

На правах рукописи



Тимиров Юлай Ильдарович

**Структурные превращения в каплях
нематохонлестериков индуцированные
электрическими полями**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,
профессор,
Скалдин Олег Алексеевич*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,
профессор,
Захлевных Александр Николаевич*

*доктор физико-математических наук,
профессор,
Урманчиев Саид Федорович*

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук*

Защита состоится 27 апреля 2012 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 002.099.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук по адресу: 450075, г. Уфа, Проспект Октября 71, конференц-зал, тел/факс: 8(347)2921417

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук.

Автореферат разослан « 15 » _____ 2012 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, направлять по указанному адресу: 450075, г.Уфа, пр. Октября, 151, ИФМК УНЦ РАН, диссертационный совет ДМ 002.099.01.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ломакин Г.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Экспериментальные исследования ориентационных эффектов и электрооптики жидких кристаллов (ЖК), с одной стороны имеют вполне конкретное практическое содержание – применение в системах отображения и обработки информации (ЖК-индикаторы, ЖК-дисплеи и т.д.), а с другой стороны, являются важными и с фундаментальной точки зрения. В частности, это касается вопросов симметрии образующегося надмолекулярного порядка в исследуемых диссипативных структурах и процессах генерации дефектов при наличии несимметричных граничных условий, что является в последние годы предметом активных исследований. Это связано, во-первых, с конечностью всех реальных систем, т.к. на мезоуровне поверхностная и объемная части энергии становятся сравнимыми. Во-вторых, неоднородное по пространству распределение молекулярной ориентации в ЖК и неравенство поверхностной энергии на границах плоского слоя, задающее дополнительную анизотропию надмолекулярного характера в объеме ЖК, могут приводить к реализации существенно иного типа неустойчивостей при внешнем воздействии по сравнению с обычным однородным случаем, а также определять разнообразие динамических структур и их симметрию. Наряду с этим, физика образования, динамика и строение дефектов упорядоченности структурных элементов и их симметрия традиционно являются одной из наиболее актуальных областей физики конденсированного состояния. В первую очередь это определяется влиянием и ролью дефектов в различного рода переходных процессах (фазовые, структурные превращения и т.д.).

Поэтому исследование роли симметрии анизотропных систем, а также состояния ЖК на границе раздела фаз в процессах образования надмолекулярного порядка, в том числе, и нестационарных структур в электрическом поле, и связи их симметрии с симметрией воздействующих факторов является весьма важной для понимания фундаментальных принципов формирования и динамики образования периодических макроструктур, сценариев развития ориентационных неустойчивостей во внешних полях, а также механизмов их разупорядочения.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование особенностей ориентационных неустойчивостей и структурных превращений в слоях и каплях нематохолестерических жидких кристаллов (НХЖК) под действием внешнего электрического поля: влияние границ и степени закрутки равновесного геликоида индуцированного холестерическими добавками.

Научная новизна

1. Разработан экспериментальный метод определения шага спирали по критическому напряжению ориентационного перехода гомеотропная фаза – транс-

ляционно-инвариантная конфигурация (ТИК).

2. Обнаружен и классифицирован ряд периодических процессов в каплях НХЖК, связанных с изменением поля директора во внешних электрических полях в зависимости от соотношения шага спирали нематохолестерика P к радиусу капель R .

3. Показано, первое, что увеличение концентрации холестерического допанта (уменьшение P по сравнению с R) приводит к инициации ориентационного перехода, развивающегося от сферической границы; второе – в нематохолестерических каплях при $P \gg R$ в электрическом поле переход Фредерикса становится непрерывным, т.е. беспороговым; третье – симметрия образующихся динамических структур не всегда определяется симметрией воздействующего фактора и симметрией анизотропной среды.

Практическая значимость. Результаты, полученные в работе, расширяют существующие представления о влиянии на ориентационно-структурные превращения в слое НХЖК внешних факторов, таких как электрическое поле, энергия взаимодействия слоя НХЖК с подложкой. Представленные в диссертации результаты, демонстрирующие электрооптические эффекты в каплях НХЖК в зависимости от управляющих параметров (граничные условия, внешнее электрическое поле, шаг холестерической спирали, диаметр капель, толщина ЖК-слоя), являются основой для развития методов управления оптическими свойствами НХЖК и создания систем отображения и преобразования информации.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Для определения равновесного шага спирали нематохолестерика по ориентационному переходу гомеотроп – трансляционно-инвариантная конфигурация (ТИК) необходимо учитывать конечность энергии сцепления молекул ЖК с поверхностью.

2. Холестерические добавки в каплях нематохолестерика при $P \gg R$ приводят к тому, что ориентационный переход Фредерикса становится беспороговым.

3. Развивающийся электрооптический эффект локального вращения в каплях НХЖК с $P \gg R$ обусловлен вращением центральной дисклинации, что приводит к распространению спиральной ориентационной волны вдоль оси капли.

4. Образование нестационарных спиральных структур в каплях нематохолестерика при $P < R$ является следствием развития электрогидродинамической (ЭГД) неустойчивости и обусловлена смещением зон Гранжана относительно друг друга.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на XII, XIII, XIV, XV, XVII Всероссийской конференции “Структура и динамика молекулярных систем” (Йошкар-Ола,

2005-2010), Международной уфимской зимней школе-конференции по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2005), International Summer School on Liquid Crystal (Бондол, Франция, 2007), Первом международном междисциплинарном симпозиуме “Физика низкоразмерных систем и поверхностей” (Ростов-на-Дону, 2008), 14 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Уфа, 2008), The 22nd International Liquid Crystal Conference (Джеджу, Корея, 2008), VII Международной научной конференции (Иваново, 2009), The 14th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals (Ереван, Амения, 2011), Всероссийской молодежной конференции “Мавлютовские чтения” (Уфа, 2011), Международной школе-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 2011).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 4 в рецензируемых журналах [1–4], 6 в сборниках трудов и материалов конференций [5–10] и 10 тезисов докладов [11–20].

Личный вклад автора заключается в совместной с научным руководителем постановке задач, обсуждении и интерпретации результатов, приготовлении образцов с различной конфигурацией директора: планарной и гомеотропной, создании ориентационных и прозрачных проводящих пленок на подложках с применением методов центрифугирования и магнетронного напыления, проведении электрооптических исследований с применением методов поляризационно-оптической микроскопии, обработке экспериментальных результатов, интерпретации и обобщении полученных данных, формулировке защищаемых положений и выводов, написании статей.

Автор выражает искреннюю благодарность О.А. Скалдину как научному руководителю, Н.Г. Мигранову и В.А. Делеву за полезные дискуссии, А.Н. Чувыврову, М.В. Хазимуллину и Ю.А. Лебедеву за конструктивные замечания и плодотворное обсуждение результатов работы, а также всем коллегам лаборатории ФТТ за помощь и содействие в выполнении диссертационной работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 151 наименований. Работа изложена на 145 страницах и содержит 63 иллюстраций.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись в соответствии с темами НИР РАН (01.2.00600318, 01.2.00900728) и поддерживались грантами РФФИ (05-02-16548, 05-02-16716, 05-02-97907, 08-02-97008), ГНТП РБ (2007, 2009) и грантом №25 Республики Башкортостан молодым ученым и молодежным научным коллективам (2011).

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована её цель и задачи исследования, показана научная новизна полученных результатов, обосновано научное и практическое значение работы, изложены положения, выносимые на защиту, и дана краткая характеристика материалов диссертации.

