ориентационно-упругих деформаций и зеемановской энергии магнитных частиц. Область, ограниченная кривой h_r (диапазон полей $h_{r1} \leq h \leq h_{r2}$), отвечает однородной планарной текстуре ФН с $\mathbf{m} \parallel \mathbf{H}$ и $\mathbf{n} \parallel \mathbf{e}$ ($\varphi(\zeta) \equiv 0$, $\psi(\zeta) \equiv \pi/2$, частицы однородно распределены по слою) – состояние *магнитного насыщения*. В области выше кривой h_{r2} директор вновь отклоняется от оси легкого ориентирования (здесь доминирует квадрупольный механизм; без учета диамагнитной анизотропии эта мода отсутствует [Zadorozhnyi V.I. et al. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **475** (2007) 221]) и асимптотически стремится к направлению поля.

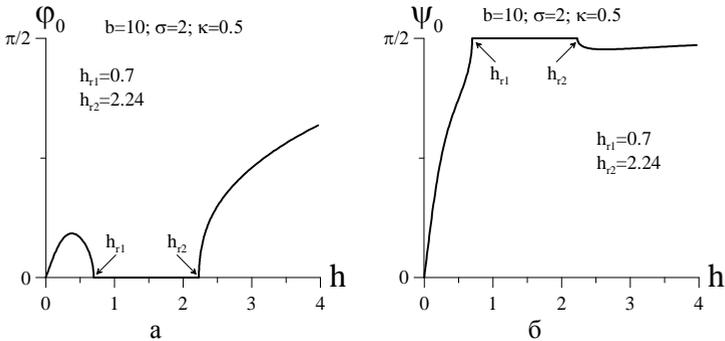


Рис. 3. Зависимости углов ориентации директора (а) и намагнитченности (б) в центре слоя от напряженности магнитного поля h при $\sigma = 2 < \sigma_m$

Вблизи точки перехода в фазу магнитного насыщения свободная энергия ФН представлена в виде разложения Ландау (роль параметра порядка здесь и далее играет $\sin^2 \varphi_0$). Анализ разложения показывает, что этот переход может быть как первого, так и второго рода в зависимости от параметра сегрегации. Аналитически найдено значение параметра сегрегации, отвечающее трикритической точке, в которой происходит смена характера перехода.

Для ФН на основе ЖК 6СНВТ изучено поведение разности фаз обыкновенного и необыкновенного лучей и интенсивности проходящего через слой ФН света в зависимости от h (рис. 4). При включении поля разность фаз уменьшается и достигает минимального значения (рис. 4а), а слой ФН становится частично прозрачным (рис. 4б), это состояние отвечает максимальному отклонению директора от оси легкого ориентирования $\varphi_0(h)$ (см. рис. 3а). При увеличении h фазовая задержка вновь начинает расти и при $h = h_{r1}$ достигает значения, отвечающего состоянию магнитного насыщения (рис. 3); эта область соответствует нулевому значению интенсивности (рис. 4б). С увели-

чением поля при $h = h_{r2}$ образец вновь пропускает свет, фазовая задержка уменьшается и из-за жесткого сцепления директора с границами асимптотически стремится к нулю.

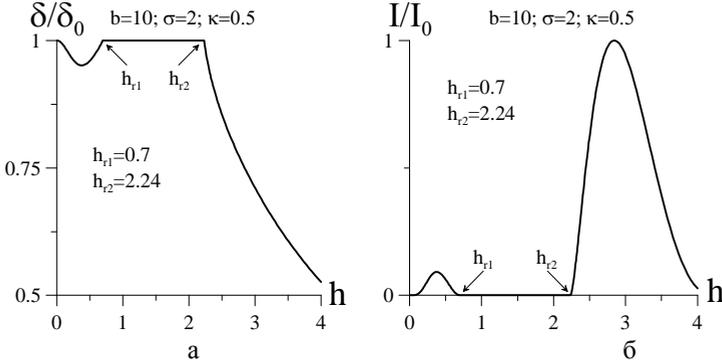


Рис. 4. Разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами (а) и интенсивность прошедшего через слой ФН света (б) как функции напряженности магнитного поля h для $\sigma < \sigma_m$

Проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными [Korčanský P., et al. J. Phys: Conf. Ser. **200** (2010) 072055] по измерению емкости ячейки ФН на основе ЖК 6СНВТ (рис. 5).

