

*На правах рукописи*

**Прищепа Оксана Олеговна**

**ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА СТРУКТУРУ И  
ОПТИЧЕСКУЮ ТЕКСТУРУ КАПЕЛЬ НЕМАТИКА,  
ДИСПЕРГИРОВАННОГО В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ**

01.04.05 – оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2005

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Зырянов Виктор Яковлевич**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
профессор **Подопригора Владимир Георгиевич**  
кандидат физико-математических наук  
доцент **Сорокин Анатолий Васильевич**

**Ведущая организация:** Институт теоретической и прикладной  
механики СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_\_ г. в \_\_\_\_\_ часов \_\_\_\_\_ мин.  
на заседании специализированного Диссертационного Совета Д 003.055.01  
в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу:  
660036 г. Красноярск, Академгородок.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики  
им. Л.В. Киренского СО РАН

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

А.Н. Втюрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы*

Разработка и совершенствование современных устройств для оптоэлектроники, информационных технологий, лазерной техники и других применений невозможно без создания новых функциональных материалов. Одним из них являются жидкокристаллические композиты, состоящие, как минимум, из двух компонентов – жидкого кристалла (ЖК) и матрицы, в качестве которой могут быть стекла, полимеры, изотропные жидкости, эпоксидные компаунды и др. Среди композитных сред капсулированные полимером жидкие кристаллы (КПЖК) [1] занимают особое место. Данный материал, представляющий собой полимерную пленку с диспергированными в ней каплями жидкого кристалла, сочетает полезные качества, присущие как полимерам, так и жидким кристаллам. Он характеризуется простой и недорогой технологией изготовления, гибкостью, надежностью в эксплуатации, высокими быстродействием и чувствительностью к внешним воздействиям, в особенности, к электрическому полю.

Фундаментальные исследования КПЖК сред нацелены на выяснение взаимосвязи структурных характеристик композитных пленок и материальных параметров используемых компонентов с макроскопическими (магнитными, электрическими и оптическими) свойствами материала. Специфика структурной организации КПЖК пленок определяется, прежде всего, большим многообразием различных видов ориентационного упорядочения (конфигураций директора) жидкого кристалла в объемных образованиях сложной формы, наличием в них топологических дефектов - дисклинаций, их высокой чувствительностью к различным воздействиям. С другой стороны, конфигурация директора является основным фактором, определяющим особенности оптических и электрооптических свойств ЖК материалов, что убедительно показано, например, в работе [2].

Первые микроскопические наблюдения капельных ЖК дисперсий были проведены еще в XIX веке основоположником науки о жидких кристаллах О. Леманом [3]. Диспергируя нематический ЖК в канадском бальзаме и других вязких матрицах, он выявил два различных типа упорядочения оптической оси – биполярное и радиальное. В последующих работах других авторов было установлено, что ориентационное упорядочение жидкого кристалла в каплях зависит от ряда факторов: соотношения констант упругости ЖК, величины и формы капель, внешних воздействий и граничных условий.

Анализ публикаций по данной тематике показал, что, в основном, работы были нацелены на исследование структурного упорядочения в каплях ЖК при однородных тангенциальных или нормальных граничных условиях, и его трансформации при внешнем воздействии (температуры, электрического и магнитного полей). Однако конфигурацию директора и, следовательно, макроскопические оптические и электрооптические характеристики композитного материала можно кардинально изменить за счет модификации поверхностного сцепления, что и определяет актуальность данных исследований.

В работе [4] было показано, что в каплях НЖК, диспергированного в изотропной жидкости, при изменении граничных условий от планарных к гомеотропным, биполярная конфигурация трансформировалась в радиальную через последовательность переходных ориентационных структур с образованием дополнительных поверхностных дисклинаций. Но исследования аналогичных явлений в каплях нематика, диспергированного в твердой матрице, проведены не были.

#### ***Цель работы и задачи исследований***

Целью работы являлось исследование влияния граничных условий на структурное упорядочение и оптическую текстуру капель нематического жидкого кристалла, диспергированного в полимерной матрице.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Адаптировать растворную технологию фазового разделения для используемой композиции и приготовить образцы КПНЖК пленок с монослойным расположением капель нематика, допированного поверхностно-активным веществом (сурфактантом);
2. С использованием поляризационного оптического микроскопа исследовать текстурные картины капель нематика. Определить особенности ориентации директора на поверхности капель ЖК в образцах с различным содержанием сурфактанта;
3. Используя метод минимизации энергии изгибовых деформаций поля директора, провести расчет ориентационных структур для граничных условий, соответствующих экспериментально наблюдаемым;
4. Для полученных конфигураций директора рассчитать текстурные картины. Сопоставляя результаты расчета оптических текстур с экспериментально наблюдаемыми картинами, выявить конфигурации директора, реализующиеся в каплях нематика при различных граничных условиях.

