

Физика

Научная статья

УДК 538.91

**ОБРАЗОВАНИЕ И АННИГИЛЯЦИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ГРАНИЦЕ
НЕМАТИЧЕСКАЯ ФАЗА – ИЗОТРОПНАЯ ЖИДКОСТЬ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ
ИЗМЕНЕНИЕМ ТОПОЛОГИИ КАПЕЛЬ**

Павел Владимирович Долганов*, Никита Андреевич Спириденко, Владимир Карлович Долганов

Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Московская область, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 28.05.2025

Одобрена 23.06.2025

Принята 4.08.2025

Ключевые слова:

топологические дефекты,
поверхностные явления,
двухфазная область

АННОТАЦИЯ

Используя ограниченную геометрию оптических ячеек, мы исследовали изотропные капли, окруженные нематической фазой, и топологические дефекты, связанные с этими каплями. В двухфазной области нематическая фаза – изотропная жидкость размер капель можно было контролируемо изменять при небольшом изменении температуры. Мы наблюдали, что при нагревании, когда продольный размер капель увеличивается и превышает толщину ячейки, топологические характеристики капель меняются, что приводит к исчезновению топологических дефектов. При охлаждении мы обнаружили существенно различное поведение капель в зависимости от скорости охлаждения. Изменение топологии капель, сопровождающееся образованием топологических дефектов, наблюдалось также при слиянии капель. Полученные результаты демонстрируют возможность контролируемым образом изменять топологию сложных систем мягкой материи.

DOI:

10.18083/LCAppl.2025.3.56

EDN:

<https://elibrary.ru/nldtqw>

Supplementary:

[http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/
articles/suppl_2025_3_56-65.pdf](http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/articles/suppl_2025_3_56-65.pdf)

Для цитирования:

Долганов П. В., Спириденко Н. А., Долганов В. К. Образование и аннигиляция топологических дефектов на границе нематическая фаза – изотропная жидкость, индуцированные изменением топологии капель // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2025. Т. 25, № 3. С. 56–65.

Physics

Original Article

**FORMATION AND ANNIHILATION OF TOPOLOGICAL DEFECTS
AT NEMATIC – ISOTROPIC INTERFACE INDUCED BY CHANGE OF DROPLET TOPOLOGY**

Pavel V. Dolganov*, Nikita A. Spiridenko, Vladimir K. Dolganov

Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 28 May 2025

Approved 23 June 2025

Accepted 4 August 2025

Key words:

topological defects,
surface phenomena,
biphasic region

Employing confined geometry of optical cells, we studied isotropic droplets surrounded by nematic mesophase and topological defects associated with the droplets. In the nematic-isotropic biphasic region the droplet size could be controllably changed by slight temperature variation. We observed that on heating, when the longitudinal droplet size increases and exceeds the cell thickness, the topological characteristics of the droplets change, which leads to disappearance of topological defects. On cooling, an essentially different behavior of the droplets was observed depending on the cooling rate. The change of the droplets topology accompanied by birth of topological defects was also detected at droplet coalescence. Our findings demonstrate the possibility to modify in a controllable way the topology of complex soft matter systems.

DOI:

10.18083/LCAppl.2025.3.56

EDN:

<https://elibrary.ru/nldtqw>

Supplementary:

[http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/
articles/suppl_2025_3_56-65.pdf](http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/articles/suppl_2025_3_56-65.pdf)

For citation:

Dolganov P. V., Spiridenko N. A., Dolganov V. K. Formation and annihilation of topological defects at the nematic – isotropic interface induced by the change of droplet topology. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2025, **25** (3), 56– 65 (in Russ.).