В **третьей главе** в той же геометрии (рис. 1) изучены ориентационные переходы в ФН с $\chi_a < 0$. Варьированием свободной энергии ФН относительно директора \mathbf{n} , намагниченности \mathbf{m} и концентрации магнитной примеси получена система интегральных уравнений для углов отклонения директора $\varphi(\zeta)$ и намагниченности $\psi(\zeta)$ от оси легкого ориентирования и пространственного распределения феррочастиц $f(\zeta)$. Система решалась численно, а в предельных случаях аналитически.

В отсутствие магнитного поля система уравнений имеет решение $\varphi(\zeta) \equiv 0$, $\psi(\zeta) \equiv 0$, отвечающее невозмущенной структуре ФН с планарным ($\mathbf{n} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{e}$) сцеплением магнитных частиц с матрицей и однородным распределением директора, намагниченности и концентрации дисперсной фазы. Показано, что в магнитном поле эта структура становится неоднородной, угол между намагниченностью и директором становится отличным от нуля и

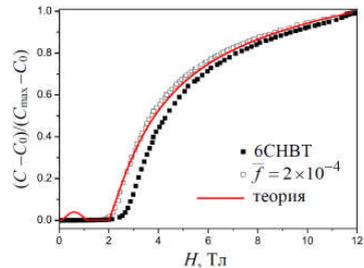


Рис. 5. Электрическая емкость ячейки ФН как функция напряженности магнитного поля для ФН с объемной долей дисперсной фазы $\bar{f} = 2 \times 10^{-4}$ и нематика 6СНВТ по данным [Korčanský P., et al. J. Phys: Conf. Ser. **200** (2010) 072055]; сплошная линия – результат расчетов для $k = 1.268$, $b = 5$, $\kappa = 1$,

растет с увеличением поля. Наряду с этим, при $h \neq 0$ система уравнений допускает решение $\varphi(\zeta) \equiv 0$, $\psi(\zeta) \equiv \pi/2$, которое соответствует однородной планарной текстуре ФН с директором, направленным вдоль оси легкого ориентирования \mathbf{e} и намагниченностью, параллельной по полю ($\mathbf{n} \parallel \mathbf{e}$, $\mathbf{m} \perp \mathbf{n}$ и $\mathbf{m} \parallel \mathbf{H}$). В этой фазе имеется *гомеотропное* ($\mathbf{m} \perp \mathbf{n}$) сцепление магнитных частиц с матрицей; в рассматриваемой задаче ей отвечает состояние *магнитного насыщения* ($\mathbf{m} \parallel \mathbf{H}$). Аналитически получена зависимость поля перехода в состояние магнитного насыщения $h_r(\sigma)$ от энергии сцепления частиц с матрицей, показанная на рис. 6. Область, ограниченная снизу прямой $h = 0$ и сверху кривой $h = h_r$ на рис. 6, отвечает неоднородной структуре ФН. Здесь феррочастицы ориентируются вдоль поля и увлекают за собой директор, который из-за $\chi_a < 0$ и жесткого сцепления на границах стремится остаться в плоскости слоя $\mathbf{n} \parallel \mathbf{e}$, т.е. перпендикулярно \mathbf{H} . Наличие конечной энергии сцепления частиц с матрицей приводит к отрыву намагниченности от директора, и при $h \geq h_r$ ориентационные искажения исчезают и происходит переход в однородную планарную текстуру с директором $\mathbf{n} \parallel \mathbf{e}$ и намагниченностью $\mathbf{m} \parallel \mathbf{H}$ – состояние *магнитного насыщения*.