#### ***Научная ценность и новизна***

1. Обнаружены и экспериментально исследованы новые стабильные ориентационные структуры, образующиеся в каплях нематического ЖК, диспергированного в полимерной матрице. Такие капли формируются при вариации граничных условий от тангенциальных к нормальным за счет добавки поверхностно-активного вещества. Отличительной чертой обнаруженных структур является наличие лишь одного поверхностного дефекта;
2. Установлено, что добавка сурфактанта в определенном диапазоне концентраций приводит к формированию неоднородного (в том числе наклонного) сцепления молекул ЖК на границе раздела с полимером;
3. Проведен численный расчет ориентационных структур и соответствующих текстурных картин капель нематика с неоднородными граничными условиями;
4. Идентифицировано распределение поля директора ЖК в новых ориентаци-

онных структурах, путем сравнения их микрофотографий с рассчитанными оптическими текстурами;

5. Обнаружено, что, наряду со стабильными конфигурациями директора, в КПНЖК пленках образуются долгоживущие нестабильные ориентационные структуры; исследована их эволюция.

#### ***Практическая значимость***

1. Результаты работы, демонстрирующие последовательность ориентационно-структурных переходов в каплях нематика, являются основой для развития методов управления оптическими свойствами КПЖК пленок посредством вариации поверхностного сцепления за счет внешних факторов;
2. Совокупность текстурных картин капель нематиков и соответствующих им конфигураций директора представляет собой систематизированное руководство для идентификации ориентационного упорядочения директора в каплях НЖК с варьируемым поверхностным сцеплением;
3. Развита метод численного расчета конфигураций директора и текстурных картин в приложении к каплям нематического ЖК с неоднородными граничными условиями.

#### ***Основные положения и результаты, выносимые на защиту***

1. При добавлении лецитина, варьируемой концентрации, в нематический жидкий кристалл, диспергированный в полимере с тангенциальным сцеплением, образуются капли с новыми стабильными конфигурациями директора, которые характеризуются наличием лишь одного поверхностного точечного дефекта-буджума;
2. В обнаруженных ориентационных структурах реализуются неоднородные граничные условия, при этом угол сцепления директора ЖК на границе раздела с полимером может меняться от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ;
3. Теоретическое описание новых конфигураций директора возможно при использовании классического метода минимизации энергии упругих деформаций и введении в процедуру расчета неоднородных граничных условий, соответствующих экспериментально наблюдаемым;
4. Наряду со стабильными конфигурациями директора, в КПНЖК пленках образуются долгоживущие нестабильные ориентационные структуры, которые со временем трансформируются в классическую биполярную конфигурацию;
5. Энергия упругих деформаций нематической капли с «вытекшей» радиальной (escaped radial) структурой существенно больше энергии упругих деформаций капли с радиальной конфигурацией, что означает невозможность стабильного существования «вытекшей» радиальной структуры в отсутствие внешних воздействий.

### ***Апробация работы***

Результаты диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на 12<sup>th</sup> International Symposium «Advanced Display Technologies» (Kogolev, Moscow Region, Russia, 2003); Всероссийской научно-технической конференции “Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение” (Красноярск, 2003); 20<sup>th</sup> International Liquid Crystal Conference (Ljubljana, Slovenia, 2004); 13<sup>th</sup> SID Symposium «Advanced Display Technologies» (Minsk, Belarus, 2004); VII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004 (Новосибирск, 2004); IV конференции молодых ученых СО РАН, посвященной М.А. Лаврентьеву (Новосибирск, 2004); Научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Физика и Эйнштейн» НКСФ-2005 (Красноярск, 2005); 14<sup>th</sup> SID Symposium «Advanced Display Technologies» (Crimea, Ukraine, 2005); Конференциях молодых ученых КНЦ СО РАН (Красноярск, 2004, 2005 гг).

### ***Публикации***

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в зарубежных и отечественных журналах (Physical Review E, Письма в ЖЭТФ, Molecular Crystals and Liquid Crystals, Жидкие кристаллы и их практическое использование, Вестник КГУ), 6 статей в сборниках материалов российских и международных конференций, 2 тезисов конференций.

### ***Структура и объем диссертации***

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 96 страницах, включая 46 рисунков, список цитируемой литературы содержит 91 наименование.

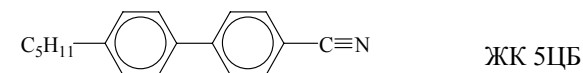
## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена общая характеристика работы: обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований, показана научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации и представлен список опубликованных работ.

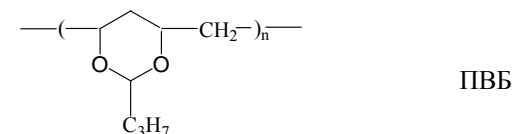
**Первая глава** – обзорная, состоящая из нескольких разделов. В разделе 1.1 приведена классификация жидких кристаллов, показаны особенности структурного упорядочения нематиков, холестериков и смектиков. В разделе 1.2 описаны упругие свойства ЖК, приведены соотношения для определения плотности свободной энергии ЖК при наличии изгибовых деформаций поля директора. Здесь также описаны некоторые электрооптические эффекты, иллюстрирующие принципы работы ЖК в оптоэлектронных устройствах. Раздел 1.3 содержит общее описание композитных жидких кристаллов и методов их приготовления. В разделе 1.4 описаны пленки капсулированных полимером