Введение

В жидких кристаллах со спонтанным нарушением ориентационной симметрии возможно образование сингулярностей в поле параметра порядка как в объеме, так и на границе [1, 2]. Взаимосвязь ориентации молекул на границе с твердым телом, жидкостью или воздухом и объемной структуры широко изучалась в фундаментальных и прикладных исследованиях [3–10]. Зачастую образуются необычные структуры с точечными и линейными сингулярностями [8–19]. Научные основы их описания связаны с топологией. Эйлерова характеристика (инвариант Эйлера – Пуанкаре) системы χ – топологический инвариант, сохраняющийся при непрерывной деформации объекта. Эйлерова характеристика сферы или топологически эквивалентной ей поверхности равна $\chi = 2$, а для более сложной двумерной (2D) поверхности χ равна $\chi = 2(1-g)$ [20, 21], где g – число «ручек» в изучаемом объекте. Например, тор топологически эквивалентен кружке с одной «ручкой» и, соответственно, имеет эйлерову характеристику $\chi = 0$. Другая важная формула относится к случаю наличия n «дырок» (изолированных непересекающихся удаленных областей) на сфере $\chi = 2-n$. Эти на первый взгляд абстрактные математические результаты непосредственно связаны с физикой. Связь устанавливает теорема Пуанкаре – Хопфа. Если векторное поле задано на замкнутой ориентированной поверхности, число топологических сингулярностей поля связано с эйлеровой характеристикой: χ равна сумме топологических зарядов дефектов. Топологические дефекты встречаются в различных областях науки, таких как физика мягкой материи, твердого тела, ядерная физика, космология, квантовая теория поля. Эти дефекты родственны топологическим дефектам в жидких кристаллах из-за схожести полей параметра порядка и их топологии [22–25].

Жидкие кристаллы стали удобными модельными объектами для экспериментальных исследований топологических дефектов, поскольку дефекты могут быть сравнительно легко получены и визуализированы по сравнению с другими областями науки. Можно определить характеристики дефектов (например, величины топологических зарядов), проследить их эволюцию во времени и простран-

стве. В нематической мезофазе топологические дефекты образуются в поле молекулярного упорядочения (поле $\mathbf{n}$ -директора). В зависимости от размерности пространства могут существовать топологические дефекты с различными характеристиками. На рисунке 1 схематически показаны простейшие трехмерные точечные топологические дефекты в нематической фазе (радиальный и гиперболический еж, верхний ряд) и 2D дефекты с топологическими зарядами $S = +1$ и $S = -1$ (нижний ряд). Радиальный еж и гиперболический еж топологически эквивалентны: радиальный еж может быть непрерывно преобразован в гиперболический еж [5]. Для 2D дефектов топологический заряд S определяется естественным образом как число оборотов директора при обходе вокруг дефекта по замкнутому контуру [2]. Дефекты $S = +1$ и $S = -1$ в 2D топологически неэквивалентны и не могут быть преобразованы один в другой. Дефекты $S = +1$ могут иметь, в частности, радиальную и круговую ориентацию директора вокруг ядра дефекта [2]. В нематической фазе могут также существовать дефекты с полущелым S , поскольку ориентации директора $\mathbf{n}$ и $-\mathbf{n}$ эквивалентны. 2D дефекты с единичным зарядом можно представить как планарные сечения радиального и гиперболического ежей (рис. 1). Каждое планарное сечение радиального ежа (рис. 1, *a*) представляет собой радиальный 2D дефект (рис. 1, *d*). В то же время планарные сечения гиперболического ежа, показанные на рис. 1, *b*, *c*, дают соответственно радиальный $S = +1$ дефект (рис. 1, *e*) и гиперболический $S = -1$ дефект (рис. 1, *f*). Если гиперболический еж находится на поверхности (например, на границе частицы), распределение проекции директора на поверхность может соответствовать дефекту $S = +1$ или дефекту $S = -1$.

Топологический заряд поля нематической фазы на 2D поверхности должен согласовываться с ее эйлеровой характеристикой. До настоящего времени эксперименты проводились в основном для случаев, когда эйлерова характеристика сохраняется (рождение и аннигиляция пар топологических дефектов, слияние капель в анизотропных средах или капель нематической фазы в изотропном окружении [26, 27]) и реже для топологических переходов с изменением эйлеровой характеристики [28, 29].

В данной работе мы демонстрируем изменение эйлеровой характеристики интерфейса между изотропной каплей и нематической фазой при топологических переходах, вызванных увеличением размера капли. Исследования проводились в двухфазной области нематическая фаза – изотропная жидкость в тонких плоских оптических ячейках. При нагреве капли изотропной жидкости образуются у нижней поверхности ячейки. На полюсе капли наблюдается топологический дефект. Топологический переход, при котором топологический

дефект исчезает, происходит при увеличении размера капли, когда капля касается двух поверхностей ячейки. Слияние капель может сопровождаться топологическим переходом с образованием нематической полости в изотропной капле и топологического дефекта на поверхности. В зависимости от скорости охлаждения топологические трансформации капель могут происходить в обратном порядке или по другому сценарию с образованием тороидальной капли.