В **первой главе** приведен обзор литературных источников, в котором излагаются общие сведения о ЖК и их свойствах, описываются основные механизмы и электрооптические эффекты, существующие в нематических жидких кристаллах (НЖК) и НХЖК во внешних полях. Здесь же рассмотрены экспериментальные и теоретические работы, посвященные ориентационным эффектам в нематохолестерических смесях в зависимости от приложенного внешнего поля и граничных условий. Описаны наблюдаемые в каплях ЖК ориентационные структуры и факторы, влияющие на их образование. Обсуждаются работы, посвященные изучению ориентационно-структурных превращений индуцированных температурой, модификацией граничных условий и электрическим полем в ЖК, заключенном в сферические оболочки (нематические оболочки).

Во **второй главе** изложены основные сведения о материалах, используемых в качестве объекта исследования, методах получения различных граничных условий и создания дисперсных систем капель НХЖК в изотропном окружении, методиках определения и контроля воздушного зазора ЖК-ячеек, а также расчета шага спирали НХЖК смеси, методике поляризационно-оптических исследований ЖК.

В **третьей главе** экспериментально и теоретически изучен ориентационный переход гомеотропная фаза – ТИК индуцированный электрическим полем в тонком слое НХЖК, на границах которого созданы мягкие гомеотропные условия сцепления.

Рассматривается критическое напряжение U_c ориентационного перехода гомеотропное состояние – ТИК как функция степени обработки стеклянной подложки с проводящим слоем ИТО поверхностно-активным веществом (ПАВ) [3-(триметоксисил)пропил]октадесил-диметиламмоний хлоридом (ДМОАР) для смесей НХЖК со значениями равновесного шага спирали равного: $P_{0.22\%} \approx 54$ мкм, $P_{0.165\%} \approx 72$ мкм, $P_{0.11\%} \approx 108$ мкм.

Экспериментальные зависимости критических напряжений от концентрации ДМОАР для трех различных смесей нематохолестериков представлены на рис. 1, а, откуда видно, что с увеличением концентрации ПАВ до 5 % ДМОАР наблюдается рост переходного напряжения U_c с последующим насыщением. Проведены расчеты величины шага спирали от порогового напряжения U_c перехода в ТИК по формуле (1), используя экспериментальную зависимость

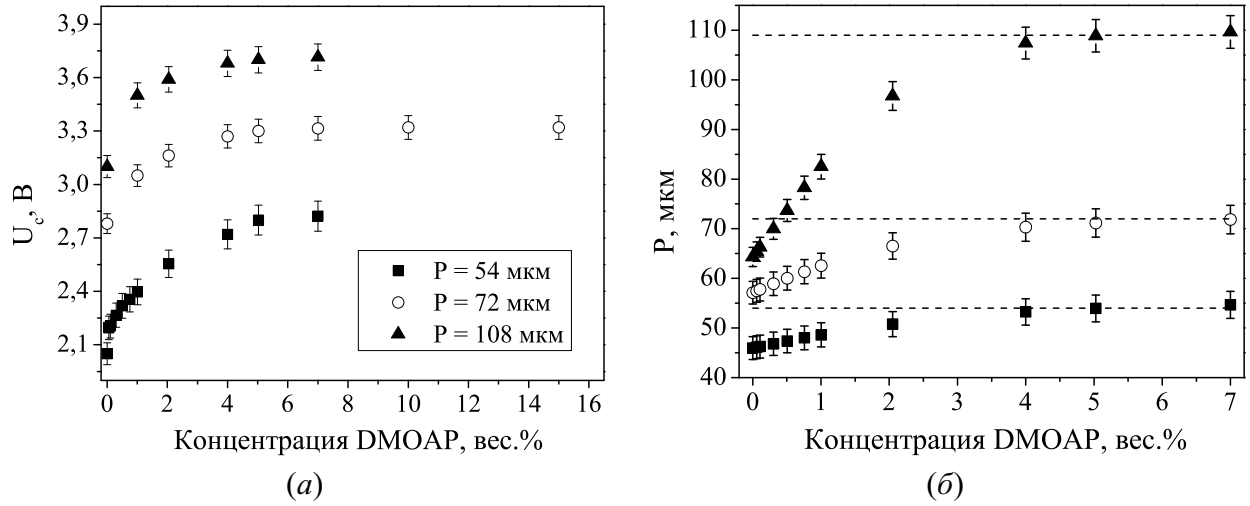


Рис. 1. Зависимости порогового напряжения U_c для НХЖК с различными массовыми долями холестерилхлорида от концентрации DMOAP (а); зависимости расчетного шага спирали P по значению критического напряжения U_c от концентрации DMOAP (б).

последнего от концентрации поверхностно-активного вещества DMOAP. Результаты расчетов представлены на рис. 1, б. Показано, что выражение полученное для P_∞ от критического напряжения U_c перехода из гомеотропного состояния в ТИК [21, 22] не соответствует предельному случаю жесткого сцепления ($W_s \rightarrow \infty$).

$$P_\infty = \frac{2\pi K_{22}d}{\sqrt{U_c^2 \varepsilon_0 \varepsilon_a K_{33} + \pi^2 K_{33}^2}}, \quad (1)$$

где ε_a – анизотропия диэлектрической проницаемости НХЖК, ε_0 – диэлектрическая постоянная, d – толщина слоя, K_{22} и K_{33} константы упругости для кручения и продольного изгиба соответственно. Следовательно наблюдаемое при малых концентрациях DMOAP уменьшение значения шага спирали (рис. 1, б) является фиктивным и его фактически необходимо отнести на счет изменения энергии сцепления, которая не учитывается соотношением (1).

Для подтверждения экспериментальных данных проведен теоретический анализ влияния энергии сцепления молекул НХЖК с подложкой на ориентационный переход из холестерического гомеотропного состояния в ТИК. В одноконстантном приближении ($K = K_{11} = K_{22} = K_{33}$) по аналогии с [23] получено выражение (2) для ориентационного перехода гомеотропная фаза–ТИК, позволяющее определить энергию сцепления молекул НХЖК с подложками ячейки в зависимости от концентрации DMOAP.

$$W_s = \sqrt{\frac{4\pi^2 K^2}{P^2} - \frac{\varepsilon_a \varepsilon_0 U_c^2 K}{d^2}} \operatorname{tg} \left(\frac{d}{2K} \sqrt{\frac{4\pi^2 K^2}{P^2} - \frac{\varepsilon_a \varepsilon_0 U_c^2 K}{d^2}} \right), \quad (2)$$

На рис. 2 представлены, рассчитанные согласно (2), зависимости энергии сцеп-

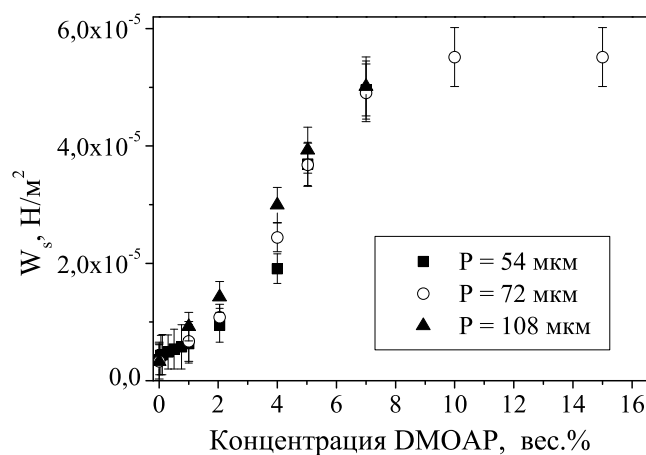


Рис. 2. Зависимость энергии сцепления W_s молекул смеси НХЖК от концентрации DMOAP.

ления W_s от концентрации DMOAP.