нематических жидких кристаллов (КПНЖК) и перечислены основные требования, предъявляемые к их компонентам. В разделе 1.5 представлен обзор всех известных к началу данных исследований типов ориентационного упорядочения директора в нематических ЖК каплях и различных факторов, влияющих на их образование. Описан процесс трансформации биполярной конфигурации директора в радиальную при изменении граничных условий от тангенциальности к нормальной в каплях нематика, диспергированных в изотропной жидкости [4]. В разделе 1.6 подробно описана широко используемая методика численного расчета поля директора посредством минимизации упругой энергии ЖК, а также теоретический метод моделирования текстурных картин капель нематиков. В конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

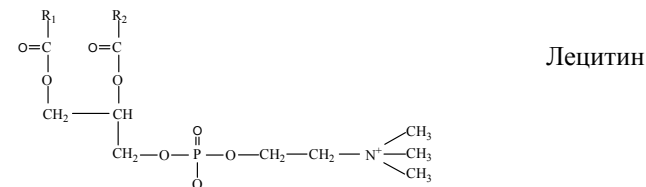
Во **второй главе** представлен перечень используемых материалов с обоснованием их выбора, описаны методики приготовления образцов и их экспериментальных исследований. Основным компонентом КПЖК пленок был широко известный нематический ЖК 5ЦБ (4-н-пентил-4'-цианобифенил), хорошо изученный различными методами, что дает возможность сравнивать полученные результаты с данными независимых исследований.



Поливинилбутираль (ПВБ), обеспечивающий тангенциальное (планарное) сцепление с исследуемым ЖК был выбран в качестве полимерной матрицы. Данный полимер имеет ряд общих растворителей с 5ЦБ. Кроме того, его показатель преломления близок к обыкновенной компоненте показателя преломления 5ЦБ.



Вариация межфазных граничных условий в композитной пленке осуществлялась за счет добавки поверхностно-активного вещества (сурфактанта) – лецитина. Лецитин, относящийся к классу фосфолипидов, обеспечивает при определенной его концентрации гомеотропное сцепление молекул ЖК на границе раздела.



Образцы КПЖК пленок приготавливались с использованием метода фазового разделения из раствора (SIPS) при испарении общего для всех компо-

нентов растворителя – этанола. Морфологические параметры структуры (величина ЖК капель, их форма и относительное расположение в полимерной матрице) зависели от состава композиции, температуры и скорости испарения растворителя. Экспериментальные исследования оптических картин и ориентационного упорядочения директора в каплях нематика проводились при помощи поляризационного микроскопа POLAM P-113, сопряженного с видеокамерой и компьютером. В заключение главы описывается методика численных расчетов ориентационного упорядочения директора в каплях нематика, усовершенствованная нами путем задания по всей границе раздела распределения поверхностного сцепления, соответствующего экспериментальному. Данная методика основана на процедуре минимизации, энергии упругих деформаций  $F_{el}$  в нематических ЖК, проводимой в декартовых координатах в рамках одноконстантного приближения:

$$F_{el} = \frac{1}{2} K [(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + (\operatorname{rot} \mathbf{n})^2] \quad (1)$$

где  $K$  – среднее значение модуля упругости ( $K = [K_{11} + K_{22} + K_{33}]/3$ ).

**Третья глава** содержит результаты исследований оптических текстур и ориентационного упорядочения директора в каплях нематического ЖК со стабильными структурами. Новые конфигурации директора были обнаружены в серии образцов КПНЖК пленок в результате модификации межфазных граничных условий за счет добавки сурфактанта различной концентрации. В отсутствие поверхностно-активного вещества, при однородных планарных граничных условиях, как известно, в КПНЖК пленках формируются хорошо изученные биполярные конфигурации (рис. 1а), характеризующиеся наличием двух точечных дефектов–бужумов. Добавление лецитина в ЖК приводит к образованию ряда новых структур, принципиальным отличием которых от биполярной конфигурации, является наличие лишь одного поверхностного точечного дефекта. Например, в образце, содержащем 0.08 % лецитина, наряду с биполярными, преобладающее количество капель (около 70 %) имеют структуру с одним разрушенным бужумом, показанную на рис. 1б. В КПНЖК пленках с более высоким содержанием сурфактанта (0.1 %), образуются капли с монополярной конфигурацией (рис. 1с), имеющие также лишь один точечный дефект на поверхности. Сравнительный анализ структур, показанных на рис. 1а-с, показывает, что в этом диапазоне изменения концентрации лецитина, увеличение его содержания вызывает все большее выпрямление линий директора. Следовательно, такая тенденция может привести к формированию структуры (рис. 1д), в которой линии директора будут практически прямыми, исходя из бужума, как лучи света от заходящего солнца. При повышении концентрации сурфактанта в ЖК до 1% и более, угол сцепления между молекулами ЖК и границей раздела значительно изменяется по всей поверхности капли, включая окрестности второго бужума. Как известно из топологического анализа [4], изменение сцепления до гомеотропного состояния вызывает трансформацию такого бужума в