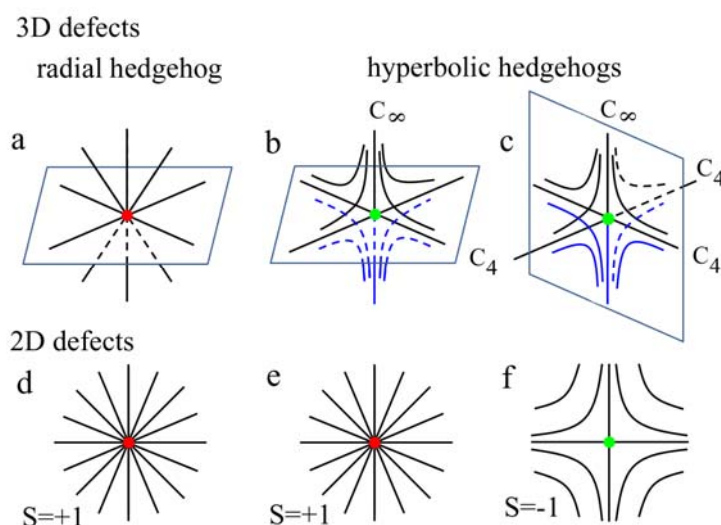


Рис. 1. (цветной онлайн) Схематическое изображение различных типов дефектов в нематической фазе. Черными линиями показано поле директора. Ядра сингулярностей показаны красным и зеленым. 3D-дефекты изображены в верхнем ряду, 2D-дефекты – в нижнем ряду. Радиальный еж и гиперболический еж изображены на рисунках (a) и (b, c), соответственно. Каждое планарное сечение радиального ежа представляет собой радиальный 2D-дефект (d). Планарные сечения гиперболического ежа представляют собой радиальные 2D-дефекты для сечения, перпендикулярного оси C_∞ (e), и гиперболический 2D-дефект для сечения, перпендикулярного оси C_4 (f)

Fig. 1. (Color online) Schematic of different types of defects in nematic phase. The black curves are the director field. The core singularities are shown in red and green. 3D-defects are shown in the upper row, and 2D-defects – in the bottom row. A radial hedgehog and a hyperbolic hedgehog are shown in frames of (a) and (b, c), respectively. Each planar section of a radial hedgehog gives a radial 2D-defect (d). Planar sections of the hyperbolic hedgehog produce radial 2D-defects for the section perpendicular to the C_∞ axis (e) and a hyperbolic 2D-defect for the section perpendicular to the C_4 axis (f)

Эксперимент

Исследования проводились на нематической смеси E7 (Synthon Chemicals). В экспериментах мы использовали оптические ячейки, внутренние поверхности которых были покрыты слоем хромола-на (стеарилхлорида хрома). Это покрытие задает перпендикулярные граничные условия для ориентации молекул (гомеотропная ориентация). Тол-

щина зазора ячеек h составляла от 20 мкм до 40 мкм. Ячейки заполнялись веществом в изотропной фазе. Изотропные капли в нематической фазе были получены при нагреве до двухфазной области. Скорость нагрева обычно составляла 0,05–0,1°C/мин. Температура образцов контролировалась термостатирующим устройством Linkam LTS120.

Двухфазная область изотропная фаза – нематическая фаза существует в E7 в диапазоне примерно от 57 °C до 59 °C. Такая широкая двухфазная область удобна для наблюдения капель с топологическими дефектами, поскольку оптически анизотропная жидкокристаллическая структура сосуществует с изотропной фазой. Существенным фактором в наших экспериментах была ориентация нематического директора на границе изотропных капель. На межфазной границе нематическая фаза – изотропная жидкость в E7 реализуются вырожденные конические граничные условия, т.е. нематический директор ориентирован под углом к поверхности [27, 29, 30]. Изображения структур были получены с использованием оптического микроскопа *Olympus BX51*, оборудованного цифровой видеокамерой. Наблюдения в проходящем свете в скрещенных поляризаторах позволяют визуализировать распределение поля директора. В ряде измерений использовался компенсатор Берека с изменяемой разностью фаз.