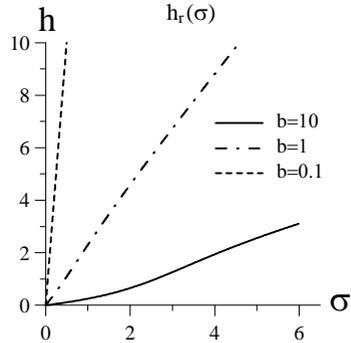


Рис. 6. Пороговое поле h_r как функция энергии сцепления σ магнитных частиц с ЖК-матрицей

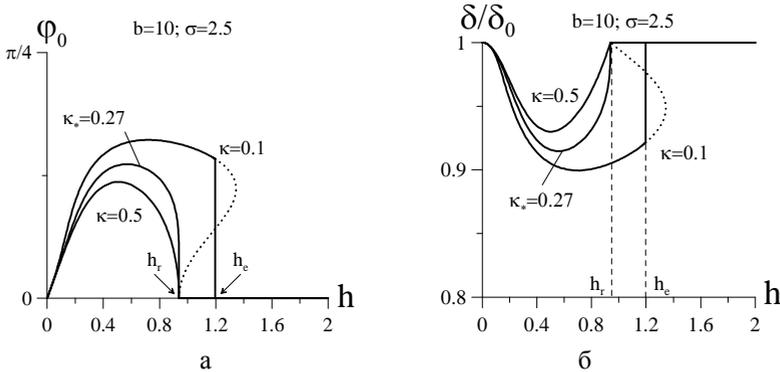


Рис. 7. Зависимость угла ориентации директора в центре слоя (а) и фазовой задержки (б) от напряженности магнитного поля h при различных значениях κ ($h_r = 0.94$, $h_e = 1.196$)

Проведено разложение Ландау свободной энергии ФН вблизи поля пере-

хода h_r , анализ которого показал, что характер перехода из неоднородной фазы в однородную зависит от значения сегрегационного параметра κ . Аналитически найдено трикритическое значение κ_* , при котором меняется характер перехода. При $\kappa \geq \kappa_*$ происходит переход второго рода (рис. 7а, $\kappa = 0.5$), а при $\kappa < \kappa_*$ первого рода (рис. 7а, $\kappa = 0.1$), при котором ФН проявляет ориентационную бистабильность.

Исследованы пространственные искажения ориентационной и магнитной структуры ФН. Построена оптическая разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей света, прошедшего через слой ФН (рис. 7б), и его интенсивность в зависимости от h и сегрегационного параметра κ . Расчеты проведены для нематика ZLI-1695 с аномально малой $\chi_a = -2.55 \times 10^{-8}$.

Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по измерению емкости ячейки ФН [Р.Корčanský et al. J. Magn. Magn. Mater. **322** (2010) 3696.]. Из рис. 8 видно, что теоретическая кривая удовлетворительно согласуется с экспериментальной. Начальный участок экспериментальной кривой является более пологим по сравнению с результатом расчета, что связано с уменьшением объемной доли частиц, участвующих в намагничивании суспензии, из-за их агрегирования.

Четвертая глава посвящена построению континуальной теории индуцированных магнитным полем ориентационных переходов в плоском слое *компенсированного* ФН (рис. 1). В отсутствие магнитного поля такие суспензии имеют равные доли примеси с магнитными моментами, направленными параллельно и антипараллельно директору, так что они в целом они не намагничены и представляют собой ЖК аналоги антиферромагнетиков.

Минимизацией свободной энергии получена система интегральных уравнений, определяющая углы ориентации директора и намагниченности, а также концентраций двух сортов примесных феррочастиц с противоположно направленными магнитными моментами в зависимости от поперечной координаты слоя, напряженности поля и материальных параметров суспензии.

В случае жесткого сцепления магнитных частиц с матрицей исследованы искажения ориентационной и магнитной структуры в зависимости от приложенного магнитного поля с учетом диамагнитных и сегрегационных эффектов. Показано, что индуцированный магнитным полем переход Фредерикса

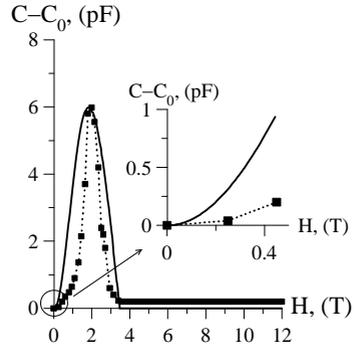


Рис. 8. Зависимость емкости ячейки ФН от напряженности магнитного поля H для $k = 1.5$, $b = 1.15$, $\kappa = 0.7$, $\sigma = 1.65$, $H_r = 3.5$ Т. Сплошная линия – результаты расчетов; пунктирная линия – экспериментальные данные [Р.Корčanský et al. J. Magn. Magn. Mater. **322** (2010) 3696.]

