

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УФИМСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МОЛЕКУЛ И КРИСТАЛЛОВ

На правах рукописи

НАСИБУЛЛАЕВ ИЛЬДАР ШАМИЛЕВИЧ

**ОРИЕНТАЦИОННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ В ПОТОКЕ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа – 2004

Работа выполнена в лаборатории физики твердого тела Института физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико–математических наук, с.н.с.
Крехов Алексей Петрович (ИФМК УНЦ РАН,
г. Уфа)

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук, профессор
Захлевных Александр Николаевич (ПГУ, г. Пермь)
доктор физико–математических наук,
Чувывров Александр Николаевич (БашГУ, г. Уфа)

Ведущая организация: Институт механики сплошных сред
УрО РАН, г. Пермь

Защита состоится "30" ноября 2004 г. в 14⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 002.099.01 в Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН по адресу: 450075, г. Уфа, пр. Октября, 151; факс (3472) 31-35-38.

Отзывы направлять по адресу: 450075, г. Уфа, пр. Октября, 151, ИФМК УНЦ РАН, диссертационный совет Д 002.099.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИФМК УНЦ РАН.

Автореферат разослан " " 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.099.01,
кандидат физико–математических наук

Г.С. Ломакин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой вещества, которые при определенных внешних условиях обладают свойствами изотропной жидкости (текучесть) и, в то же время, демонстрируют анизотропию ряда физических свойств (упругость, двулучепреломление, диэлектрическая проницаемость), как твердые кристаллы. Молекулы ЖК имеют, как правило, стержнеобразную форму, длинные оси которых ориентируются вдоль некоторого направления (характеризуемого единичным вектором, называемым директором). Нематические жидкие кристаллы (НЖК, нематики) с точки зрения структуры представляют собой простейший пример анизотропной жидкости, характеризующейся наличием ориентационной степени свободы и отсутствием дальнего порядка в расположении центров масс молекул.

Актуальность темы. Особый интерес к исследованиям жидких кристаллов обусловлен высокой чувствительностью ориентации молекул ЖК к внешним воздействиям (электрическое и магнитное поле, гидродинамический поток, ограничивающая ЖК твердая поверхность). Так, например, в стационарном сдвиговом потоке в слое НЖК с начальной ориентацией директора перпендикулярно плоскости потока выше некоторой критической скорости течения образуются пространственно-периодические в направлении перпендикулярном потоку деформации директора и связанная с ними структура конвективных вихрей (конвективные роллы). Эти структуры относятся к диссипативным системам, существующим за счет притока энергии извне. Образование такого рода структур в НЖК напрямую зависит от начальной ориентации директора на ограничивающей подложке, типа НЖК и характера взаимодействия нематика с поверхностью. Изучение диссипативных структур в нематиках под действием гидродинамических потоков было начато еще в 60-х годах, однако, до сих пор не было проведено систематического исследования всех возможных механизмов образования этих структур. Например, остается открытым вопрос о влиянии внешнего электрического поля на порог неустойчивости в осциллирующем пуазейлевском потоке НЖК с начальной гомеотропной (перпендикулярной ограничивающей поверхности) ориентацией директора.

Фундаментальный аспект исследований структурообразования в анизотропных жидкостях позволяет использовать НЖК, для которого существует уже устоявшееся и хорошо согласующееся с экспериментом математическое описание, в качестве модельной системы для более глубокого понимания механизмов образования диссипативных структур и предсказания особенностей поведения и физических свойств более сложных комплексных жидкостей (жидко-кристаллические полимеры, расплавы со-полимеров).

До недавнего времени подавляющее большинство теоретических работ, посвященных анализу ориентационной динамики и неустойчивостям в НЖК, имело дело с приближением так называемого жесткого сцепления (фиксированная ориентация молекул НЖК на поверхности). Немногочисленные теоретические исследования проводились лишь для анализа пространственно-периодических неустойчивостей в осциллирующем сдвиговом потоке НЖК и однородных неустойчивостей в стационарном потоке НЖК при начальной ориентации директора перпендикулярно плоскости потока. Вопрос о влиянии характера сцепления на ориентационную динамику и неустойчивости в НЖК до сих пор систематически не анализировался. В то же время, в последнее десятилетие появились возможности изготовления подложек с контролируемой силой поверхностного сцепления (например, облучением УФ-светом подложек покрытых слоем фото-ориентируемого вещества), что открывает новые перспективы практического использования ЖК. Несмотря на ряд имеющихся работ (теоретических и экспериментальных) по исследованию влияния характера сцепления на ориентационную динамику НЖК, полученные результаты противоречивы и требуют проведения дальнейших исследований. Необходима разработка новых экспериментальных методик по определению характеристик взаимодействия молекул НЖК с подложкой (сила сцепления, поверхностная вязкость) и связанных с ними теоретических моделей, адекватно описывающих влияние этого взаимодействия на ориентационную динамику директора.

Анализ влияния характера взаимодействия НЖК с ограничивающей поверхностью на ориентационные неустойчивости в потоке НЖК необходим для предсказания возможного появления новых типов структур. Эти исследования расширяют понимание механизмов, приводящих к образованию дис-

сипативных структур, а так же позволяют развивать новые методы для экспериментального измерения характеристик системы НЖК-подложка.

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование влияния характера сцепления молекул нематического жидкого кристалла с ограничивающей поверхностью на ориентационную динамику и структурно-ориентационные переходы в НЖК под действием стационарного и осциллирующего потоков и внешних электрического и магнитного полей.