Результаты и их обсуждение

Для сферической оболочки с упорядоченным векторным полем на поверхности теорема Пуанкаре – Хопфа допускает существование нескольких типов конфигураций с топологическими дефектами. Для свободной оболочки энергетически выгодно наличие четырех дефектов с $S = +1/2$. Они расположены на сфере в вершинах тетраэдра. Такую конфигурацию можно наблюдать в тонкой жидкокристаллической оболочке [31, 32]. Однако, если сфера является границей нематической капли или изотропной капли в нематической среде, такая конфигурация обычно не реализуется. Причина состоит в том, что ориентация директора на поверхности капли и в объеме нематической фазы (внутри капли или снаружи капли) должна быть согласована. В этом случае на поверхности образуются два дефекта с зарядом $S = +1$ каждый [6, 30]. Для твердой частицы или изотропной капли в нематической фазе дефекты представляют собой половины гиперболических ежей (рис. 1, *b*). Приведенное выше рассмотрение применимо как для планарной ориентации нематического директора на поверхности, так и для наклонной ориентации директора. В последнем случае проекция директора на поверхность образует упорядоченное поле, в котором образуются дефекты.

Описание наших результатов начнем с эксперимента, когда при нагревании в нематической фазе появляются изотропные капли. На рис. 2, *a* показаны маленькие капли после их образования.

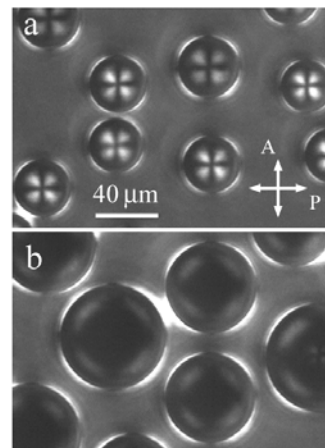


Рис. 2. Трансформация изотропных капель при увеличении их размера: *a* – диаметр капель меньше толщины ячейки. У верхнего полюса капли находится один точечный дефект (буджум). *b* – при нагреве размер капли увеличивается и становится больше толщины ячейки. Топологический дефект исчезает. Стрелками указана ориентация скрещенных поляризатора (P) и анализатора (A). Толщина ячейки $h = 40$ мкм

Fig. 2. Modification of the appearance of isotropic droplets with increasing of their size. *a* – The droplets are smaller than the cell thickness. There is one point defect (boojum) near the upper pole of each droplet. *b* – On heating the droplet size increased and became larger than the cell thickness. The topological defects disappeared. Arrows denote the orientation of crossed polarizer (P) and analyzer (A), respectively. Cell thickness $h = 40$ μm

В дальнейшем мы будем называть капли маленькими, если их поперечный размер меньше толщины ячейки. Как мы увидим, это критический размер капель. В центральной части каждой капли виден крест с четырьмя лучами. Темные лучи ориентированы параллельно поляризаторам (рис. 2, *a*). У капли имеется точечный топологический дефект. В соответствии с предыдущим обсуждением дефект можно характеризовать двумерным топологическим зарядом. Четыре темных луча, наблюдаемые в скрещенных поляризаторах, указывают на то, что дефект имеет единичный топологический заряд [2].

Для определения знака дефекта скрещенные поляризаторы вращались по часовой стрелке и против часовой стрелки (*Supplementary, fig. 1S, a–c*). Темные лучи вращались в том же направлении (соответственно, по часовой стрелке или против часовой стрелки). Эти результаты указывают, что заряд точечного дефекта $S = +1$. Радиальную и круговую ориентации можно отличить с помощью компенсатора (вращающейся кварцевой пластины), вставленного под углом 45° по отношению к поляризаторам (*Supplementary, fig. 1S, d*). Дефект при наличии компенсатора имеет два темных луча, ориентированных под углом -45° (перпендикулярно направлению медленной оси компенсатора). Яркими являются области, расположенные при $+45^\circ$ (параллельно медленной оси). Это означает, что проекция нематического директора на плоскость образца вокруг ядра дефекта ориентирована радиально (рис. 1, e).