Таким образом, показано, что пороговое напряжение перехода гомеотропная ориентация – ТИК существенно зависит от энергии сцепления, что является важным для определения шага спирали.

В четвертой главе исследованы электрооптические эффекты и структурные переходы в каплях нематохолестерика, индуцированные электрическим полем, хиральным допантом и границей.

Раздел 4.1 посвящен экспериментальному и теоретическому исследованию условий реализации локализованных возмущений поля директора на поверхности сферических капель НЖК без холестерических добавок при слабых граничных условиях, т.е. для случая, когда директор на границе может легко менять ориентацию при действии слабых внешних полей. Этот случай наиболее часто реализуется при микроскопическом наблюдении сферических зародышей жидкого кристалла, свободно плавающих в изотропном расплаве вблизи точки просветления. Показано, что при увеличении концентрации добавок, модифицирующих граничные условия – типа полиенов, приводит к неустойчивости “ежа” и образованию солитоноподобных дефектов на поверхности. На основании теоретических расчетов построены распределения поля директора в каплях, которые достаточно хорошо согласуется с определенными экспериментально.

Исследования динамики переориентации директора сферических капель нематика при слабых граничных условиях проводились при воздействии на ячейку с ЖК переменного электрического поля. Для выяснения роли переменного электрического поля в возникновении стационарного режима “осцилляции”, изучались зависимости периода взаимопревращений в каплях от частоты и амплитуды приложенного напряжения. Характер зависимостей позволяет сделать вывод о том, что в каплях нематика реализуется низкочастотный режим ЭГД неустойчивости [24]. Критическое напряжение U_c , выше которо-

го “осцилляции” не наблюдаются, не зависит от размеров капель, что также подтверждает, что имеет место низкочастотная ЭГД-неустойчивость. Теоретическая оценка для скорости переориентации директора, в этом случае, хорошо согласуется с экспериментально определенным периодом “осцилляции” каплях ЖК.

Итак, проведенное экспериментальное исследование сферической капли подтверждает теоретический вывод о том, что при наличии слабых граничных условий (подбором условий допирования НЖК) на поверхности НЖК возможно существование солитоноподобных дефектов (статических и динамических), размеры и скорость движения которых определяются минимумом полной энергии, являющейся суммой объемной энергии деформации и поверхностной энергии.

В разделе 4.2 изучены структурные превращения в каплях нематохолестерика с большим шагом спирали $P_{0.05\%} = 238$ мкм, существующие в изотропном окружении в окрестности точки просветления при изменении управляющего напряжения. В результате сравнительного анализа текстурных картин этих капель с существующими в НЖК [25] восстановлены соответствующие распределения поля директора в них (рис. 3), представляющие с собой плавный переход от радиальной к биполярной структуре.

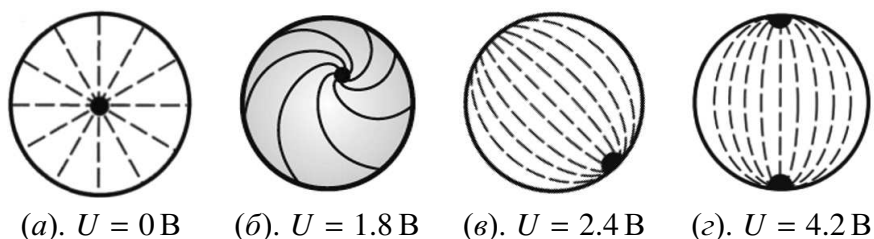


Рис. 3. Последовательность ориентационных структур, образующихся при изменении внешнего электрического поля. Радиальная капля (а), твист-биполярная (б), капля с разрушенным дефектом (в), биполярная капля (г).

В разделе 4.3 проведены исследования ориентационных превращений в каплях нематохолестерика, индуцированные хиральным допантом, для случая, когда равновесный шаг спирали значительно больше чем размер капель. На рис. 4 представлены типичные текстуры НХЖК-капель в отсутствии внешнего электрического поля при различных концентрациях холестерилхлорида, приводящих к вариации шага спирали нематохолестерика. Их особенностью является наличие центральной области с гомеотропной ориентацией, размер которой зависит от концентрации допанта – по мере его увеличения относительный размер гомеотропной области уменьшается. Определен характер зависимости величины гомеотропной области от вариации шага спирали НХЖК (рис. 5).

Из зависимости профиля оптического пропускания рассчитано распределение фазовой задержки δ вдоль диаметра капли. Получены зависимости

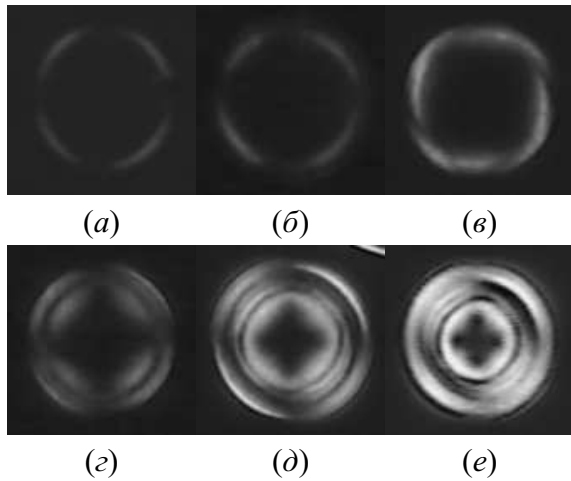


Рис. 4. Последовательность структур НХЖК-капель при различных концентрациях холестерического допанта, которые соответствуют следующим значениям шага спирали: (а) чистый нематик с $P_{MBBA} = \infty$; (б) $P_{0.05\%} = 238$ мкм; (в) $P_{0.11\%} = 108$ мкм; (г) $P_{0.165\%} = 72$ мкм; (д) $P_{0.22\%} = 54$ мкм; (е) $P_{0.33\%} = 36$ мкм. Николи скрещены.

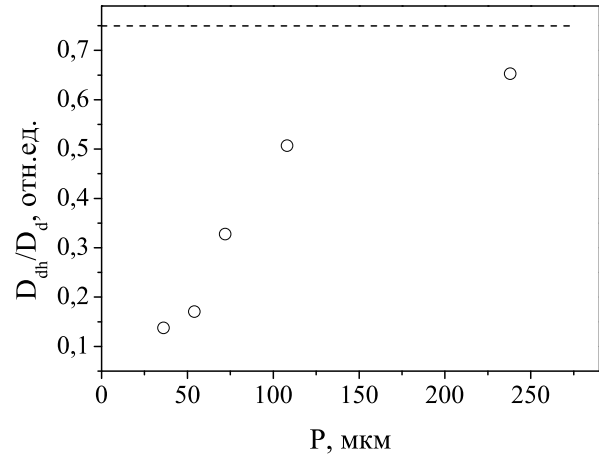


Рис. 5. Зависимость относительной величины D_{dh}/D_d – диаметра гомеотропного ядра к диаметру капли от величины равновесного шага спирали P ; пунктиром обозначен холестерик с бесконечным шагом спирали, т.е. нематик (МББА).

среднего квадрата синуса угла отклонения θ директора от нормали вдоль радиуса капли. При различных текущих координатах η , как параметра, получена зависимость $\langle \sin^2 \theta \rangle$ от концентрации холестерика на произвольных расстояниях от центра капли. Показано, что с увеличением концентрации в выбранных точках пространства капли среднее отклонение директора по вертикали растет, причем рост инициируется границей мезофаза – изотропная фаза.