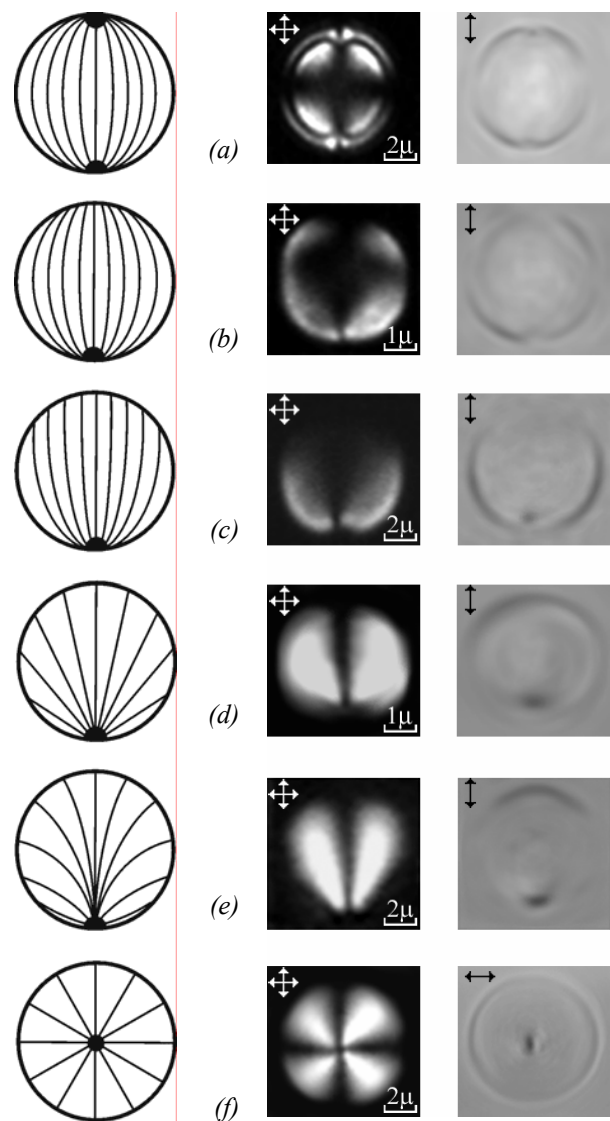
объемный точечный дефект-еж вблизи поверхности, который затем отрывается и уходит в центр капли (радиальная структура, показанная на рис. 1*f*). Это позволяет назвать рассматриваемую конфигурацию директора пред-радиальной (рис. 1*e*).

Классическая методика идентификации конфигураций директора в каплях ЖК [5] включает в себя следующие шаги: определение угла наклона директора ЖК на поверхности капли, исходя из анализа экспериментальных текстур; численный расчет конфигураций директора с использованием полученных данных по поверхностному сцеплению; расчет текстурных картин капель нематика и их сравнительный анализ с микрофотографиями образца. В случае согласия сравниваемых картин можно говорить о корректной идентификации ориентационной структуры капель ЖК.

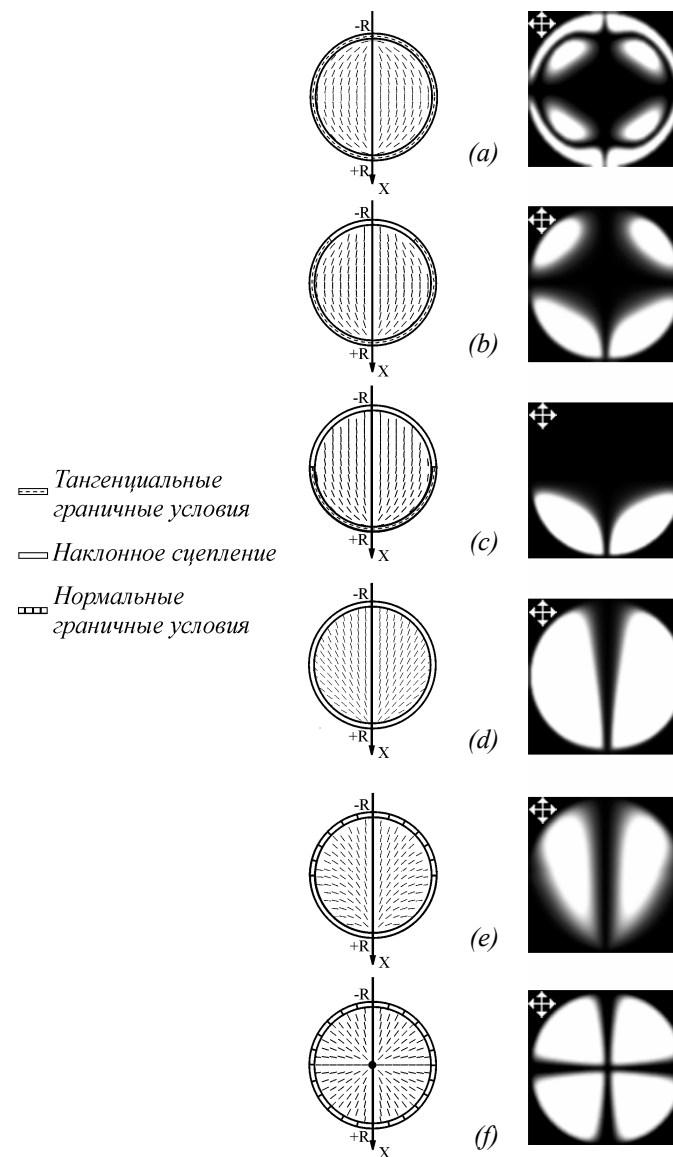
Согласно данной методике нами проведены соответствующие теоретические расчеты обнаруженных ориентационных структур (рис. 2). Прежде всего необходимо подчеркнуть, что использование однородного поверхностного сцепления (даже наклонного) не позволяет смоделировать ни одну из новых структур. Анализ экспериментальных картин капель нематика также свидетельствует о неоднородном распределении угла наклона директора по поверхности капли. Лишь введя неоднородные граничные условия, соответствующие экспериментальным оценкам, нам удалось рассчитать конфигурации директора, текстурные картины которых (рис. 2, справа) хорошо согласуются с экспериментально наблюдаемыми (рис. 1, центральный столбец). Это согласие свидетельствует о правильности подбора граничных условий в процедуре расчета и идентификации ориентационных структур.