При дальнейшем нагревании размер капли увеличивается и центральный дефект исчезает, когда размер капли становится порядка толщины ячейки (рис. 2, a, b). Трансформация вида капли, когда ее размер превышает толщину ячейки, происходит постепенно. Остаются лишь светлые области вблизи периферии капли. Центральная часть капли становится равномерно темной (рис. 2, b). Мы связываем исчезновение точечного дефекта с тем, что изотропная капля касается верхней поверхности ячейки.

При росте капель они касаются друг друга и сливаются. Динамика слияния (коалесценции) капель – важная тематика, которая в последние десятилетия интенсивно исследуется [33–38]. В наших экспериментах мы наблюдали своеобразную трансформацию топологии капель в результате слияния. Две капли перед слиянием показаны на рис. 3, a. Размер капель больше толщины ячейки, капли без точечных топологических дефектов. При слиянии образуется точечный топологический дефект в средней части капли (рис. 3, b). Образование топологического дефекта связано с тем, что при слиянии капли захватывают небольшое количество вещества из окружающей среды (в нашем случае – из нематической фазы). Захваченная нематическая фаза находится в так называемом «кармане» в центральной части изотропной капли возле поверхности ячейки.

Вращение скрещенных поляризаторов и наблюдения с компенсатором показывают, что дефект имеет топологический заряд $+1$ и радиальную

ориентацию директора. Директор в «кармане» имеет гибридную ориентацию: гомеотропную ориентацию на верхней поверхности (граница раздела твердое тело – нематическая фаза) и наклонную ориентацию на нижней поверхности (граница раздела изотропная жидкость – нематическая фаза). При нагревании можно наблюдать два противоположных процесса: уменьшение «кармана» с ростом температуры и его увеличение при слиянии с другими каплями. Четыре узкие яркие полосы возле границы капель (рис. 2, 3) можно связать с отклонением директора от планарной ориентации на интерфейсе нематическая фаза – изотропная жидкость из-за конического сцепления директора.

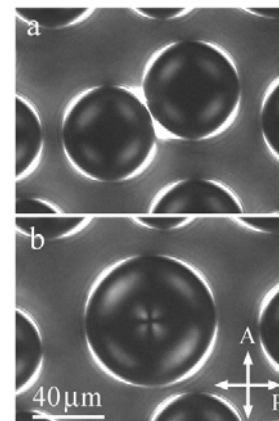


Рис. 3. a – Слияние изотропных капель. Исходные капли размером больше толщины ячейки без топологических дефектов. b – После слияния образовалась капля, в центре капли (на полюсе) виден топологический дефект

Fig. 3. a – Coalescence of isotropic droplets. Initial droplets with size greater than the cell gap do not have topological defects. b – After a coalescence, a single droplet has formed; a topological defect is visible in the center of the droplet (at the pole)

Рисунок 4 демонстрирует обратную трансформацию дефектов, когда температура и, соответственно, размер капли уменьшаются. Начальное состояние – большая капля с дефектом на полюсе (рис. 4, a), в центральной части капли имеется «карман» с веществом в нематической фазе. При охлаждении поперечный размер изотропной капли уменьшается. Вещество в нематической фазе постепенно выталкивается из «кармана», из-за чего размер и толщина «кармана» уменьшаются. В результате контраст дефекта уменьшается с уменьшением размера капли (рис. 4, b) и протяженность лучей дефекта становится меньше.

В конце концов дефект в центре капли исчезает вместе с исчезновением «кармана» (рис. 4, *c*). Заметим, что поперечный размер капли все еще больше толщины ячейки. Внешний вид капли на этой стадии такой же, как у капли размером больше h , образовавшейся при нагреве (рис. 2, *b*). Когда при охлаждении размер капли становится меньше толщины ячейки, в центральной части капли снова появляется дефект (рис. 4, *d*). Этот дефект сохраняется до тех пор, пока капля полностью не исчезнет.