Методы исследований. Численные и приближенные аналитические расчеты проводились с использованием метода Галеркина. Пороги образования неустойчивостей рассчитывались в рамках линейного анализа устойчивости.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием обоснованных законами сохранения уравнений динамики НЖК, корректностью математической постановки задач, согласованием с известными экспериментальными и теоретическими результатами и проведением сравнительных тестовых расчетов различными методами.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Аналитически решена задача о влиянии характера сцепления молекул НЖК с ограничивающей поверхностью на ориентационную динамику в нематических жидких кристаллах с ориентацией директора в плоскости потока. Проанализированы три типа течения: стационарное (сдвиговое и пуазейлевское), экспоненциально затухающее пуазейлевское и осциллирующее (сдвиговое и пуазейлевское). В режиме линейного отклика получены выражения для распределения директора и скорости в слое нематического жидкого кристалла.

2. Найдена область частот осциллирующего потока нематического жидкого кристалла, в которой ориентационная динамика директора преимущественно определяется силой сцепления и поверхностной вязкостью. На основе полученных результатов предложен экспериментальный метод, позволяющий определить величину поверхностной вязкости.

3. Исследовано влияние поверхностного сцепления на структурно-ориентационные переходы в нематическом жидком кристалле при комбинированном воздействии стационарного потока (сдвигового и пуазейлевско-

го) и внешнего поля (электрического и магнитного) для случая начальной ориентации директора перпендикулярно плоскости потока. Показано, что возможны переходы с образованием двух типов структур — однородная и пространственно-периодическая деформация нематического жидкого кристалла в направлении перпендикулярном плоскости потока. Рассчитаны все возможные переходы от одного типа структуры к другому в зависимости от величины сил сцепления и внешнего поля. Получены приближенные аналитические выражения для критической амплитуды потока для всех возможных типов неустойчивостей. На основе полученных результатов предложен экспериментальный метод определения двух компонент силы сцепления в рамках одного эксперимента.

4. Исследована ориентационная неустойчивость в слое нематического жидкого кристалла с жесткими гомеотропными граничными условиями, сопровождающаяся выходом директора из плоскости потока, при комбинированном воздействии осциллирующего пуазейлевского потока и внешнего электрического поля. Получены приближенные аналитические выражения для критической амплитуды потока в предельных случаях низких и высоких частот потока, а также проведен численный расчет зависимости пороговой амплитуды от частоты потока и величины внешнего электрического поля.

Научное и практическое значение работы. Теоретически исследована допороговая ориентационная динамика нематического жидкого кристалла в потоке с учетом характера сцепления молекул НЖК с ограничивающей поверхностью, найдены пороговые значения амплитуд потока, при которых происходят однородные и пространственно-периодические структурно-ориентационные переходы. Всесторонне изучено влияние граничных условий и внешних полей на величину порога и тип образующихся структур в НЖК в потоке. Сделан ряд предсказаний относительно особенностей динамики и смены типов неустойчивостей в НЖК в потоке, которые не стали еще предметом систематического экспериментального исследования. На основе проведенных теоретических исследований предложены новые экспериментальные методы для определения ряда параметров, характеризующих взаимодействие НЖК с подложкой (компоненты силы поверхностного сцепления, поверхностная вязкость). Полученные в работе результаты могут быть использованы для

дальнейшего развития теории структурообразования в нематических жидких кристаллах и описания процессов, происходящих на границе раздела НЖК-подложка, а также при разработке различных устройств на основе жидких кристаллов (датчики давления, акустооптические преобразователи, модуляторы света).

Защищаемые положения:

1. Существует частотный диапазон осциллирующего сдвигового и пуазейлевского потоков, в котором ориентационная динамика НЖК (в режиме линейного отклика) преимущественно определяется величиной поверхностной вязкости.

2. Тип (однородные или пространственно-периодические) и симметрия структурно-ориентационных переходов в НЖК под действием стационарного потока контролируются значениями полярной и азимутальной сил сцепления.

3. Критический градиент давления, соответствующий выходу директора из плоскости осциллирующего пуазейлевского потока, при приложении к слою НЖК внешнего электрического поля либо уменьшается, либо увеличивается, в зависимости от знака анизотропии диэлектрической проницаемости НЖК, однако, характер неустойчивости (прямая бифуркация) при этом не меняется.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Международные конференции по жидким кристаллам (Сендай, Япония, 2000; Эдинбург, Великобритания, 2002; Любляна, Словения, 2004), Европейские конференции по жидким кристаллам (Херсониссос, Греция, 1999; Галле, Германия, 2001; Хаке, Испания, 2003), 8^й Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001), Всероссийские конференции «Структура и динамика молекулярных систем» (Яльчик, 1999 – 2003), Международная зимняя школа по теоретической физике «Коуровка – 2002» (Кунгур, 2002).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 18 работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, приложения и списка литературы из 121 наименования. Работа изложена на 133 страницах и содержит 27 иллюстраций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна полученных результатов, обосновано научное и практическое значение работы, изложены защищаемые положения, а также кратко изложена структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ, связанных с изучением динамики ориентационного упорядочения и структурных переходов в нематических жидких кристаллах в потоке. Приведены уравнения динамики нематического жидкого кристалла (уравнения нематодинамики Эриксона-Лесли) и способы описания характера поверхностного упорядочения на границе НЖК-подложка в рамках феноменологического подхода. Рассмотрены механизмы, приводящие к неустойчивостям в нематическом жидком кристалле под действием потока. Показано, что большинство работ было посвящено анализу случая так называемого жесткого сцепления (фиксированная ориентация директора на ограничивающих слой НЖК поверхностях) и систематического теоретического исследования влияния поверхностного сцепления на ориентационное поведение и неустойчивости в потоке НЖК до сих пор проведено не было. Описаны ориентационные эффекты в НЖК, обусловленные характером поверхностного упорядочения и процессами диссипации на границе НЖК-подложка. Обозначен круг задач и проблем, требующих решения.