Таким образом, нами обнаружены и детально изучены новые стабильные конфигурации директора (рис. 1*b-e*). По итогам исследований можно сделать однозначный вывод о трансформации ориентационной структуры капель нематика при увеличении содержания лецитина, которая выглядит как последовательность, представленная на рис. 1 (левый столбец). Как оказалось, такой эволюционный ряд соответствует второму сценарию взаимопревращения топологических дефектов без формирования дополнительных дисклинаций в объеме и на поверхности ЖК, предсказанному в работе [4]. Следует отметить, что в [4] в рамках топологического анализа рассматривалась трансформация точечных дефектов-бужумов в одной и той же капле при плавном изменении граничных условий от тангенциальных к нормальным. Интересно, что и в разных образцах, отличающихся содержанием сурфактанта, реализуется аналогичная эволюция топологических дефектов.

Необходимо подчеркнуть, что в одном и том же образце композитной пленки возможно появление капель с различными конфигурациями директора. По-видимому, основной причиной этого является неоднородность распределения лецитина в объеме КПЖК пленки.



**Рис. 1.** Схематическая последовательность ориентационных структур (левый столбец) и микрофотографии (центральный столбец – в скрещенных поляризаторах, правый – без анализатора) каплей 5ЦБ, диспергированных в ПВБ; (a) биполярная, (b) капля с одним разрушенным буждом, (c) монополярная, (d) структура заходящего солнца, (e) пред-радиальная, (f) радиальная.

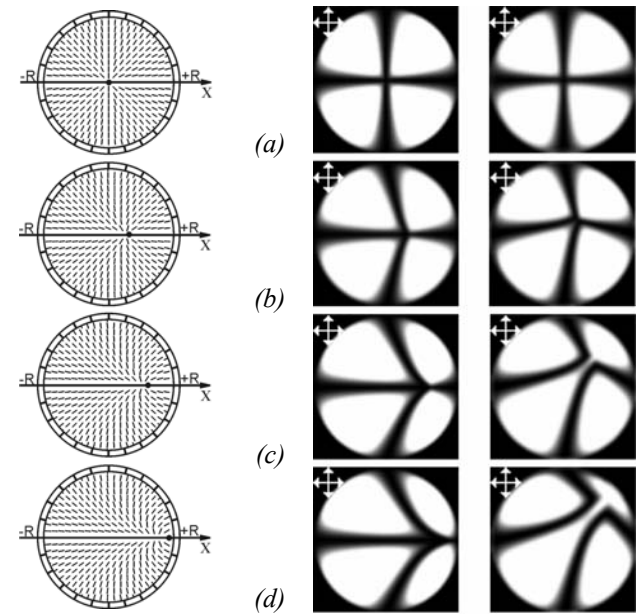


**Рис. 2.** Рассчитанные конфигурации директора (слева) и соответствующие текстурные картины в скрещенных поляризаторах (справа) капля нематика; (a) биполярная, (b) капля с одним разрушенным буждомом, (c) монополярная, (d) структура заходящего солнца, (e) пред-радиальная, (f) радиальная.

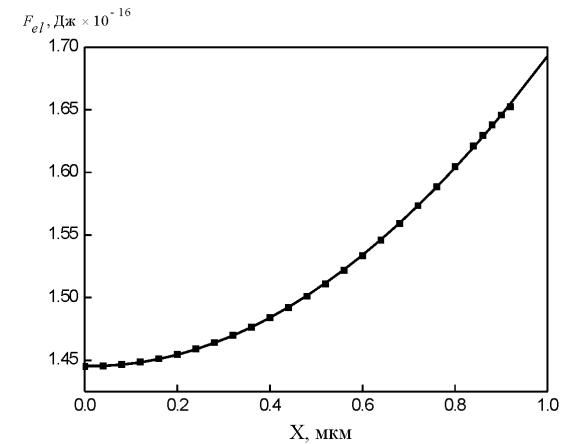
В **четвертой главе** изложены результаты исследования оптических текстур и ориентационного упорядочения в каплях нематического ЖК с нестабильными конфигурациями директора.