Выявлен характер влияния граничных эффектов на ориентацию в объеме капли. Для этого построены зависимости размера гомеотропного ядра капли D_{dh} в виде функции размера капель D_d для различных концентраций холестерика. Анализ этих зависимостей показывает, что диаметр D_{dh} линейно зависит от размера капель D_d , а нормированная величина $D_{dh}/D_d = \text{tg}(\varphi)$ является постоянной и не зависит от размера капли. Последнее позволяет сделать вывод о том, что имеет место влияние не только границы, что является несомненным, но и наличие пространственно корреляционных длин характерных возмущений, определяемых величиной хиральной добавки [26]. Построена фазовая диаграмма области существования капель с переменным размером гомеотропного ядра в зависимости от концентрации допанта (рис. 6).

В разделе 4.4, на примере НХЖК-капель с шагом спирали $P_{0.11\%} = 108$ мкм представлены результаты исследования ориентационных превращений капель нематохолестерика, индуцированные электрическим полем. Проведен анализ последовательности текстур НХЖК-капель, наблюдаемых при увеличении приложенного электрического напряжения. На рис. 7 показано, что наличие гомео-

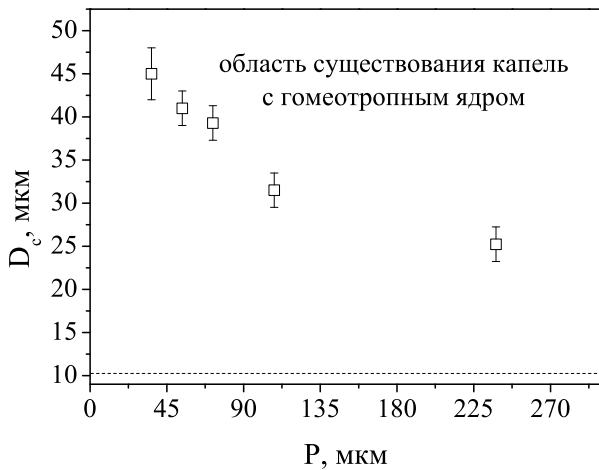


Рис. 6. Фазовая диаграмма, показывающая возможную область существования капель с гомеотропным ядром.

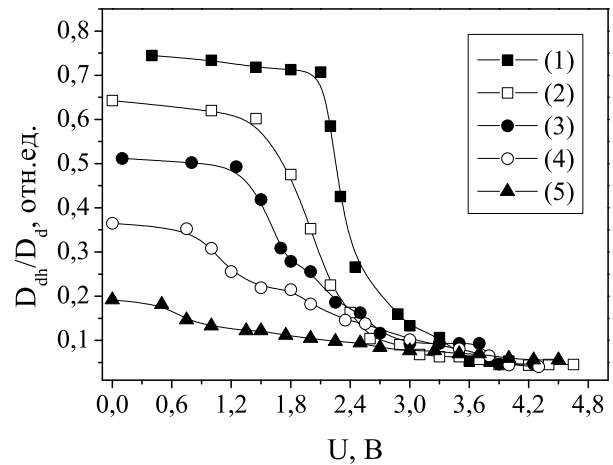


Рис. 7. Зависимости D_{dh}/D_d от приложенного напряжения для различных концентраций C холестерического допанта с соответствующими P : (1) $P_{MBVA} = \infty$ мкм; (2) $P_{0.05\%} = 238$ мкм; (3) $P_{0.11\%} = 108$ мкм; (4) $P_{0.165\%} = 72$ мкм; (5) $P_{0.22\%} = 54$ мкм.

тропного ядра в каплях с не нулевым содержанием холестерического допанта приводит к беспороговому переходу Фредерикса.

Рассмотрена эволюция ориентационной деформации директора вдоль радиуса капли с увеличением приложенного напряжения. Для этого получено распределение фазовой задержки δ вдоль диаметра, проходящего посередине между двумя изогирами, и вычислено распределение $\langle \sin^2 \theta \rangle$, усредненного по координате z .

Таким образом, в данном разделе показано, что наличие малых концентраций холестерического допанта приводит к исчезновению порога Фредерикса и возникает ситуация, когда каждому напряжению соответствует своя равновесная область деформации, локализованная в окрестности границы капли при сохранении гомеотропного ядра, размер которого сублимируется с увеличением напряжения. Делается вывод об эквивалентности действия электрического поля и холестерических добавок для случая капель с начальной гомеотропной ориентацией молекул и граничными условиями, когда ЖК область контактирует с твердыми границами.

В **пятой главе** представлены результаты изучения нестационарных ориентационных процессов, развивающихся при воздействии приложенного напряжения выше порога динамической неустойчивости.

В разделе 5.1 приведена классификация этих структур в зависимости от размера капель и концентрации холестерического допанта.

а) Капли с шагом спирали $240 \geq P \geq 72$ мкм и диаметром $D \leq 50$ мкм.

Для данного соотношения шага спирали к размеру капли обнаружены несколько типов динамического поведения зависящих от исходного строе-

ния капель. Первый тип капель с диаметром меньше 50 мкм характеризуется

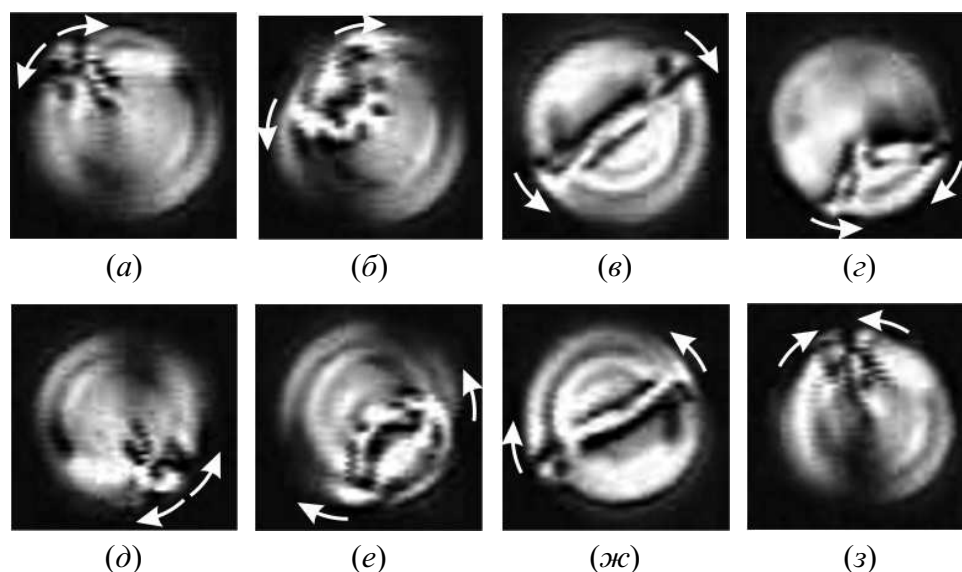


Рис. 8. Динамика дисклинационной линии в последовательные моменты времени для капли с $D = 46$ мкм и $P_{0,05\%} = 238$ мкм.

периодическим процессом рождения и “схлопывания” структурных стенок, представляющих с собой границу между областями с различной ориентацией директора (рис.8).

Показано, что основной механизм данного процесса обусловлен появлением электроконвективных вихрей (ЭГД неустойчивость). Динамика структурных превращений при этом зависит от соотношения размеров конвективных валов и радиуса капли. Для этого случая получены зависимости циклической частоты ω периодического процесса от амплитуды и частоты приложенного напряжения.