Во второй главе представлены результаты теоретического исследования допороговой динамики (режим линейного отклика) нематического жидкого кристалла с начальной ориентацией директора, лежащей в плоскости потока. Проанализированы случаи стационарного, осциллирующего и затухающего потоков с учетом конечной энергии сцепления молекул нематического жидкого кристалла с ограничивающей поверхностью, поверхностной вязкости и внешнего электрического поля. Приведены выражения для распределения скорости и директора и результаты расчета оптического отклика слоя НЖК в потоке. Для осциллирующего сдвигового и пуазейлевского потоков найдены области частот, в которых динамика нематического жидкого кристалла

в значительной степени определяется величиной поверхностной вязкости. На основе проведенных исследований предложены методы экспериментального определения величины поверхностной вязкости и силы поверхностного сцепления.

В §2.1 анализируется режим линейного отклика НЖК в стационарном сдвиговом и пуазейлевском потоках. Для случая малых отклонений директора от равновесной ориентации получены аналитические выражения для профилей директора и скорости в зависимости от характера поверхностного сцепления и величины внешнего электрического поля.

Наиболее распространенным методом экспериментального изучения ориентационной динамики НЖК является исследование интенсивности прошедшего через слой нематика поляризованного света (оптический отклик). При малых отклонениях директора от состояния равновесия ориентация директора лежит в плоскости потока. В этом случае, используя полученные выражения для профилей директора, оптический отклик вычисляется из двулучепреломления. Было обнаружено, что оптический отклик для слоя НЖК под действием стационарного сдвигового потока наиболее чувствителен к характеру сцепления молекул НЖК с ограничивающей поверхностью.

В §2.2 исследуется ориентационная динамика НЖК в осциллирующем сдвиговом и пуазейлевском потоках с учетом характера сцепления НЖК с поверхностью (силы сцепления и поверхностной вязкости). С использованием малоамплитудного разложения получены формулы для профилей директора и скорости.

На рис. 1(а), 2(а) показаны зависимости интенсивности прошедшего через слой НЖК МБА света от времени за период осцилляций потока, рассчитанные с использованием малоамплитудных решений для различных значений поверхностной вязкости $\eta_s = \gamma_1 l_{\gamma_1}$. Значение поверхностной вязкости существенно влияет как на величину максимальной интенсивности, так и на сдвиг фазы оптического отклика по отношению к колебаниям потока. Зависимости относительных максимумов интенсивности от частоты осцилляций потока приведены на рис. 1(б), 2(б) для различных l_{γ_1} . При малых частотах поток можно считать квазистационарным и, следовательно, влияние поверхностной вязкости на ориентацию директора практически отсутствует. На высо-

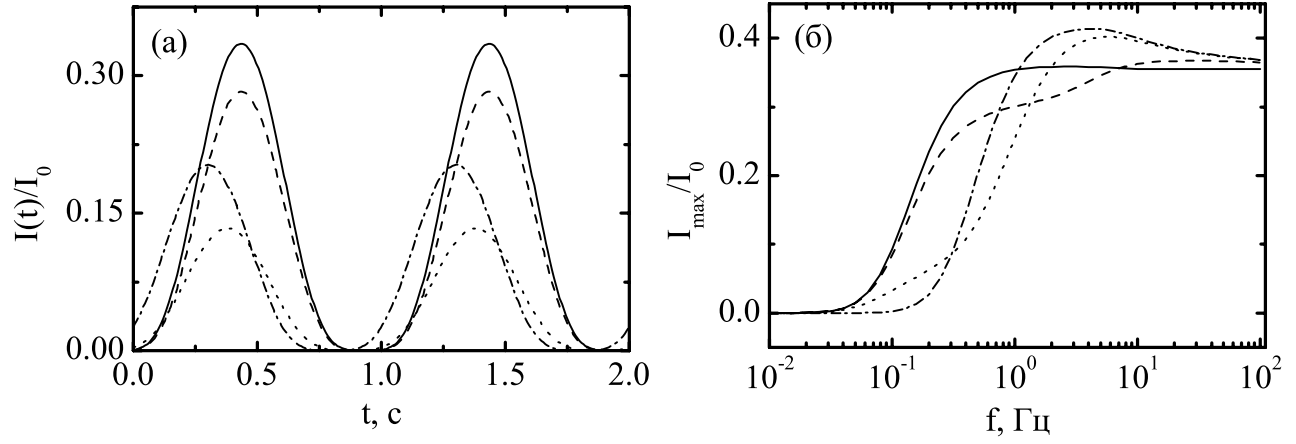


Рис. 1: Временная зависимость оптического отклика (а) и частотная зависимость максимума интенсивности (б) для осциллирующего сдвигового потока. $a = 0,2$; $f = 0,5$ Гц; $d = 20$ мкм; $W_p = 10^{-6}$ Дж/м²; $l_{\gamma 1}$ [М]: 0 (—); 10^{-6} (---); 10^{-5} (···). Жесткое сцепление (- · -).