из однородного в неоднородное состояние является переходом второго рода, а поле перехода Фредерикса имеет меньшее значение, чем в чистом ЖК, что подтверждается экспериментами [Podoliak N., et al. J. Colloid and Interface Science. **386** (2012) 158; Shelestiuk S.M., et al. Phys. Rev. E. **83** (2011) 041705]. Аналитически найдено поле перехода как функция материальных параметров ФН. Выяснено, что сегрегационные эффекты вносят определяющий вклад в намагничивание компенсированного

ФН: выше перехода Фредерикса h_c с ростом поля происходит перераспределение магнитных частиц между подсистемами. Изучено намагничивание ФН и его оптические свойства при сильной и слабой сегрегации как функции магнитного поля.

Установлено, что компенсированный ФН с *мягким* сцеплением дисперсной фазы с матрицей имеет сложный ориентационный отклик на приложенное магнитное поле; зависимость полей переходов от энергии сцепления показана на рис. 9. При $0 \leq h \leq h_c$ ФН находится в однородной фазе с компенсированной намагниченностью подсистем (см. рис. 10).

С ростом поля при *слабом* сцеплении (рис. 9, $\sigma < \sigma_*$) однородная фаза при $h = h_c$ сменяется неоднородной (переход Фредерикса), в которой происходит отрыв намагниченности от директора (рис. 10, кривая $\sigma = 2$). Область, ограниченная двужаночной кривой h_r на рис. 9, отвечает однородному состоянию ФН, для которого намагниченность направлена вдоль поля, а директор перпендикулярен полю и параллелен оси легкого ориентирования (h_{r1} и h_{r2} отвечают значениям $h_r(\sigma)$ на нижней и верхней ветвях). При $\sigma < \sigma_*$ и $h_c \leq h \leq h_{r1}$ рост угла отклонения директора от оси легкого ориентирования сменяется уменьшением и при $h = h_{r1}$ ФН переходит в однородную фазу (рис. 10а, кривая $\sigma = 2$), при этом угол ориентации намагниченности с ростом поля меняется от нуля при $h = h_c$ до $\pi/2$ при $h = h_{r1}$ (рис. 10б, кривая $\sigma = 2$). Показано, что с ростом поля происходит перераспределение частиц между магнитными подсистемами, т.е. выше перехода Фредерикса концентрация частиц, первоначально ориентированных против директора, уменьшается, а концентрация частиц, ориентированных в направлении директора, растет и суспензия намагничивается по типу ферритмагнетика. При $h = h_{r2}$ начинает преобладать

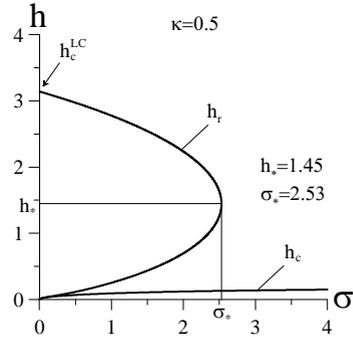


Рис. 9. Пороговые поля h_c и h_r как функции энергии сцепления σ для $b=10$ ($h_c^{LC} = \pi$ – поле Фредерикса в чистом ЖК)

диамагнитный механизм и происходит поворот директора в направлении поля. Вследствие жесткого сцепления директора с границами слоя состояние насыщения, для которого $\mathbf{n} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{H}$, достигается лишь при $h \rightarrow \infty$. При сильном сцеплении ($\sigma > \sigma_*$) полного отрыва директора от намагнитченности не происходит (рис. 10, кривые $\sigma = 3$ и $\sigma = 5$).

