

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Спириденко Никиты Андреевича
«Топологические переходы в нематических жидких кристаллах с рождением
и аннигиляцией топологических дефектов», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния

Актуальность темы работы

Диссертационная работа Н. А. Спириденко посвящена экспериментальному исследованию топологических дефектов и топологических переходов в нематических жидких кристаллах в ограниченной геометрии оптических ячеек. Тематика исследования относится к активно развивающейся области физики конденсированного состояния, связанной с изучением топологических явлений в мягкой материи. Топологические дефекты играют фундаментальную роль в различных разделах физики, а жидкие кристаллы являются уникальной модельной средой для визуализации и изучения. Интерес к данным исследованиям обусловлен не только фундаментальным значением топологических законов, но и перспективами практического применения в оптических устройствах и материалах с контролируемой структурой. Особую актуальность работе придает исследование топологических переходов с изменением эйлеровой характеристики, а также изучение коллективной динамики дефектов в ограниченной геометрии – вопросы, которые до настоящего времени оставались малоизученными. Сильной стороной диссертации является сочетание высокоскоростной видеорегистрации, поляризационной оптической микроскопии и топологического анализа, позволяющее установить связь между изменением формы капель, структурой поля директора и рождением или аннигиляцией топологических дефектов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 97 наименований, изложена на 108 страницах и содержит 58 рисунков.

Анализ содержания работы

Во введении приводится информация об актуальности и новизне работы, цели и задачах исследования, научной и практической значимости исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертационной работы. Кратко описаны основные типы жидких кристаллов и их структурные особенности. Подробно рассмотрены топологические дефекты в нематической фазе, а также их топологическая классификация на основе теоремы Пуанкаре–Хопфа. Обсуждается связь суммарного топологического заряда дефектов с эйлеровой характеристикой поверхности. Приведены

данные о коалесценции капель в изотропных и анизотропных средах, а также о роли граничных условий в формировании дефектных структур.

Во второй главе излагаются экспериментальные методики и характеристики образцов. Описана жидкокристаллическая смесь E7, используемая в работе, а также методы подготовки оптических ячеек с планарными и гомеотропными граничными условиями. Приведены сведения о термостатирующем устройстве, оптическом микроскопе и высокоскоростных видеокамерах, позволяющих регистрировать процессы с частотой до 1000 кадров/с. Описаны методики получения изотропных капель в нематической среде (при нагревании) и нематических капель в изотропной среде (при охлаждении), а также способы определения знака топологического заряда дефектов с использованием вращения поляризаторов и компенсатора Берека.

В третьей главе приводятся результаты исследования динамики коалесценции капель изотропной жидкости в нематической среде в плоских оптических ячейках. Установлена временная зависимость ширины перешейка между сливающимися каплями и анизотропии формы капель для разных размеров капель и толщин ячеек. Показано, что на начальном этапе слияния скорость расширения перешейка не зависит от радиуса капли и толщины ячейки и определяется капиллярной скоростью. На средней и конечной стадиях динамика описывается течением Пуазейля; при этом характерные времена на всех трех стадиях для тонких ячеек могут быть представлены в виде универсальной зависимости от размера капель. Обнаружено, что скорость релаксации на заключительном этапе слияния возрастает с увеличением толщины ячейки. Для толстых ячеек ($h = 19$ мкм) на средней стадии наблюдается показатель степени $\beta \approx 1/5$, который ранее не был описан в литературе.

В четвертой главе представлены результаты исследования структуры и динамики топологических дефектов в тонких слоях нематика. Впервые получены замкнутые кольцевые цепочки топологических дефектов с чередующимися противоположными зарядами («ожерелье» из дефектов). Изучена их коллективная динамика, которая описывается степенным законом $N(t) = A/(t - t_0)^{\nu}$ с показателем $\nu = 0,4 \pm 0,1$, что существенно отличается от известного значения $\nu = 0,9$ для двумерных систем. Исследована трансформация топологических дефектов на поверхности изотропных и нематических капель. При слиянии капель обнаружено зарождение антиподов существующих дефектов с последующей попарной аннигиляцией. Для точечных дефектов, движущихся вдоль прямого мениска, установлена универсальная зависимость $r(t) \propto (t_0 - t)^{0,5}$ вплоть до момента аннигиляции. Показано, что дефект типа «кольцо Сатурна» в больших квазидвумерных каплях преобразуется в два дефекта, локализованных в мениске.