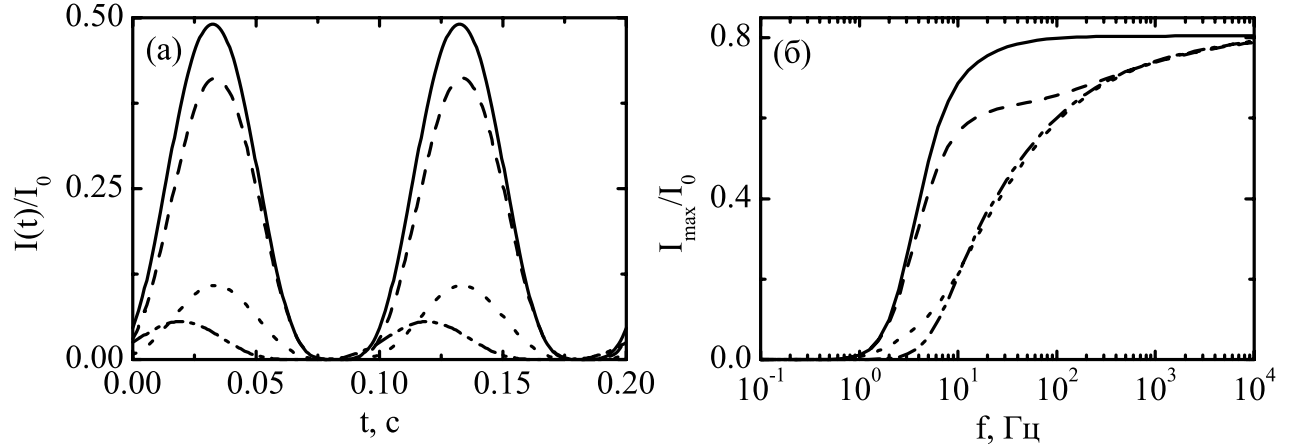


Рис. 2: Временная зависимость оптического отклика (а) и частотная зависимость максимума интенсивности (б) для осциллирующего пузырькового потока. $a = 0,2$; $f = 5$ Гц; $d = 20$ мкм; $W_p = 10^{-6}$ Дж/м²; $l_{\gamma 1}$ [М]: 0 (—); 10^{-6} (---); 10^{-5} (···). Жесткое сцепление (- · -).

ких частотах происходит уменьшение толщины пограничного слоя ($\sim \omega^{-1/2}$), увеличение эффективной поверхностной вязкости ($\sim \omega$) и ориентационное поведение нематика приближается к ситуации, соответствующей жесткому сцеплению. В области частот (при выбранных значениях силы сцепления и толщины слоя НЖК) $0,05 \div 5$ Гц для сдвигового потока и $1 \div 100$ Гц для пузырькового потока ориентационная динамика нематика преимущественно определяется поверхностной вязкостью.

В §2.3 приводятся результаты исследования ориентационной динамики НЖК в затухающем пузырьковом потоке с учетом характера сцепления

молекул НЖК с поверхностью (сила сцепления) и внешнего электрического поля. С использованием малоамплитудного разложения найдены профили директора и скорости и приближенное аналитическое выражение для оптического отклика. Полученное выражение для фазовой задержки дает хорошее количественное согласие с численным расчетом и экспериментальными данными и может быть использовано для определения эффективной вязкости однородно ориентированного нематика или силы поверхностного сцепления.

В третьей главе исследуются однородные и пространственно-периодические неустойчивости в НЖК в стационарном сдвиговом и пуазейлевском потоках при начальной ориентации директора перпендикулярно плоскости потока. Изучено влияние характера сцепления молекул НЖК с поверхностью и внешнего электрического и магнитного поля на ориентационные неустойчивости и переходы от одного типа структуры другому. Получены приближенные аналитические выражения для порога неустойчивости и проведено их сравнение с результатами численного моделирования.

В §3.1 приведены результаты линейного анализа устойчивости основного состояния по отношению к однородным в плоскости слоя НЖК возмущениям. В случае сдвигового потока получены аналитические формулы для порога неустойчивости. В пуазейлевском потоке порог неустойчивости рассчитывался численно с использованием метода Галеркина. Для обоих типов течения получены аналитические формулы для порога однородной неустойчивости с использованием одномодового приближения.

В §3.2 приводятся результаты линейного анализа устойчивости для пространственно-периодических возмущений. Для обоих типов потока порог образования неустойчивости находился численно с использованием метода Галеркина. Получены приближенные аналитические формулы для порога пространственно-периодических неустойчивостей.

В §3.3 анализируются структурно-ориентационные переходы в зависимости от азимутальной W_a и полярной W_p компонент силы поверхностного сцепления и внешнего электрического и магнитного полей на примере НЖК МББА. В сдвиговом потоке в отсутствие полей зависимость пороговой скорости сдвига $a_c^2 = \frac{V_0 \tau_d}{d} \sqrt{\frac{K_{22} \alpha_3 \eta_3}{K_{11} \alpha_2 \eta_1}}$ (V_0 — скорость движение верхней под-

ложки, $\tau_d = \gamma_1 d^2 / K_{11}$ — характерное время релаксации директора, d — толщина слоя НЖК, K_{ii} — константы упругости, α_i , η_i , γ_1 — константы вязкости) от компонент силы сцепления носит симметричный характер (рис. 3а, $\beta_a = K_{22}/(W_a d)$, $\beta_p = K_{11}/(W_p d)$). Под действием внешнего поля симметрия нарушается. В магнитном поле обнаружена смена z -симметрии для однородной неустойчивости (Четная Однородная \leftrightarrow Нечетная Однородная) в области слабого сцепления ($\beta_a \rightarrow 1$, $\beta_p \rightarrow 1$) (рис. 4а). При увеличении магнитного поля однородные неустойчивости сменяются роллами (Четные Роллы) (рис. 4б, в). В пуазейлевском потоке уже в отсутствии полей существуют области с однородной неустойчивостью четной z -симметрии возмущения n_{1x} и пространственно-периодическими неустойчивостями нечетной симметрии (рис. 5а). Электрическое поле для нематического жидкого кристалла с отрицательной (положительной) анизотропией диэлектрической проницаемости ε_a подавляет пространственно-периодическую (однородную) неустойчивость (рис. 5б, в). Кроме того, для НЖК с $\varepsilon_a > 0$ в области слабого полярного сцепления ($\beta_p \rightarrow 1$) появляется область с нечетной однородной модой возмущения (рис. 5в). Внешнее магнитное поле приводит к вытеснению однородной неустойчивости роллами.

На основе полученных результатов в работе предлагаются методы, позволяющие определить величины азимутальной W_a и полярной W_p сил сцепления в рамках одного эксперимента. Первый способ заключается в экспериментальном измерении порогового напряжения сдвига a_c^2 в зависимости от величины внешнего электрического E_0 или магнитного H_0 полей и сравнения этой зависимости с результатами расчета порога с использованием W_a и W_p в качестве параметров фитинга. Второй, более точный метод, связан с измерением порогового значения внешнего магнитного поля H_0 и порогового напряжения сдвига a_c^2 , при которых происходит смена симметрии однородной неустойчивости или переход однородная \leftrightarrow пространственно-периодическая неустойчивость. В отличие от применяемых в настоящее время методик измерения сил поверхностного сцепления, предлагаемый подход не требует использования двух различных экспериментальных установок для определения W_a и W_p .