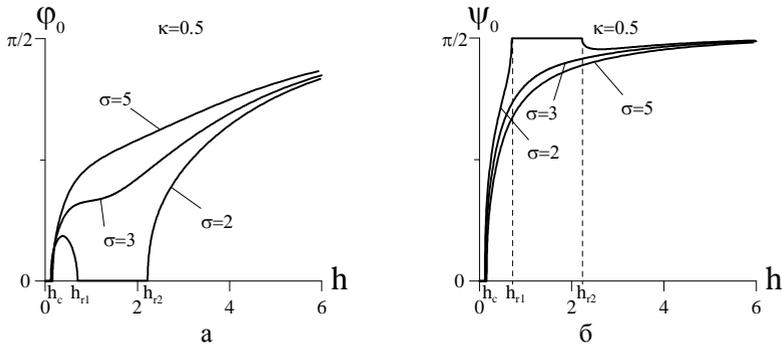


Рис. 10. Зависимости углов ориентации директора (а) и намагнитченности (б) в центре слоя от напряженности поля h при $k = 1.56$, $b = 10$ и различных значениях энергии сцепления σ

Вблизи точек ориентационных переходов свободная энергия ФН представлена в виде разложения Ландау, анализ которого показал, что при *слабом* сцеплении частиц с матрицей переход Фредерикса является переходом второго рода, два других перехода могут быть как первого, так и второго рода.

Исследованы пространственные искажения директора и намагнитченности, распределение магнитной примеси, фазовая задержка и интенсивность проходящего через образец света как функции магнитного поля и материальных параметров. На рис. 11 показана интенсивность света для случая, когда переход из однородного состояния в неоднородное происходит при $h = h_c$ по типу перехода

второго рода, а переход из неоднородного состояния в однородное и последующий переход в неоднородную фазу являются переходами первого рода в полях h_{e1} и h_{e2} . Получены аналитические формулы для трикритических

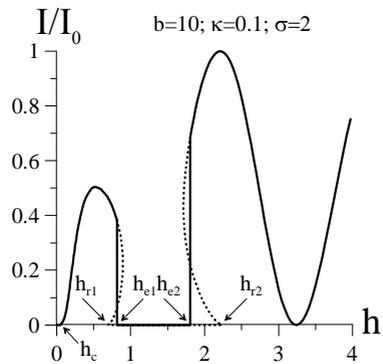


Рис. 11. Интенсивность света, проходящего через слой ФН на основе нематика 5СВ толщиной $L = 10.5 \times 10^{-4}$ см

комбинаций материальных параметров, при которых происходит смена характера переходов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена теория магнитных ориентационных переходов в слое ФН с положительной анизотропией диамагнитной восприимчивости.

Показано, что в случае слабого сцепления магнитных частиц с ЖК-матрицей на фазовой диаграмме системы имеется область существования однородной фазы магнитного насыщения. Получено аналитическое выражение для поля перехода между неоднородным и однородным состояниями. Найдено критическое значение энергии сцепления частиц с ЖК-матрицей, ниже которого происходят переходы неоднородная фаза – однородная фаза – неоднородная фаза. Показано, что при слабом сцеплении каждый из переходов может быть переходом первого или второго рода в зависимости от значений сегрегационного параметра. Аналитически найдены трикритические значения параметра сегрегации. Изучены пространственные искажения директора, концентрации магнитной примеси, намагниченности ФН, фазовая задержка и интенсивность проходящего через образец света как функции приложенного магнитного поля. Обнаружено хорошее согласие результатов расчета электрической емкости ячейки ФН с экспериментальными данными.

2. Построена теория индуцированных внешним магнитным полем ориентационных переходов в слое ФН с отрицательной диамагнитной анизотропией.

Показано, что в изучаемой геометрии в магнитном поле деформация ориентационной и магнитной структуры возникает беспороговым образом. С ростом поля ориентационные искажения ведут себя немонотонно, а ФН намагничивается в направлении поля. Показано, что с ростом поля происходит переход из неоднородного в однородное состояние, который может быть переходом первого или второго рода в зависимости от параметра сегрегации. Аналитически найдено трикритическое значение параметра сегрегации, определяющее границу между переходами первого и второго рода. Изучены искажения директора, концентрации магнитной примеси, фазовая задержка и интенсивность проходящего через образец света как функции напряженности поля. Получено удовлетворительное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными.

3. Построена теория индуцированных магнитным полем ориентационных переходов и магнитооптических явлений в компенсированных ФН с жестким и мягким сцеплением магнитных частиц с ЖК-матрицей.

В случае жесткого сцепления исследованы искажения ориентационной и

магнитной структуры ФН в магнитном поле с учетом диамагнитных и сегрегационных эффектов. Показано, что индуцированный магнитным полем переход Фредерикса из однородного в неоднородное состояние имеет пороговый характер. Аналитически найдено поле перехода как функция материальных параметров ФН. Изучено намагничивание ФН и его оптические свойства при сильной и слабой сегрегации, как функции магнитного поля.