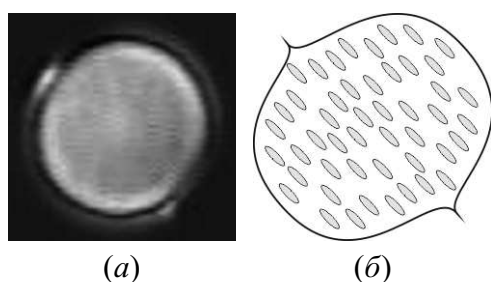


Рис. 9. Изображение капли с дефектами в виде “клювиков” в электрическом поле $D_d = 42$ мкм (а); распределение поля директора биполярной капли (б).

Здесь же наблюдается еще один тип вращающихся капель (рис. 9, а), особенностью которых является однородное распределение поля директора в капле (рис. 9, б). Для этих капель получена зависимость пороговых напряжений инициации процесса вращения от концентрации холестерического допанта, а также зависимость циклической скорости вращения ω от приложенного напряжения U . Установлено, что эта зависимость является линейной.

б) Капли с шагом спирали $240 \geq P \geq 72$ мкм и диаметром $D > 50$ мкм.

Структура таких капель определяется наличием центрального линейного дефекта (рис. 10, а), на котором изображена капля со скрученным “мальтийским крестом” отражающим, либо закрученность поля директора, либо ре-

гулярный поворот директора по азимутальному углу φ вдоль радиуса капли. При дальнейшем увеличении приложенного напряжения $U \sim 6 \div 7$ В ориентационное поле в капле теряет устойчивость, что выражается периодическим просветлением и затемнением изогир. На рис. 10, б показано состояние капли

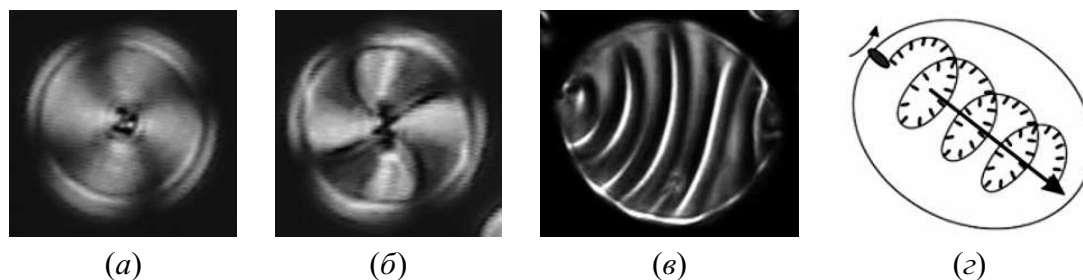


Рис. 10. Изображения НХЖК-капель для смеси с шагом $P_{0.165\%} = 72$ мкм, где: (а) капля с центральным линейным дефектом; (б) структура капли в виде “мальтийского креста”; (в) аналогичная капля, но с осью лежащей в плоскости образца ($D_d = 121$ мкм); (г) схема генерации спиральных волн.

в одном из моментов времени. Для понимания динамики “вращения” в каплях в этом случае детально изучена динамика ориентационных процессов в “опрокинутых” каплях большего размера, когда ось капли не перпендикулярна плоскости образца (рис. 10, б), а лежит в плоскости слоя, как показано на рис. 10, в. Установлено, что периодические осцилляции просветления связаны с вращением центрального дефекта (рис. 10, г), который генерирует ориентационные спиральные волны вдоль направления совпадающего с осью капли.

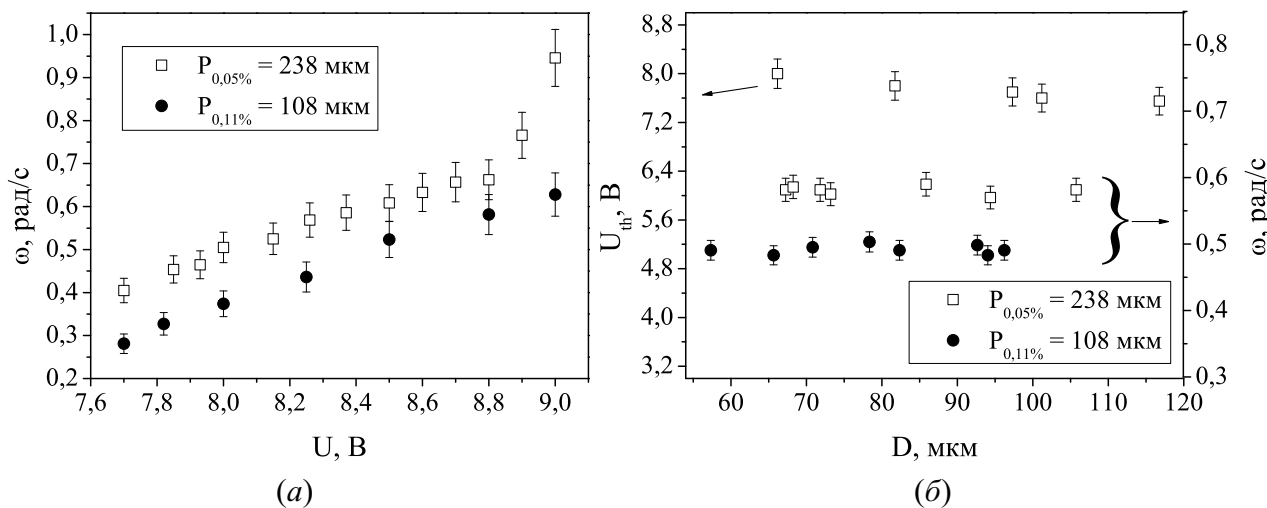


Рис. 11. Зависимость скорости вращения креста от приложенного напряжения при $f = 50$ Гц (а); зависимость порогового напряжения U_{th} и частоты вращения ω от диаметра капли D (для $U = 8.5$ В, $f = 50$ Гц) (б) и двух концентраций холестерического допанта.

Для установления механизма данного процесса получены зависимости частоты вращения ω от приложенного напряжения U (рис. 11, а), а также геометрического фактора (размера капли D) и равновесного шага спирали P

(рис. 11, б). Выявлен характер зависимости порогового напряжения U_{th} от диаметра каплей D (рис. 11, б). Показано, что данная неустойчивость обусловлена электроконвективным механизмом.

в) Капли с шагом спирали $72 \leq P \leq 54$ мкм и диаметром $D > 50$ мкм.

В данном диапазоне шага спирали обнаружены вращающиеся капли с одним разрушенным буджомом [27]. При уменьшении шага спирали до $P_{0.22\%} = 54$ мкм в капле такого же размера динамика вращения дисклинационной линии трансформируется в процесс периодического распада буджума на два поверхностных дефекта (рис. 12). Определены зависимости периода полного цикла

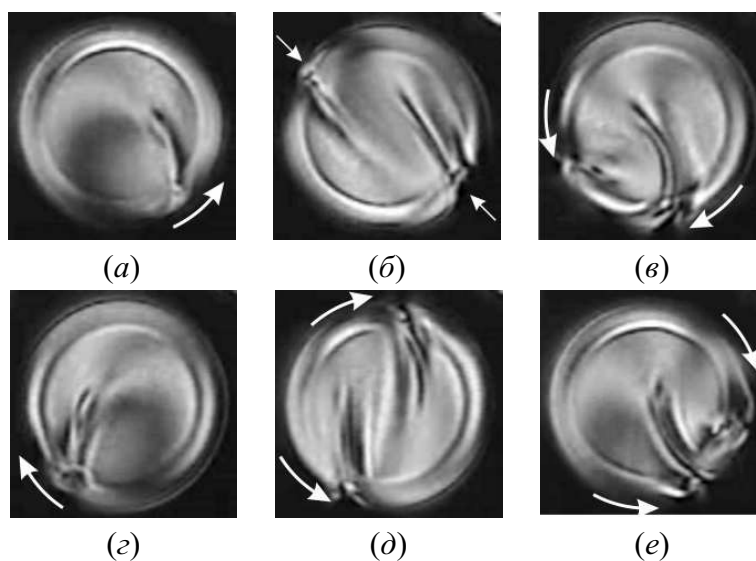


Рис. 12. Изображения циклического движения НХЖК-капель при напряжении $U = 5.5$ В.