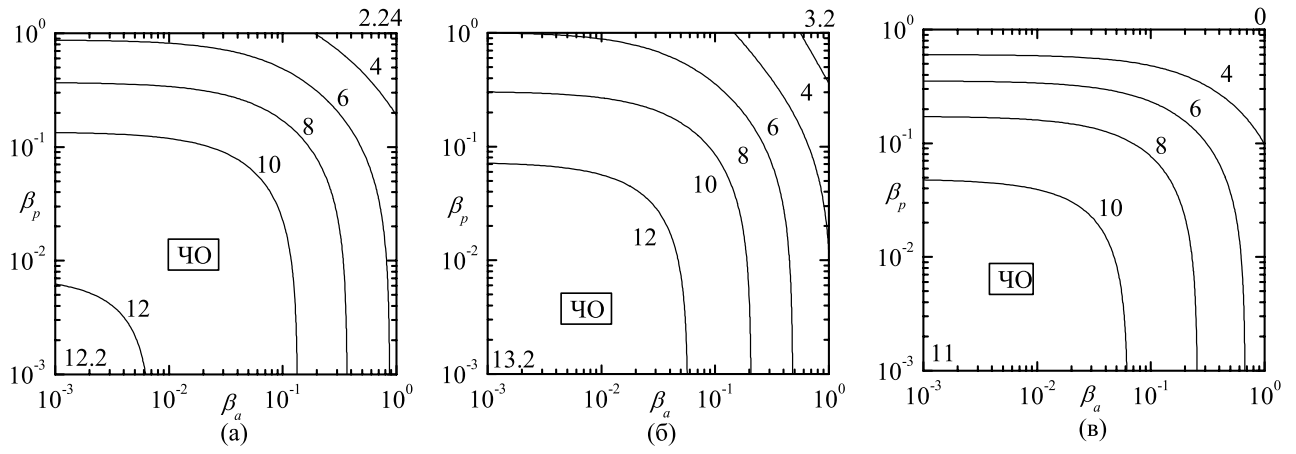


Рис. 3: Изолинии для порогового градиента сдвига a_c^2 для стационарного сдвигового потока в зависимости от β_a и β_p . (а) $E_0 = 0$; (б) $E_0 = 0, 4$, $\varepsilon_a < 0$; (в) $E_0 = 0, 4$, $\varepsilon_a > 0$.

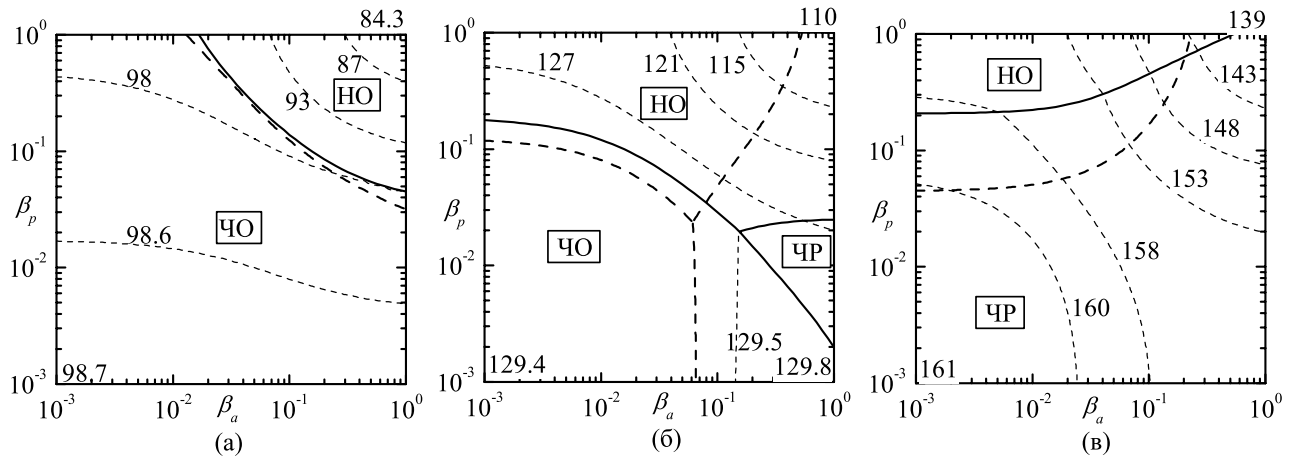


Рис. 4: Фазовая диаграмма для переходов в стационарном сдвиговом потоке под действием внешнего магнитного поля. $H_0/H_F = 3$ (а); 3.5 (б); 4 (в).