Экспериментальные исследования КПНЖК пленок, проведенные в настоящей работе, показали, что ни при какой концентрации лецитина не образуются стабильные конфигурации, которые можно было бы идентифицировать, как «вытекшие» радиальные (escaped radial). Для выявления специфики таких структур в разделе 4.1 был проведен расчет присущей им конфигурации директора и соответствующих текстурных картин по следующей оригинальной схеме. В объеме капли был задан искусственный дефект в виде маленькой сферы радиусом  $r = 0.02R$  с жестким гомеотропным сцеплением на ее внешней поверхности. Сначала мы расположили сферу в центре капли, и получили в результате упорядочение директора (рис. 3a), типичное для классической радиальной структуры. Перед следующим циклом расчетов мы перемещали сферу вдоль радиуса капли на расстояние  $\Delta x = 0.02R$ . Каждый раз в качестве исходной структуры при новом положении сферы мы использовали результаты расчета для предыдущего шага. При таком алгоритме расчет приводит к получению стабильных конфигураций, структурным дефектом которых является сфера (рис. 3b-d). Стабильные конфигурации получаются при перемещении сферы вплоть до положения дефекта  $x = 0.92R$  на оси X (рис. 3d). При  $x > 0.92$  происходит рождение еще одного точечного дефекта, который в процессе процедуры минимизации отделяется от искусственной сферы и уходит в центр капли. Тем не менее, уже при  $x = 0.92R$  получается конфигурация директора близкая к «вытекшей» радиальной. Для полученных конфигураций директора мы рассчитали соответствующие им текстуры капель в скрещенных поляризаторах. Расчет показал, что оптические текстуры «вытекшей» радиальной структуры (рис. 3d, центральный столбец) существенно отличаются от текстур пред-радиальных капель (рис. 1e, центральный столбец).

Кроме этого, мы рассчитали энергию упругих деформаций  $F_{el}$  в объеме капли радиусом  $R = 1$  мкм в зависимости от положения дефекта. При расположении сферы в центре капли  $F_{el} = 1.445 \times 10^{-16}$  Дж. Значение этой величины совпадает со значением упругой энергии, рассчитанной по хорошо известной формуле  $F = 8\pi K(R-r)$  без учета сферы. Это показывает, что вводимый нами дефект не искажает результаты расчета. При удалении сферы от центра капли упругая энергия увеличивается, как показано на рис. 4. Мы экстраполировали расчетную зависимость до  $x = R$  и, таким образом, оценили, что упругая энергия «вытекшей» радиальной структуры превышает  $F_{el}$  радиальной приблизительно в 1.17 раза. Таким образом, полученный результат, по сути, является теоретическим обоснованием нестабильности «вытекшей» радиальной структуры. Однако, сделанный вывод не противоречит тому, что такую конфигурацию можно наблюдать в динамике структурных превращений капель нематика [4], либо как стабильную структуру при воздействии электрического поля [6].

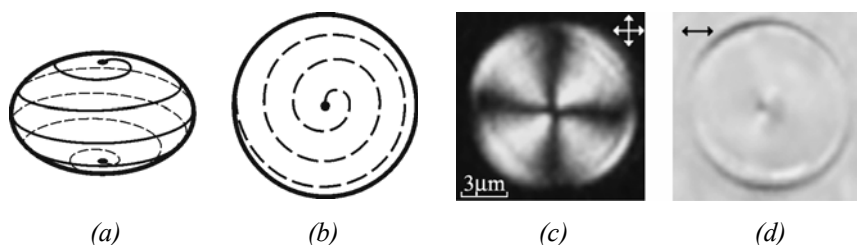


**Рис. 3.** Конфигурации директора (левый столбец) и соответствующие текстуры в скрещенных поляризаторах (в центральном столбце – ось симметрии капли параллельна поляризатору, в правом – повернута на  $45^\circ$ ) в капле нематика с нормальными граничными условиями, рассчитанные при различных положениях точечного дефекта-ежа. (a)  $x = 0$ , (b)  $x = 0.30R$ , (c)  $x = 0.60R$ , (d)  $x = 0.92R$ .



**Рис. 4.** Упругая энергия капельных структур (см. рис. 3) в зависимости от положения точечного дефекта-ежа.

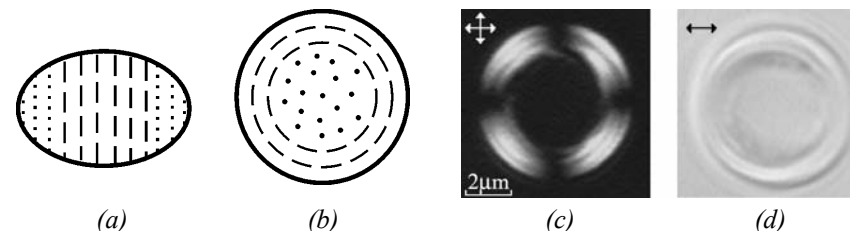
В разделе 4.2 описана нестабильная супер-твист-биполярная конфигурация директора, образующаяся в КПНЖК пленке без примеси лецитина (рис. 5). Текстура таких каплей в скрещенных поляризаторах (рис. 5*c*) похожа на текстурную картину радиальных структур (рис. 1*f*, центральный столбец). Однако наблюдение в геометрии с выключенным анализатором (рис. 5*d*) показывает, что их конфигурации принципиально различны, поскольку ориентация директора на границе капли (рис. 5) близка к тангенциальной. На основе детального изучения текстурных картин таких каплей была построена схема ориентационного упорядочения директора, представленная на рис. 5*a, b*. Исследование супер-твист-биполярных структур показало, что с течением времени (порядка нескольких месяцев) они трансформируются в классические биполярные. При этом, как следует из регулярных наблюдений ансамбля каплей, могут реализоваться два сценария превращения: либо через промежуточную слабо закрученную биполярную конфигурацию с последующим поворотом оси симметрии в плоскость пленки, либо через сложную многодефектную конфигурацию. Детальное описание переходных структур приведено в разделе 4.2.