движения дисклинационной линии от величины приложенного напряжения и линейные скорости движения с учетом диаметра каплей. Путем анализа этих зависимостей показано, что инициирующим механизмом данного процесса является электроконвекция.

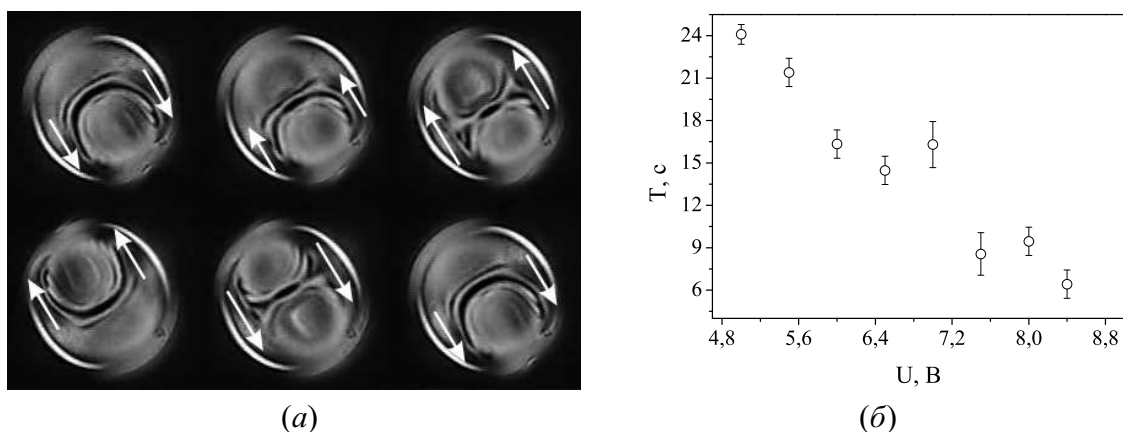


Рис. 13. Последовательность фаз осцилляций центрального дефекта (линии) для НХЖК с шагом $P_{0.475\%} = 25$ мкм, при частоте приложенного напряжения $f = 1$ кГц и диаметра капли $D_d = 116$ мкм (стрелками показано направление движения) (а); график зависимости времени полного цикла T от приложенного напряжения U двухлучевой полиструктуры (б).

В разделе 5.2 представлены результаты исследования структурных превращений в НХЖК каплях, диаметр D которых значительно больше как толщины слоя d , так и равновесного шага спирали P .

Обнаружено, что с увеличением приложенного напряжения в слое наблюдаются различные полиструктуры с одним и более лучами в зависимости от диаметра капли. Более детально рассмотрен наиболее простой случай реализации полиструктур, двухлучевая нестационарная конфигурация типа “подковы” (рис. 13, *а*). Измерена зависимость времени полного цикла движения двухлучевой конфигурации капли от приложенного напряжения U , которая представлена на рис. 13, *б*.

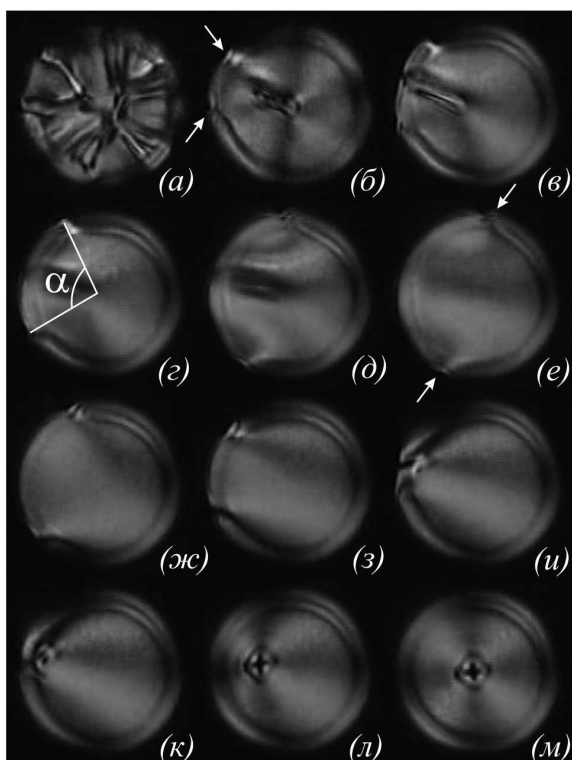


Рис. 14. Изображения последовательности промежуточных структур при скачкообразном изменении приложенного напряжения от 9.5 В до 5.5 В в разные моменты времени для капли с радиусом $R = 62$ мкм. (*а*) полиструктура, соответствующая напряжению 9.5 В; (*б*) структура капли после переключения напряжения до 5.5 В, где стрелками показано формирующиеся дефекты на границе; (*б – е*) расхождение пары дефектов (стрелками указано крайнее положение пары дефектов); (*ж – и*) слияние; (*к – м*) переход поверхностных дефектов в объем.

ра, определяемой толщиной образца.

Раздел 5.3 посвящен изучению ориентационных превращений в каплях, индуцированных переменным электрическим полем, когда равновесный шаг

Исследована также релаксация поля директора от сложных конфигураций его распределения до равновесного состояния ориентационного поля капли, представленного на рис. 14. Обнаружено, что при скачкообразном уменьшении напряжений от порога образования полиструктур (9.5 В) ниже порога ЭГД неустойчивости (5.5 В) объемный дефект, имеющий сложное строение, вытесняется на поверхность и делится на два с последующим их слиянием в один, который затем вновь переходит в объем. Показано, что времена распада $\alpha(t)$ и слияния $\beta(t)$ существенно зависят от размера каплей D и не вписываются, по порядку величины, в обычную схему процесса ориентационной релаксации поля директора, время которой составляет порядка $\tau \approx 1$ с. При этом переход объемного дефекта в центр достаточно хорошо согласуется с представлениями об ориентационной релаксации поля директора,

спирали $P < R$ радиуса капли.

Обнаружено, что при приложенном переменном напряжении образуются спиральные структуры как левоспиральные, так и правоспиральные (рис. 15), причем этот процесс является периодическим. Показано, что образование ле-

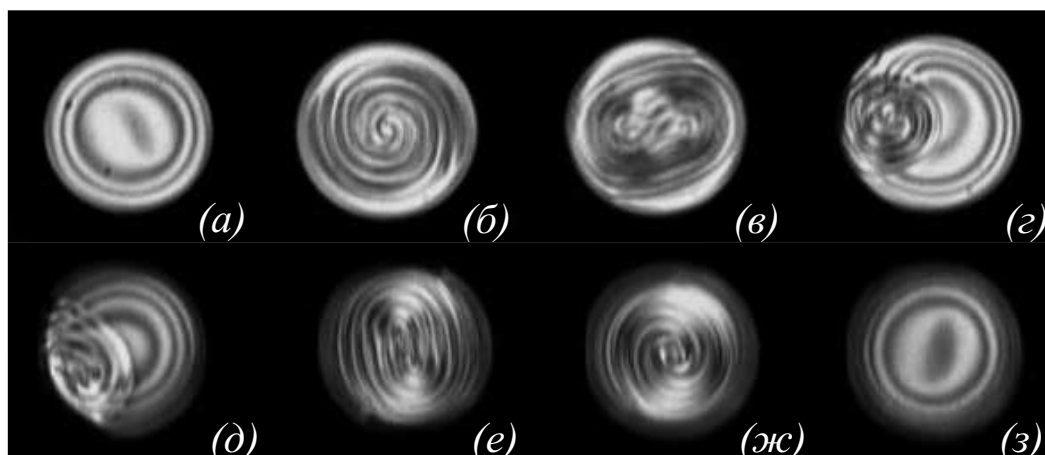


Рис. 15. Динамика текстур капель НХЖК с левой (а–z), где диаметр капли – $D_{Lh} = 86$ мкм, и правой (d–z) закруткой двухзаходных спиралей, с диаметром – $D_{Rh} = 81$ мкм, от зарождения до аннигиляции поверхностных дефектов, где $P_{2,8\%} = 4$ мкм.