Установлено, что при слабом сцеплении дисперсной фазы с ЖК-матрицей допустимыми являются два типа однородных состояний ФН, переходы между которыми носят пороговый характер. Одно из них отвечает невозмущенной полем структуре директора и намагниченности, другое – невозмущенному директору и ортогональной к нему намагниченности, параллельной приложенному полю. Показано, что переход Фредерикса происходит в полях, меньших по сравнению с чистым ЖК, и является переходом второго рода, а два других перехода между однородным и неоднородным состояниями могут быть первого или второго рода. Получены аналитические выражения, определяющие поля и характер переходов в зависимости от материальных параметров ФН и энергии сцепления.

Показано, что с ростом поля происходит перераспределение частиц между магнитными подсистемами, т.е. выше перехода Фредерикса концентрация частиц, первоначально ориентированных против директора, уменьшается, а концентрация частиц, ориентированных в направлении директора, растет, так что суспензия намагничивается по типу слабого ферромагнетика. Изучены магнитооптические явления при переходах между различными состояниями компенсированного ФН.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. Petrov D.A., Zakhlevnykh A.N. Freedericksz transition in compensated ferro-nematic liquid crystals // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2012. Vol. 557. P. 60–72.
2. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Влияние эффекта сегрегации на магнитные и оптические свойства компенсированного ферронематического жидкого кристалла // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82, вып. 9. С. 28–38. [Technical Physics. 2012. Vol. 57, No. 9. P. 1208–1218].

Статьи в журналах, индексируемых РИНЦ:

3. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Пороговые эффекты в компенсированном ферронематике // *Вестник Пермского университета*. Серия: Физика. 2011. Вып. 3(18). С. 25–33.
4. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Магнитный ориентационный отклик ферронематика с мягким сцеплением коллоидных частиц с матрицей // *Вестник Пермского университета*. Серия: Физика. 2012. Вып. 2(20). С. 55–63.

5. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Намагничивание компенсированного ферронематика с мягким сцеплением коллоидных частиц с матрицей // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2012. Вып. 3(21). С. 65–75.
6. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Ориентационные переходы в ферронематике с отрицательной анизотропией диамагнитной восприимчивости // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 1(23). С. 36–46.
7. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Эффект мягкого сцепления и ориентационная бистабильность ферронематиков // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 1(23). С. 50–61.
8. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Переходы первого рода в компенсированных ферронематиках // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 2(24). С. 17–25.

Тезисы конференций

9. Петров Д.А. Влияние сегрегации магнитной примеси на пороговые эффекты в компенсированном ферронематике // Всероссийская конференция молодых учёных “Неравновесные процессы в сплошных средах”. Пермь. 2011. С. 59.
10. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Пороговые эффекты в компенсированном ферронематике // Российская конференция по магнитной гидродинамике. Пермь. 2012. С. 39.
11. Zakhlevnykh A.N., Petrov D.A. Threshold effects and magnetization in compensated ferronematics // 24th International Liquid Crystal Conference. Mainz, Germany. 2012. PIII-083.
12. Захлевных А.Н., Петров Д.А. Пороговые явления в компенсированном ферронематике // Первая Всероссийская конференция по жидким кристаллам (РКЖК-2012), Иваново. 2012. С. 163.
13. Петров Д.А. Моды ориентационного отклика компенсированного ферронематика на приложенное магнитное поле // Всероссийская конференция молодых учёных “Неравновесные процессы в сплошных средах”. Пермь, 2012. С. 60.
14. Zakhlevnykh A.N., Petrov D.A. Threshold phenomena in compensated ferronematic with soft coupling on colloidal particles // 13th International Conference on Magnetic Fluids. New Delhi, India. 2013. P. 332 – 333.
15. Петров Д.А. Ориентационные переходы в ферронематике с отрицательной диамагнитной восприимчивостью // II Всероссийский конгресс молодых ученых. Санкт-Петербург. 2013. С. 343–344.

Подписано в печать

Формат 60x84/16.

Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ .

Типография Пермского государственного национального исследовательского университета.

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.