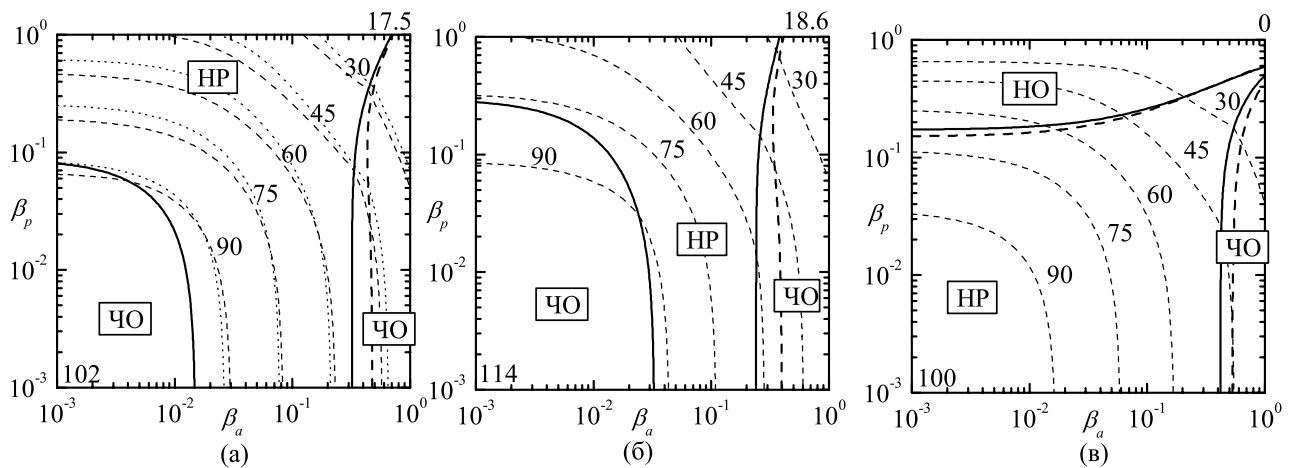


Рис. 5: Фазовая диаграмма для переходов в стационарном пуазейлевском потоке в отсутствии полей (а); для $E_0 = 0, 4$ с $\varepsilon_a < 0$ (б) и с $\varepsilon_a > 0$ (в).

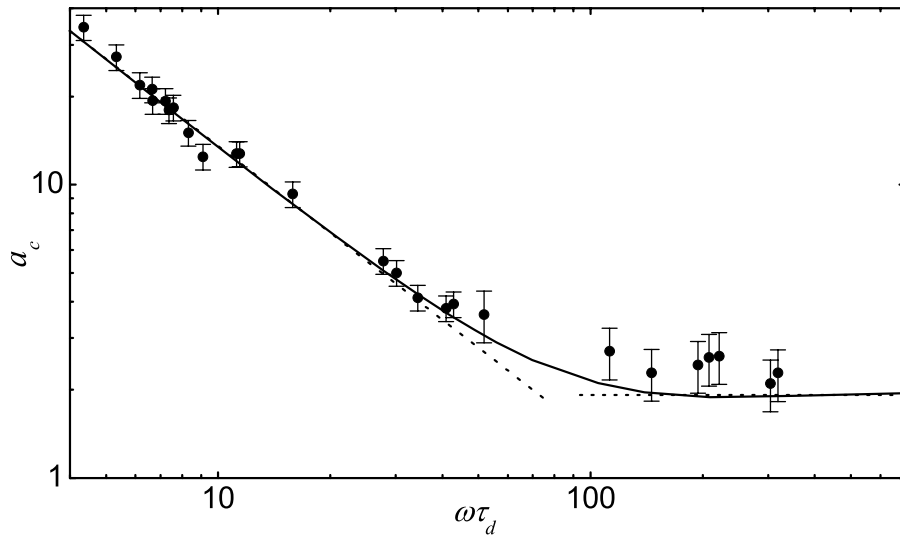


Рис. 6: Зависимость пороговой амплитуды градиента давления a_c от безразмерной частоты потока $\omega\tau_d$. МББА, $d = 100$ мкм. Теория (—) и эксперимент (●).

В четвертой главе изучаются однородные ориентационные неустойчивости в НЖК при комбинированном воздействии осциллирующего пуазейлевского течения и внешнего электрического поля для начальной гомеотропной ориентации директора. Проанализированы два предельных случая низких и высоких частот потока, позволяющие получить достаточно точные аналитические выражения для порога неустойчивости. Для всего частотного диапазона порог неустойчивости найден с помощью численного расчета.

В §4.1 проводится линейный анализ устойчивости для однородных неустойчивостей, характеризующихся выходом директора из плоскости потока, с учетом (де)стабилизирующего электрического поля. Основное состояние и пороговый градиент давления находились численно (§4.2) с использованием метода Галеркина.

В §4.3 получены приближенные формулы для порогового градиента давления в предельных случаях низких (с помощью малоамплитудного разложения) и высоких (методом многомасштабных преобразований) частот потока.

В §4.4 обсуждаются полученные результаты. Теоретически показано, что в области низких частот потока пороговая амплитуда перепада давления $a_c = \frac{\Delta P}{L} \frac{d}{\omega(-\alpha_2)}$ обратно пропорциональна частоте потока в то время как в области высоких частот a_c от частоты не зависит (рис. 6). Электрическое поле для НЖК с отрицательной анизотропией диэлектрической проницаемости ε_a приводит в снижению a_c (рис. 7).

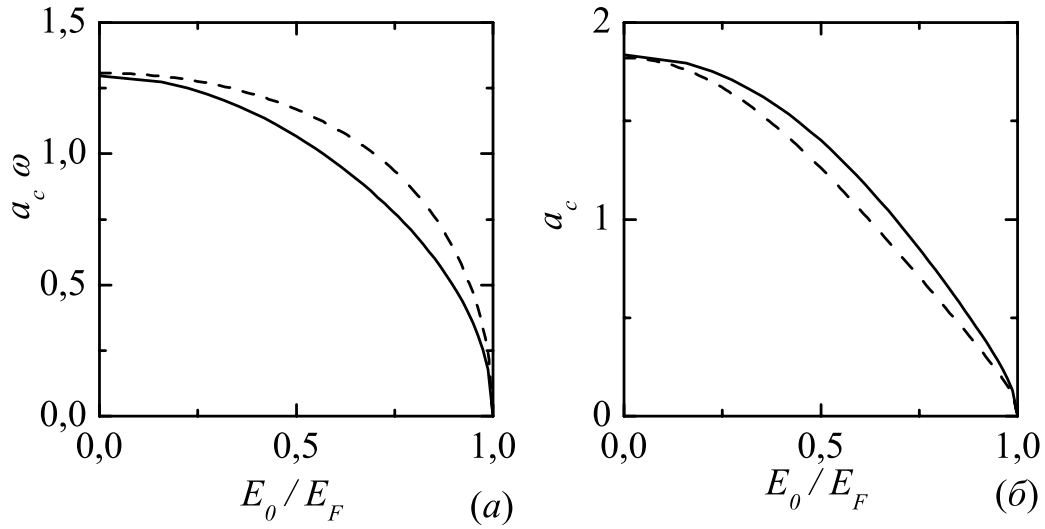


Рис. 7: Зависимость пороговой амплитуды градиента давления a_c от величины внешнего электрического поля E_0/E_F . МББА, $d = 100$ мкм. (а) $f = 0,01$ Гц, (б) $f = 1$ Гц. Численный расчет (—) и приближенные аналитические результаты (— —).