воспиральных структур связано с наличием в каплях надмолекулярной левоспиральной структуры и при распространении деформации по оси OZ ведет к левому вращению. В случае правовращающейся спирали следует подчеркнуть, что явная симметрия причин (симметрия НХЖК и поля) не влечет за собой однозначно симметрию вызываемых ими действий, то есть симметрия НХЖК $\infty/2$, переменного электрического поля $m \cdot \infty/m$, а симметрия спиральных структур $2/m$.

Причины образования левовинтовых и правовинтовых спиральных структур объяснены с точки зрения феноменологической теории возникновения конической деформации НХЖК в электрических полях [28]. Рассмотрены основные динамические характеристики описанных процессов в зависимости от величины приложенного напряжения. Приведены характерные зависимости частот вращения левых и правых спиралей, скорости сближения дефектов на поверхности капли, зависимости полного периода превращений спиральной структуры от зарождения до аннигиляции. Обсуждается возможный механизм образования такого типа неустойчивости.

Электрооптика НХЖК-капель в постоянном электрическом поле исследована в разделе 5.4. Обнаружено, что имеет место эффект вращения НХЖК-капель с шагом спирали $P \lesssim R$ при приложенном постоянном напряжении U . На рис. 16 изображена последовательность фаз вращения спирали в капле.

В основе механизма наблюдаемого эффекта лежит ЭГД-эффект, который возникает по причине присутствия в объеме капли заряженных примесей и сильного искривления ориентационного поля, особенно вблизи дефектов.

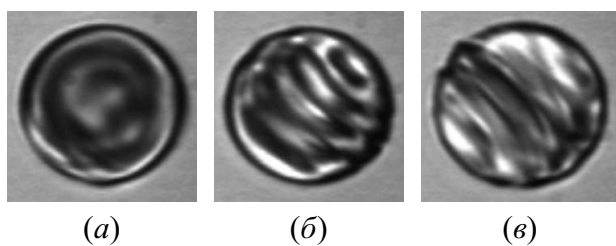


Рис. 16. Изображения капли в изотропном окружении и ее внутренней структуры в последовательные моменты времени: когда ось спирали перпендикулярна плоскости рисунка и электрическому полю соответственно – (а); под 45° к электрическому полю – (б); когда ось спирали лежит в плоскости образца – (в).

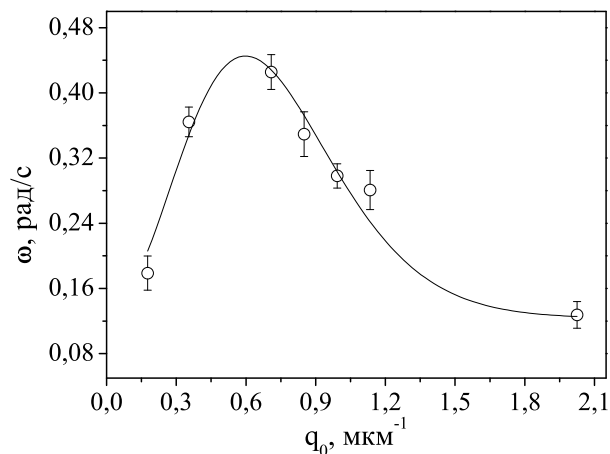


Рис. 17. Зависимость скорости вращения капли ω от волнового вектора $q_0 = 2\pi/P_0$ – невозмущенной спиральной структуры капли.

Установлено, что скорость вращения существенно зависит от приложенного напряжения U и волнового вектора q закрученности капли (рис. 17), которая также указывает на ЭГД-природу вращения капель.

Основные результаты и выводы

1. Экспериментально изучен ориентационный переход гомеотроп-ТИК, индуцируемый внешним электрическим полем в слое нематохолестерика со слабыми граничными условиями. Получено выражение, определяющее зависимость порогового напряжения для перехода гомеотропная ориентация – ТИК от энергии сцепления, толщины слоя жидкого кристалла и материальных параметров НХЖК. Показано, что измерение равновесного шага спирали нематохолестерика по пороговым напряжениям перехода гомеотроп-ТИК является адекватным только для предельного случая сильной энергии сцепления.
2. Обнаружено, что для капель с большим шагом спирали ($P \gg R$) в зависимости от приложенного напряжения происходят изменения граничных условий, приводящие к трансформации ориентационного порядка. Показано, что при увеличении напряжения имеет место ориентационно-структурное превращение от аксиальной текстуры к биполярной конфигурации. Проведен сравнительный анализ ориентационных структур с существующими в чисто нематических каплях.
3. Обнаружено, что с увеличением концентрации холестерической добавки в нематохолестерических каплях с гомеотропной начальной ориентацией имеет место беспороговый ориентационный переход, индуцируемый этой добавкой. При этом область деформационного поля растет от гра-

ницы ЖК-изотропная фаза с уменьшением гомеотропного ядра вплоть до его сублимации при критическом значении $P \approx R$. Построена фазовая диаграмма существования капель НХЖК с гомеотропным ядром.

4. Установлено, что наличие условия $P \gg R$ приводит к исчезновению порога Фредерикса в электрическом поле и появлению ситуации, когда каждому напряжению соответствует своя равновесная область деформации, локализованная в окрестности границы капли при сохранении гомеотропного ядра, размер которого сублимируется с увеличением приложенного напряжения. Последнее позволяет сделать вывод об эквивалентности действия электрического поля и холестерических добавок для случая капель с начальной гомеотропной ориентацией молекул и граничными условиями, когда ЖК область контактирует с твердыми границами.
5. Исследована динамика дефектов, их взаимное превращение и аннигиляция в каплях нематохолестерической смеси, находящихся в изотропном окружении при действии квазистатических электрических полей, для случая, когда $P < R$. Показано, что имеет место ситуация, когда явная симметрия причин (НХЖК и поля) не влечет однозначно за собой соответствующую симметрию индуцируемых структур и механических процессов, то есть группа симметрии динамических спиральных структур $2/m$ не является подгруппой пересечения групп симметрии нематохолестерика $\infty/2$ и электрического поля $m \cdot \infty/m$.
6. Обнаружен эффект вращения НХЖК-капель в постоянном электрическом поле для $P \lesssim R$. Установлено, что процесс вращения холестерических капель имеет в своей основе ЭГД-эффект Карра—Хелфриха. Сложная ориентационная структура капли обуславливает нетривиальную картину течения жидкости внутри капли, которая обеспечивает появление ненулевого среднего значения азимутальной скорости потока.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] *Тимиров, Ю. И.* Электрооптика немато-холестерических капель в постоянном электрическом поле / Ю. И. Тимиров, О. С. Тарасов, О. А. Скалдин // *Письма в ЖТФ.* — 2007. — Т. 33. — С. 55–61.
- [2] *Делев, В. А.* Эффект пространственно-временной синхронизации доменных осцилляций в системе электроконвекции нематических жидких кристаллов / В. А. Делев, О. А. Скалдин, Ю. И. Тимиров // *Письма в ЖТФ.* — 2009. — Т. 35. — С. 49–57.