**Рис. 5.** Схема конфигурации директора супер-твист-биполярной капли: вид сбоку (*a*), вид сверху (*b*). Микрофотографии супер-твист-биполярной капли в геометрии скрещенных поляризаторов (*c*), без анализатора (*d*).

В образцах КПНЖК пленок с содержанием лецитина около 0.24 % (раздел 4.3), наряду со стабильными ориентационными структурами, образуются капли (рис. 6), периферийные участки которых сходны с текстурами супер-твист-биполярных каплей. На рис. 6*c* видны четыре полосы погасания, расположенные крестообразно, а при наблюдении без анализатора (рис. 6*d*) также максимально резко проявляются верхняя и нижняя части окружности капли, т.е. те участки границы, к которым поляризация света направлена по касательной. Следовательно, в периферийной области директор имеет упорядочение, близкое к тороидальному. Однако, в отличие от супер-твист-биполярной структуры, центральная часть каплей в скрещенных поляризаторах (рис. 6*c*) выглядит как темное пятно и остается неизменной при повороте столика микроскопа. Это может быть лишь в том случае, когда директор в центральной области капли ориентирован перпендикулярно плоскости пленки (директор ЖК направлен вдоль оси зрения). Отсюда следует, что тороидальное упорядо-

чение директора, реализующееся в экваториальной (светлой) области капли при удалении от поверхности испытывает twist-деформацию, переходя в центральное ядро с ориентацией директора перпендикулярно плоскости пленки. Схема ориентационного упорядочения директора в twist-тороидальной капле, соответствующая этим особенностям, показана на рис. 6 *a, b*.



**Рис. 6.** Схема конфигурации директора twist-тороидальной капли: вид в поперечном сечении (*a*), вид сверху (*b*). Микрофотографии twist-тороидальной капли в геометрии скрещенных поляризаторов (*c*), без анализатора (*d*).

Данная конфигурация, также как и супер-twist-биполярная, является нестабильной. В течение нескольких месяцев после изготовления КПЖК пленки twist-тороидальные капли постепенно преобразуются в классические биполярные. Переходные структуры между twist-тороидальными и биполярными каплями, а также их оптические текстуры подробно анализируются в разделе 4.3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование влияния граничных условий на структурную организацию и оптическую текстуру капель нематического жидкого кристалла 5ЦБ, диспергированного в поливинилбутиральной матрице, обеспечивающей тангенциальную ориентацию директора. Изменение поверхностного сцепления от тангенциального до нормального достигалось за счет вариации концентрации гомеотропного сурфактанта – лецитина, добавляемого в ЖК.
2. Обнаружены новые стабильные конфигурации директора, формирующиеся в диапазоне изменения концентрации лецитина  $0 \div 1 \%$ , которые образуют последовательность структур, промежуточных между биполярной и радиальной. Подробно описаны наиболее характерные из них: структура с одним разрушенным буджумом, монополярная конфигурация, структура заходящего солнца, пред-радиальная конфигурация. Отличительной чертой новых структур является наличие лишь одного поверхностного точечного дефекта-буджума.
3. Анализ оптических текстур свидетельствует о формировании в переходных структурах неоднородных (в том числе наклонных) граничных условий с преобладанием гомеотропного сцепления вблизи одного буджума, и

тангенциального сцепления вблизи второго. Установлено, что при увеличении содержания гомеотропного сурфактанта буджумы трансформируются последовательно друг за другом. Сначала один из них разрушается и исчезает. Затем второй буджум превращается в объемный дефект-еж, который при концентрации лецитина более 1 % локализуется в центре капли, формируя стабильную радиальную конфигурацию.

4. Впервые проведен численный расчет ориентационного упорядочения директора в нематических ЖК каплях с неоднородными граничными условиями. Для решения этой задачи были использованы эмпирические соотношения, описывающие распределение угла поверхностного сцепления на межфазной границе ЖК-полимер, которые соответствовали реальным границам раздела, наблюдаемым в эксперименте. На основе полученных данных о распределении поля директора проведен расчет соответствующих оптических текстур ЖК капель в геометрии скрещенных поляризаторов. Сравнительный анализ микрофотографий капель с результатами расчета оптических текстур позволил идентифицировать конфигурации директора, реализующиеся в каплях нематика при различных граничных условиях.
5. Впервые проведено численное моделирование поля директора и оптических текстур «вытекшей» радиальной (escaped radial) структуры, из которого следует, что локализация объемного точечного дефекта-ежа вблизи поверхности капли приводит к увеличению энергии упругих деформаций в 1.17 раза по сравнению с радиальной конфигурацией. Это означает невозможность существования в исследуемой композиции стабильной «вытекшей» радиальной структуры в отсутствие внешних воздействий. Экспериментальные наблюдения подтверждают данный вывод, показывая отсутствие капель с текстурными картинками, присущими такой конфигурации.
6. Показано, что в КПНЖК пленках наряду со стабильными конфигурациями директора могут образоваться нестабильные ориентационные структуры: супер-твист-биполярная и твист-тороидальная. Причиной формирования и эволюции таких структур может быть высокоупорядоченная одноосная ориентация макромолекул в экваториальной области полимерной стенки, возникающая в процессе фазового разделения и постепенно ослабевающая с течением времени. Нестабильные конфигурации в течение нескольких месяцев трансформируются в классическую биполярную структуру.