В пятой главе исследуются динамические неустойчивости с изменением топологии при слиянии и разрыве. Впервые реализована серия топологических переходов с изменением

эйлеровой характеристики капли: $\chi = +1$ (капля на поверхности) $\rightarrow \chi = 0$ (простой тороид) $\rightarrow \chi = -1$ (тороид с двумя ручками) $\rightarrow \chi = 0$. Получены тороидальные капли с эйлеровой характеристикой -1 , которые ранее не наблюдались в жидких кристаллах. Изучен распад тороидальных капель из-за неустойчивости Рэлея–Плато, сопровождающийся образованием сателлитных капель микрометрового размера и топологических дефектов на их поверхности. Исследован также разрыв тонких изотропных прослоек между областями нематика, при котором обнаружено каскадное образование сателлитных капель и топологических дефектов на границе раздела фаз.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы. Наиболее значимыми из них являются следующие. Установлены характерные времена и степенные зависимости для всех трех стадий коалесценции капель в ограниченной геометрии. Впервые получены и исследованы упорядоченные одномерные структуры топологических дефектов («ожерелья») с чередующимися зарядами. Обнаружено рождение антиподов дефектов при слиянии капель с последующей аннигиляцией. Реализована серия топологических переходов с изменением эйлеровой характеристики, включая состояние с $\chi = -1$. Продемонстрирована неустойчивость Рэлея–Плато в жидкокристаллической среде с образованием сателлитных капель и топологических дефектов.

Научная новизна

В диссертации впервые реализован комплексный подход к изучению коалесценции капель в анизотропных средах, позволивший на одних и тех же объектах проследить всю эволюцию формы – от момента касания до установления равновесной конфигурации. Для каждого из трёх этапов слияния (начального, промежуточного и релаксационного) установлены характерные времена и показатели степенных зависимостей, а также выявлена их зависимость от геометрических параметров ячейки. В частности, обнаружено, что на средней стадии в толстых ячейках показатель степени отличается от предсказываемого классическими моделями, что указывает на необходимость учёта анизотропии вязкости и влияния поверхностей.

Принципиально новым результатом является получение замкнутых одномерных цепочек топологических дефектов с закономерным чередованием зарядов противоположного знака («ожерелий»). Изучение их коллективной эволюции показало, что закон уменьшения числа дефектов со временем имеет показатель, существенно отличающийся от ранее известного для двумерных ансамблей, что свидетельствует о специфике взаимодействия дефектов в ограниченной геометрии с гибридными граничными условиями.

В работе впервые детально прослежена динамика рождения парных дефектов-антиподов при слиянии капель нематической и изотропной фаз. Показано, что

топологические ограничения выполняются независимо для точечных и локализованных линейных дефектов, а их последующая аннигиляция подчиняется универсальному корневому закону на прямолинейных участках мениска. Кроме того, впервые установлено, что при увеличении размера капель классическое «кольцо Сатурна» трансформируется в два дискретных дефекта, локализованных в мениске, что расширяет представления о поведении экваториальных дисклинаций в квазидвумерной геометрии.

Важным открытием является реализация серии топологических переходов с последовательным изменением эйлеровой характеристики капли ($\chi = +1 \rightarrow \chi = 0 \rightarrow \chi = -1 \rightarrow \chi = 0$), причём состояние с $\chi = -1$ (тороид с двумя ручками) наблюдается в жидкокристаллических системах впервые. Обнаруженный механизм образования тороидальных структур через формирование отверстия в центре дефекта с зарядом $+1$ представляет собой новый способ управления топологией мягких сред. Также впервые зафиксирован распад тороидов по механизму Рэля–Плато, сопровождающийся каскадным образованием сателлитных микрокапель и топологических дефектов на их поверхности, что демонстрирует тесную связь между гидродинамической неустойчивостью и перестройкой поля ориентационного порядка.

Наконец, в работе впервые исследована неустойчивость тонких изотропных прослоек, разделяющих нематические области, и показано, что их разрыв происходит каскадно, с образованием не только дочерних капель, но и топологических дефектов на межфазной границе. Это позволяет по-новому взглянуть на роль упорядочения среды в процессах дробления и подтверждает универсальность топологических законов в анизотропных жидкостях.

При общей положительной оценке работы к ней имеются следующие замечания.

1. В главе 2, посвящённой экспериментальным методикам, следовало бы более подробно описать не только оптическую схему микроскопа и термостатирующее устройство, но и элементы цифровой регистрации: типы видеокамер, максимальную частоту съёмки, используемое программное обеспечение для управления экспериментом и обработки изображений. Это позволило бы полнее оценить технические возможности проведённых измерений.

2. При описании жидкокристаллической смеси E7 указан производитель (Synthon Chemicals), однако не приведена страна регистрации компании. Для корректного цитирования в научной работе желательно указывать эти сведения.