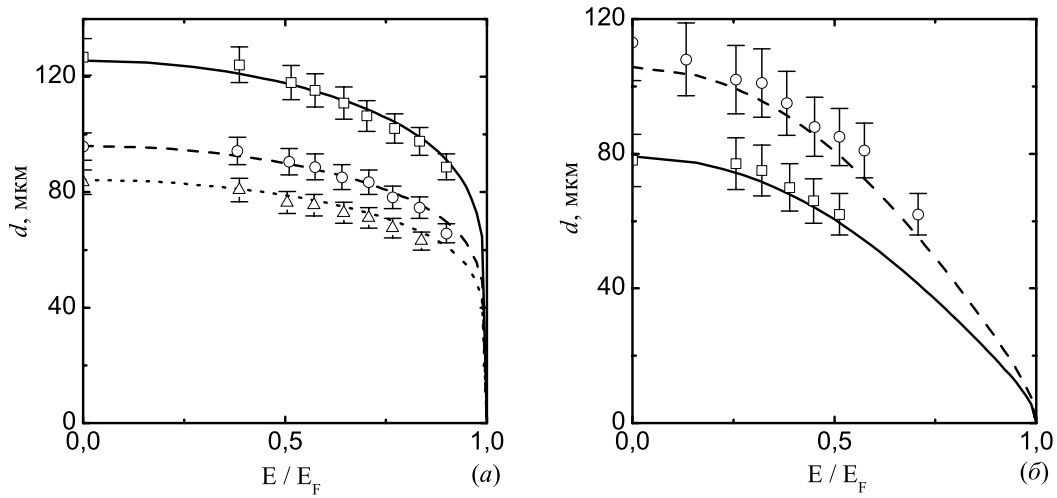


Рис. 8: Зависимость пороговой толщины слоя d от величины внешнего электрического поля E_0/E_F . НЖК МББА, $T = 22^\circ\text{C}$. Теория (линии) и эксперимент (символы). Низкочастотный предел (а): (—, \square) $\Delta P = 6,7$ Па, $f = 0,025$ Гц; (— —, \circ) $\Delta P = 15$ Па, $f = 0,025$ Гц; ($\cdot \cdot \cdot$, Δ) $\Delta P = 22,25$ Па, $f = 0,07$ Гц. Высокочастотный предел (б): (—, \square) $\Delta P = 52,44$ Па, $f = 0,3$ Гц; (— —, \circ) $\Delta P = 25,9$ Па, $f = 0,2$ Гц.

На рис. 8 представлены экспериментальные данные для пороговой толщины слоя d , выше которой наблюдается выход директора из плоскости потока, в зависимости от величины внешнего электрического поля E_0/E_F и результаты численного расчета. С ростом величины электрического поля для НЖК с $\varepsilon_a < 0$ пороговая толщина слоя d уменьшается. Анализ, проведенный для НЖК с $\varepsilon_a > 0$, показал, что с ростом величины электрического поля пороговый градиент давления увеличивается.

Предложенные аналитические методы позволяют достаточно точно определить порог образования неустойчивости в предельных случаях низких и высоких частот потока. Полученные теоретические результаты находятся в хорошем количественном согласии с экспериментальными данными.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись в соответствии с программой РАН «Неравновесные структурно-фазовые превращения в анизотропных конденсированных средах» (№ 01.20.00 12123) и поддерживались грантами ИНТАС (грант № 96-498), РФФИ (грант № 02-02-17435) и ФЦП «Интеграция» (проект № А0002, № Б0065).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние характера сцепления молекул НЖК с ограничивающей поверхностью (сила сцепления, поверхностная вязкость) и внешнего электрического поля на ориентационную динамику НЖК в режиме линейного отклика в стационарном (сдвиговом и пуазейлевском), осциллирующем (сдвиговом и пуазейлевском) и затухающем пуазейлевском потоках для начальной ориентации директора в плоскости потока. С использованием малоамплитудного приближения получены аналитические выражения для профилей директора и скорости и рассчитаны фазовая задержка и интенсивность прошедшего через слой НЖК поляризованного света (оптический отклик).
2. Установлено, что оптический отклик НЖК в стационарном сдвиговом потоке существенно зависит от величины силы полярного сцепления, что может быть использовано для ее экспериментального определения. Найден частотный диапазон осциллирующего сдвигового и пуазейлевского потоков, в котором влияние поверхностной вязкости на ориентационную динамику НЖК

проявляется наиболее сильно. На основе этого предложен экспериментальный метод измерения поверхностной вязкости.

3. Исследовано влияние поверхностного сцепления и внешнего электрического и магнитного полей на структурно-ориентационные переходы в стационарном сдвиговом и пуазейлевском потоках нематического жидкого кристалла при начальной ориентации директора перпендикулярно плоскости потока. Показано, что при нежестком сцеплении возможны переходы с образованием двух типов структур — однородная и пространственно-периодическая деформация НЖК в направлении, перпендикулярном плоскости потока. Рассчитаны фазовые диаграммы всех возможных переходов от одного типа структуры к другому, в зависимости от величины компонент силы сцепления и при изменении величины внешнего поля. Полученные приближенные выражения для критической амплитуды потока для всех типов неустойчивостей находятся в хорошем согласии с результатами численных расчетов и имеющимися экспериментальными данными. На основе полученных результатов предложен экспериментальный метод определения двух компонент силы сцепления в рамках одного эксперимента.