**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Прищепа О.О., Шабанов А.В., Зырянов В.Я. Трансформация конфигурации директора в каплях нематического жидкого кристалла при изменении граничных условий // Письма в ЖЭТФ. – 2004. - Т.79, №6. - С. 315-319.
2. Prishchepa O.O., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya. Director configurations in nematic droplets with inhomogeneous boundary conditions // Physical Review E. – 2005. – V.72. – No3. – 031712.
3. Prishchepa O.O., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya. Director configurations within nematic droplets doped by lecithin // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2005. – V.438. – P. 141[1705]-150[1714].
4. Прищепа О.О., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Нестабильные конфигурации директора в каплях нематического жидкого кристалла, диспергированного в полимере // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2005. – Вып.3-4. – С. 54-63.
5. Прищепа О.О., Зырянов В.Я. Исследование неравновесных ориентационных структур в каплях нематического жидкого кристалла с варьируемым поверхностным сцеплением // Вестник Красноярского государственного университета. – 2005. – Вып. 4. – С. 82-88.
6. Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Texture and optical properties of stretched composite films doped by lecithin // 12<sup>th</sup> International Symposium «Advanced Display Technologies: Basic Studies of Problems in Information Display»: SID Proceedings. – Korolev, Moscow Region, Russia, 2003. – P. 137-140.
7. Прищепа О.О., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Текстуры и ориентационные структуры капсулированных полимером капель нематического жидкого кристалла с добавлением лецитина // Материалы Всероссийской научно-технической конференции “Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение”. – Красноярск, 2003. – С. 26-29.
8. Прищепа О.О. Конфигурации директора в каплях нематического жидкого кристалла, допированного лецитином // Материалы конференции молодых ученых КНЦ СО РАН. – Красноярск, 2004. – С. 39-42.
9. Prishchepa O., Shabanov A., Zyryanov V. Director configurations within nematic droplets doped by lecithin. 20<sup>th</sup> International LC Conference, Ljubljana, Slovenia, 2004, Abstracts, p.757.
10. Prishchepa O.O., Parshin A.M., Barannik A.V., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya. Structure, electro- and magneto-optical properties of PDNLC films doped by lecithin // Proceedings of 13<sup>th</sup> SID Symposium «Advanced Display Technologies». – Minsk, Belarus, 2004. – P. 107 – 109.
11. Прищепа О.О., Шабанов А.В., Зырянов В.Я. Радиальная конфигурация в каплях нематика с наклонной ориентацией директора на границе раздела // Материалы VII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004. – Новосибирск, 2004. – Т.2. - С. 246-249.

12. Баранник А.В., Прищепа О.О., Шабанов А.В. Влияние примесных добавок на ориентационную структуру и динамику электрооптического отклика в дисперсных системах жидкий кристалл – полимер // Материалы IV конференции молодых ученых СО РАН, посвященной М.А. Лаврентьеву. – Новосибирск – 2004. – Часть I. – С. 41-45.
13. Прищепа О.О. Исследование ориентационного упорядочения в каплях нематического жидкого кристалла при вариации граничных условий // Тезисы докладов научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Физика и Эйнштейн» НКСФ-2005. – Красноярск, 2005. – С. 102.

#### **СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. – Новосибирск: Наука, 1994. – 214 с.
2. Ковальчук А.В., Курик М.В., Лаврентович О.Д., Серган В.В. Структурные превращения в каплях нематика во внешнем электрическом поле // ЖЭТФ. – 1988. – Т. 94, №5. – С. 350–364.
3. Lehmann O. Die Structure kristallinischer Flussigkeiten // Ztschr.phys.Chem. – 1890. – Bd. 5. – S. 427–435.
4. Воловик Г.Е., Лаврентович О.Д. Топологическая динамика дефектов: буджумы в каплях нематика // ЖЭТФ. – 1983. – Т. 85, №6(12). – С. 1997–2010.
5. Ondris-Crawford R., Boyko E.P., Wagner B.G., Erdmann J. H., S. Zumer, and J.W. Doane Microscope textures of nematic droplets in polymer dispersed liquid crystal // J. Appl. Phys. – 1991. – V. 69, No. 9. – P.6380-6386.
6. Xu F., Kitzerow H.-S., and Crooker P.P. Electric-field effects on nematic droplets with negative dielectric anisotropy // Phys. Rev. A. – 1992. – V. 46. – P. 6535-6540.

---

Подписано в печать 25.11.05 г.  
Формат 60×85/16. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л. 0.9  
Усл. печ. л. 1.2. Тираж 70. Заказ № 40

---

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН

---