3. В разделе 3.2 автор утверждает, что на средней стадии коалесценции в толстой ячейке ($h = 19$ мкм) показатель степени $\beta \approx 1/5$, что отличается от теоретического значения $1/4$ для течения Пуазейля. Однако на рис. 3.7(b) и 3.10(b) экспериментальные точки не строго ложатся на прямую с наклоном $1/5$ во всём интервале времени. Следовало бы

привести количественную оценку погрешности определения этого показателя (например, $\beta = 0,20 \pm \dots$), а не ограничиваться приближённым значением, а также обсудить возможные причины отклонения от теории.

4. При описании коллективной динамики дефектов в кольцевых цепочках (раздел 4.1) получен показатель степени $\nu = 0,4 \pm 0,1$ для зависимости $N(t) = A/(t - t_0)^\nu$. Автор сравнивает это значение с теоретическим предсказанием $\nu = 1$ для аннигиляции дефектов в двумерных системах и с экспериментальным значением около 0,9. Однако физическая причина столь существенного расхождения (почти в 2 раза) в работе не обсуждается. Желательно пояснить, может ли это различие быть связано с одномерным характером упорядочения дефектов, влиянием границы раздела фаз или гибридными граничными условиями.

5. При сильном смачивании подложки изотропной фазой и формировании обратного мениска между двумя каплями возможно возникновение не одного изотропного мостика в средней плоскости ячейки, а двух полумостиков вблизи внутренних поверхностей. Наблюдались ли в экспериментах подобные конфигурации, и если да, то как они влияют на каскадный разрыв? Поскольку этот вопрос напрямую связан с трёхмерной геометрией процесса, было бы полезно дополнить работу схематическим трёхмерным изображением, иллюстрирующим форму менисков и мостика.

6. Рисунок 4.4 и сопровождающий его текст (стр. 50–51) вызывают вопросы терминологического характера. Автор описывает переход от «изотропной капли с точечным дефектом» к тороидальной капле (рис. 4.4(a–d)). При этом на рис. 4.4(b, c) в центральной части капли отчётливо видна нематическая фаза (цветные области). Называть такую структуру «изотропной каплей» не вполне корректно, поскольку она содержит нематический «карман» или кратер.

7. Рисунок 4.6 в значительной степени дублирует содержание рис. 4.2(c, f) и рис. 1.5(d–f). На них приведены схематические изображения радиального и гиперболического двумерных дефектов с зарядами +1 и –1. Поскольку эти иллюстрации не несут новой информации по сравнению с предыдущими рисунками, их можно было бы объединить или исключить, сократив объём работы.

8. В подписях к рисункам 3.6–3.11 и в тексте говорится о «логарифмическом масштабе» при построении зависимостей $W(t)$ и $D(t)$. Однако из анализа графиков (например, рис. 3.6(b), 3.7(b), 3.10(b)) следует, что используется двойной логарифмический масштаб ($\log W$ от $\log t$), а не полулогарифмический ($\log W$ от t). В тексте следовало бы уточнить это, поскольку для проверки степенных зависимостей $W \propto (t - t_0)^\beta$ действительно необходим именно двойной логарифмический масштаб.

Указанные замечания носят частный характер и не снижают общую высокую оценку работы. Обоснованность выводов диссертации и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

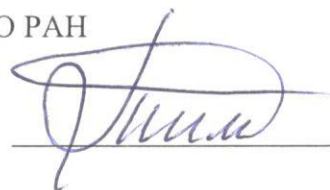
По теме работы опубликованы 9 статей в международных и российских журналах, апробация результатов проведена на российских и международных конференциях.

В целом диссертация «Топологические переходы в нематических жидких кристаллах с рождением и аннигиляцией топологических дефектов» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком уровне. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния, а ее автор Спириденко Никита Андреевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Я, Тимофеев Иван Владимирович, выступающий официальным оппонентом по диссертации Спириденко Никиты Андреевича на тему «Топологические переходы в нематических жидких кристаллах с рождением и аннигиляцией топологических дефектов», даю согласие на обработку моих персональных данных (сведения об оппоненте, отзыв) для включения в материалы дела, а также на размещение указанных сведений в федеральной информационной системе государственной научной аттестации и в сети «Интернет».

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05
«Оптика», Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской
академии наук», заведующий лабораторией фотоники
молекулярных систем, ведущий научный сотрудник Института
физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской
академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

Тимофеев Иван Владимирович



«11» сентября 2026 г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (3912) 90-56-37. E-mail: tiv@iph.krasn.ru
660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

Подпись Тимофеева Ивана Владимировича удостоверяю
ученый секретарь Института физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

к.ф.-м.н.



Злотников А.О.