- [3] *Скалдин, О. А.* О возможности нарушения принципа Кюри-Неймана в анизотропных средах с диссимметрией / О. А. Скалдин, Ю. И. Тимиров // *Письма в ЖЭТФ*. — 2009. — Т. 90. — С. 699–703.
- [4] *Скалдин, О. А.* О влиянии энергии сцепления на определение шага спирали / О. А. Скалдин, Ю. И. Тимиров, Ю. А. Лебедев // *Письма в ЖТФ*. — 2010. — Т. 36. — С. 23–30.
- [5] *Тимиров, Ю. И.* Динамика надмолекулярного порядка в нематохолестерических каплях в электрическом поле / Ю. И. Тимиров, Н. Г. Мигранов, О. А. Скалдин // *Сборник статей XII Всероссийской конференции*. — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. — С. 237–239.
- [6] *Тимиров, Ю. И.* Периодические преобразования дефектов в каплях нематохолестерического жидкого кристалла в электрических полях / Ю. И. Тимиров, А. Н. Чувывров, О. А. Скалдин // *Сборник статей XV Всероссийской конференции*. — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. — С. 105–109.
- [7] Генерация и распад дефектов в нематохолестерических каплях в электрическом поле / Ю. И. Тимиров, А. Н. Чувывров, О. А. Скалдин и др. // *Труды Первого междунар. междисциплинар. симпозиума, Ростов-на-Дону, 2008*. — Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. — С. 304–307.
- [8] *Гареева, Е. Р.* Структура капель с большим шагом спирали / Е. Р. Гареева, Ю. И. Тимиров, О. А. Скалдин // *Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»*: Сб. трудов. — Уфа: РИО БашГУ, 2011. — С. 36–41.
- [9] *Тимиров, Ю. И.* Индуцируемые электрическим полем структурные превращения в каплях нхжк с малой концентрацией холестерика / Ю. И. Тимиров, О. А. Скалдин // *Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 5*. — Уфа: УГАТУ, 2011. — С. 288.
- [10] *Тимиров, Ю. И.* Индуцируемые электрическим полем структурные превращения в каплях нхжк с большой концентрацией холестерического допанта / Ю. И. Тимиров, О. А. Скалдин // *Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 5*. — Уфа: УГАТУ, 2011. — С. 289.
- [11] *Тимиров, Ю. И.* Электрооптика хиральных капель в постоянном электрическом поле / Ю. И. Тимиров, Н. Г. Мигранов, О. А. Скалдин // *Междунар.*

уфимская зимняя школа-конф. по матем. и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых: Тезисы докладов. — Уфа: РИО БашГУ, 2005. — С. 146.

- [12] *Тимиров, Ю. И.* Ориентационные превращения в нематохолестерических каплях индуцируемые электрическими полями / Ю. И. Тимиров, Н. Г. Мигранов, О. А. Скалдин // Сборник тезисов докладов и сообщений на XIV Всероссийской конференции. — Казань: КГУ, 2007. — С. 232.
- [13] *Тимиров, Ю. И.* Периодические преобразования дефектов и их аннигиляция в каплях нематохолестерического жидкого кристалла в электрических полях / Ю. И. Тимиров // Сборник тезисов, материалы 14 Всеросс. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых. — Уфа: АСФ, 2008. — С. 151.
- [14] *Тимиров, Ю. И.* Вейвлет анализ структурных дефектов в системе электроконвекции закрученных нематиков / Ю. И. Тимиров, В. А. Делев // Сборник тезисов, материалы 14 Всеросс. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых. — Уфа: АСФ, 2008. — С. 151.
- [15] *Timirov, Y. I.* Periodical transformations of defects and their annihilation in droplets of chiral nematic liquid crystal in electric fields / Y. I. Timirov, A. N. Chuvyrov, O. A. Scaldin // Abs. of The 22 International conference on liquid crystals, Jeju, Korea. — 2008. — P. 1015.
- [16] Индуцируемые электрическим полем структурные превращения в каплях нхжк с большой концентрацией холестерического допанта / Ю. И. Тимиров, В. А. Делев, Ю. А. Лебедев, О. А. Скалдин // Материалы VII Международной научной конференции. — Иваново: ИвГУ, 2009. — С. 155.
- [17] *Делев, В. А.* Синхронизация доменных автоосцилляторов при электроконвекции в нжк / В. А. Делев, Ю. И. Тимиров, О. А. Скалдин // Материалы VII Международной научной конференции. — Иваново: ИвГУ, 2009. — С. 117.
- [18] *Тимиров, Ю. И.* Ориентационное вращение нематохолестерических капель в постоянном электрическом поле / Ю. И. Тимиров, Н. Г. Мигранов, О. А. Скалдин // Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых: Тезисы докладов. — Уфа: Рио БашГУ, 2009. — С. 148.
- [19] *Тимиров, Ю. И.* Неустойчивости и структурные превращения, индуцируемые электрическим полем, в каплях нематохолестерика / Ю. И. Тимиров, О. А. Скалдин // Сборник тезисов докладов и сообщений на XVII Всерос. Конф. — Уфа: ИФМК УНЦ РАН, 2010. — С. 195.

- [20] *Timirov, Y. I.* Director dynamics in nematic-cholesteric droplets in ac electric field / Y. I. Timirov, O. A. Scaldin // Abs. of The 14th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals. — Yerevan: YSU, 2011. — P. 47.

Цитированная литература

- [21] Vanishing freedericksz transition threshold voltage in a chiral nematic liquid crystal / K. A. Crandall, M. R. Fisch, R. G. Petschek, C. Rosenblatt // *Appl. Phys. Lett.* — 1994. — Vol. 64. — P. 1741–1743.
- [22] Electric-field-induced nematic-cholesteric transition and three-dimensional director structures in homeotropic cells / I. I. Smalyukh, B. I. Senyuk, P. Palffy-Muhoray et al. // *Phys. Rev. E.* — 2005. — Vol. 72. — P. 061707.
- [23] *Захлевных, А. Н.* О переходе холестерик–нематик в пленках при наличии вырождения оси легкого ориентирования / А. Н. Захлевных, В. С. Шавкунов // *Вестник ПГУ. Сер. Физика.* — 2000. — Т. 6. — С. 50–58.
- [24] *de Жен, П. Ж.* Физика жидких кристаллов / П. Ж. де Жен. — М.: Мир, 1977. — С. 400.
- [25] *Сутормин, В. С.* Температурно индуцированные изменения конфигурации директора в каплях нематика, диспергированного в поливинилпирролидоне / В. С. Сутормин, М. Н. Крахалев, О. О. Прищепа // *Журнал СФУ. Математика и физика.* — 2009. — Т. 2. — С. 352–359.
- [26] *Беляков, В. А.* Оптика холестерических жидких кристаллов / В. А. Беляков, А. С. Сонин. — М.: Наука, 1982. — С. 360.
- [27] *Воловик, Г. Е.* Топологическая динамика дефектов: буджумы в каплях нематика / Г. Е. Воловик, О. Д. Лаврентович // *ЖЭТФ.* — 1983. — Т. 85, № 6. — С. 1997–2010.
- [28] *Leslie, F. M.* Some thermal effects in cholesteric liquid crystals / F. M. Leslie // *Proc. Roy. Soc. A.* — 1968. — Vol. 307, no. 1490. — P. 359–372.