4. Исследована ориентационная неустойчивость в слое нематического жидкого кристалла с жесткими гомеотропными граничными условиями, сопровождающаяся выходом директора из плоскости потока, при комбинированном воздействии осциллирующего пуазейлевского потока и внешнего электрического поля. Получены приближенные аналитические выражения для критической амплитуды потока в предельных случаях низких и высоких частот и проведено сравнение с результатами численного расчета зависимости пороговой амплитуды потока от частоты и внешнего электрического поля. Обнаружено, что для НЖК с отрицательной анизотропией диэлектрической проницаемости ($\epsilon_a < 0$) внешнее электрическое поле приводит к уменьшению пороговой амплитуды потока, тогда как для НЖК с $\epsilon_a > 0$ при увеличении поля порог возрастает, однако, характер перехода (прямая бифуркация) при этом не меняется. Полученные теоретические результаты находятся в хорошем количественном согласии с экспериментальными данными.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Nasibullayev I. Sh., Krekhov A. P., Khazimullin M. V. Dynamics of nematic liquid crystal under oscillatory flow: influence of surface viscosity // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2000. V. 351. P. 395–402.
2. Насибуллаев И. Ш., Крехов А. П. Поведение нематического жидкого кристалла в осциллирующем потоке при слабом поверхностном сцеплении // *Кристаллография.* 2001. Т. 46, № 3. С. 540–548.
3. Pasechnik S. V., Krekhov A. P., Shmeliova D. V., Nasibullayev I. Sh., Tsvetkov V. A. Orientational dynamics in nematic liquid crystal under decay Poiseuille flow // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2004. V. 409. P. 467–474.
4. Насибуллаев И. Ш., Крехов А. П. Влияние слабых граничных условий на динамику нематического жидкого кристалла в осциллирующем пуазейлевском потоке // *Структура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. Выпуск VI. Казань.* 1999. С. 174–176.
5. Насибуллаев И. Ш., Крехов А. П. Влияние электрического поля на ориентационную динамику слоя НЖК со “слабым” сцеплением в осциллирующем потоке // *Структура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. Выпуск VII. Казань.* 2000. С. 141–144.
6. Насибуллаев И. Ш., Тарасов О. С., Крехов А. П. Ориентационные неустойчивости в сдвиговом потоке нематического жидкого кристалла // *Структура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. Выпуск IX. Уфа–Казань–Москва–Йошкар-Ола.* 2002. Т. 2. С. 57–60.
7. Насибуллаев И. Ш., Тарасов О. С., Крехов А. П. Неустойчивости в стационарном пуазейлевском потоке нематического жидкого кристалла // *Структура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. Выпуск IX. Уфа–Казань–Москва–Йошкар-Ола.* 2002. Т. 2. С. 61–64.
8. Насибуллаев И. Ш., Крехов А. П. Ориентационная динамика нематического жидкого кристалла в затухающем пуазейлевском потоке // *Струк-*

тура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. Выпуск X. Уфа–Казань–Москва–Йошкар-Ола. 2003. Т. 2. С. 18–21.

9. Pasechnik S.V., Nasibullayev I.Sh., Shmeliova D.V., Krekhov A.P., Tsvetkov V.A. Orientational dynamics in decay Poiseuille flow of nematic liquid crystals // Abs. of 19th International Liquid Crystals Conference. Edinburgh. UK. 2002. P. PP0116.
10. Nasibullayev I. Sh., Krekhov A. P., Khazimullin M.V. Dynamics of nematic liquid crystal under oscillatory flow: influence of surface viscosity // Abs. of 5th European Conference on Liquid Crystals. Hersonissos/Crete, Greece. 1999. P. P1-061.
11. Nasibullayev I. Sh., Tarasov O.S., Krekhov A.P., Kramer L. Influence of weak anchoring on the orientational behaviour of nematic liquid crystals under shear flow // Abs. of 18th International Liquid Crystals Conference. Sendai, Japan. 2000. P. 193.
12. Крехов А. П., Насибуллаев И. Ш., Тарасов О. С. Неустойчивости в стационарном потоке нематического жидкого кристалла: влияние ограничивающих поверхностей, электрического и магнитного поля // Сборник тезисов. 8^й всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь. 2001. С. 367.
13. Nasibullayev I. Sh., Tarasov O.S., Krekhov A.P. Instabilities in nematic liquid crystals under steady flow: influence of weak anchoring and external fields // Abs. of 6th European Conference on Liquid Crystals. Halle, Germany. 2001. P. 8-P19.
14. Насибуллаев И. Ш., Тарасов О. С., Крехов А. П. Однородные и пространственно-периодические неустойчивости в стационарном потоке нематического жидкого кристалла // Программа и тезисы докладов XXIX Международной Зимней Школы физиков-теоретиков «Коуровка — 2002». Кунгур. 2002. С. P29.
15. Nasibullayev I. Sh., Krekhov A. P. Instabilities in nematic liquid crystal under oscillatory flow and additional electric field // Abs. of 19th International Liquid Crystals Conference. Edinburgh. UK. 2002. P. PP0123.

16. Nasibullayev I. Sh., Krekhov A. P. Instabilities in nematic liquid crystal under combine action of the oscillatory Poiseuille flow and electric field // Abs. of 7th European Conference on Liquid Crystals. Jaca. Spain. 2003. P. P43.
17. Nasibullayev I. Sh., Tarasov O. S., Krekhov A. P., Kramer L. Orientational instabilities in nematics with weak anchoring under the combined action of steady flow and external fields // Abs. of 20th International Liquid Crystals Conference. Ljubljana. Slovenia. 2004. P. 329.
18. Nasibullayev I. Sh., Shmeliova D. V., Pasechnik S. V., Krekhov A. P. Orientational instabilities in oscillatory Poiseuille flow of nematic liquid crystals // Abs. of 20th International Liquid Crystals Conference. Ljubljana. Slovenia. 2004. P. 470.