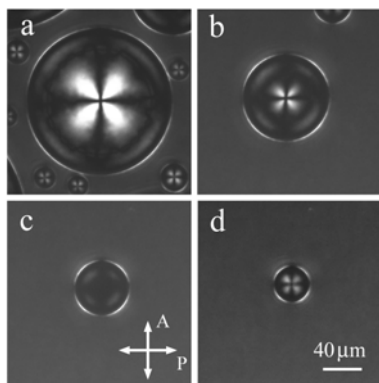


Рис. 4. Эволюция изотропной капли при уменьшении ее размера. *a* – Капля изотропной жидкости больше толщины ячейки с дефектом в ее центральной части. Размер капли уменьшается при охлаждении (*b*), затем дефект исчезает (*c*). Когда капля становится меньше толщины ячейки, в центре капли снова появляется дефект (*d*)

Fig. 4. Evolution of an isotropic droplet on decreasing its size. *a* – A droplet of isotropic liquid larger than cell thickness with a defect in its central part. The droplet size decreases on cooling (*b*), and then the defect disappears (*c*). When the droplet becomes smaller than the cell thickness, the defect in the droplet center reappears (*d*)

При непрерывном нагревании можно получить очень крупные капли изотропной фазы диаметром несколько сотен микрометров (*Supplementary, fig. 2S, a, d*). Их эволюция при охлаждении зависит от скорости охлаждения. При медленном охлаждении (0,1–0,2 °C/мин, *Supplementary, fig. 2S, a–c*) капля остается односвязной по мере уменьшения ее размера. В капле образуется большое количество топологических дефектов (*Supplementary, fig. 2S, b*), что связано с появлением слоя нематической фазы на верхней поверхности капли [29]. Топологические дефекты противоположного знака притягиваются и анниги-

лируют друг с другом, так что их число со временем уменьшается. В результате в центральной части капли может остаться один топологический дефект (*Supplementary, fig. 2S, c*). Дальнейшая трансформация такой капли при охлаждении происходит по сценарию, представленному на рис. 4. При быстром охлаждении ($> 0,3$ °C/мин, *Supplementary, fig. 2S, d–f*) в капле также образуются топологические дефекты (*Supplementary, fig. 2S, e*). Однако в ряде экспериментов мы наблюдали переход вещества в центральной части капли в нематическую фазу с образованием тороидальной изотропной капли (*Supplementary, fig. 2S, f*). При дальнейшем охлаждении изотропный тороид распадается на более мелкие односвязные капли. Дальнейшее поведение этих капель такое же, как показано на рис. 4.

Рассмотрим образование и исчезновение дефектов с точки зрения топологии. Начнем с маленьких капель на поверхности ячейки (рис. 2, *a*; рис. 4, *d*). Пересечение поверхности капли с поверхностью стеклянной пластины топологически эквивалентно «дырке» в сфере. Напомним, что эйлерова характеристика сферической поверхности с n «дырками» равна $\chi = 2 - n$. Из этого выражения следует, что эйлерова характеристика поверхности капли, находящейся на стеклянной пластине, должна быть равна $\chi = 1$. Изотропная капля на поверхности схематически показана на рис. 5. На верхнем полюсе капли находится один топологический дефект $S = +1$ (рис. 5, *a*). Реальная структура дефектов зависит от величин упругих констант Франка и силы сцепления директора с поверхностью. Абсолютная величина констант Франка в E7 порядка 10 пН. Отношение констант продольного (K_{33}) и поперечного (K_{11}) изгиба $K_{33}/K_{11} \sim 1.7$ при низкой температуре [39, 40], существенно уменьшается при нагреве, составляя ~ 1.1 вблизи перехода в изотропную жидкость [39]. Из этих данных следует, что топологический дефект радиального типа более выгоден, чем круговой, однако разница энергии вблизи температуры перехода небольшая. Отношение упругой константы кручения K_{22} и константы поперечного изгиба $K_{22}/K_{11} \sim 0,3$ практически не зависит от температуры [39]. Анизотропия вязкости и малая разница величин упругих констант K_{11} и K_{33} при наличии потока вещества вблизи поверхности капли может приводить к образованию закрученной структуры [29].

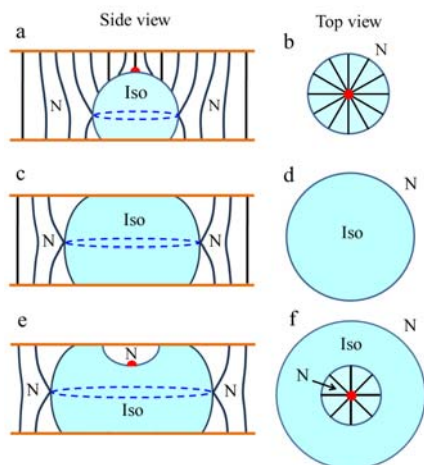


Рис. 5. *a, b* – Схематическое изображение изотропной капли на поверхности нематической ячейки с гомеотропным поверхностным сцеплением. Вид сбоку (*a*), вид сверху (*b*). Высота капли меньше толщины ячейки. Сплошными линиями показана ориентация директора. На верхнем полюсе капли имеется дефект с зарядом $S = +1$. (*c–d*) – капли, соприкасающиеся с обеими поверхностями ячейки без топологических дефектов. (*e–f*) – крупная капля, образовавшаяся в результате слияния двух капель. (*e*) – карман нематической фазы вблизи поверхности ячейки. (*e, f*) – Дефект $+1$ образуется в середине капли. Пунктирные линии на (*a*), (*c*) и (*e*) обозначают круговой линейный дефект («кольцо Сатурна»)

Fig. 5. *a, b* – Schematic representation of an isotropic droplet at the surface of nematic cell with homeotropic surface anchoring. Side view (*a*), top view (*b*). Droplet height is less than the cell gap. Solid lines show the orientation of the director. A defect with charge $S = +1$ exists at the upper pole of the droplet. (*c, d*) – Droplets in contact with both surfaces of the cell without topological defects. (*e, f*) – A large droplet formed as a result of coalescence of two droplets. (*e*) – A pocket of nematic phase is preserved near the surface of the cell. (*e, f*) – A $+1$ defect is observed in the middle of the droplet. The dashed lines in (*a*), (*c*) and (*e*) denote the circular linear defect (“Saturn ring”)

Существование одного топологического дефекта $S = +1$ коррелирует с топологией. Напомним, что на поверхности ячейки реализуется сильное гомеотропное сцепление (директор перпендикулярен поверхности ячейки). На поверхности капли (на интерфейсе нематическая фаза – изотропная жидкость) сцепление директора азимутально вырожденное коническое с углом наклона относительно нормали $55\text{--}60^\circ$ [27, 30]. Это сцепление слабое (энергия $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ Дж/м² [41]). В случае малой толщины нематической прослойки между поверхностью ячейки и изотропной каплей (порядка микрона) ориентация на поверхности ячейки до-

минирует и директор может во всей пленке ориентироваться перпендикулярно плоскости ячейки. Коническое сцепление может также приводить к образованию кругового линейного дефекта («кольцо Сатурна») на экваторе капли [17, 30]. Этот дефект показан на рис. 5 пунктирной кривой. «Кольцо Сатурна» проявляется в виде ярких полос вокруг капль (рис. 2, *a*).

Когда размер капли увеличивается, и она касается верхней поверхности ячейки, происходит топологический переход. Число «дырок» теперь $n = 2$ (на нижней и верхней внутренних поверхностях ячейки), таким образом, эйлерова характеристика капли становится равной нулю ($\chi = 0$). Это приводит к исчезновению точечного дефекта в соответствии с топологическими требованиями (рис. 5, *c, d*). На боковой поверхности капли также существует «кольцо Сатурна» (рис. 5, *c*).

Еще одно изменение топологии происходит при слиянии капель: между каплей и поверхностью ячейки образуется «карман» нематической фазы (рис. 3). Нематический «карман» (схематически показанный рис. 5, *e, f*) – объект, обратный маленькой изотропной капле в окружении нематической фазы (рис. 5, *a, b*). Его эйлерова характеристика $\chi = 1$. Таким образом, существование дефекта с $S = +1$ в «кармане» также коррелирует с топологией. Эйлерова характеристика тороидальной капли (Supplementary, fig. 2S, *f*), равна нулю, поэтому тороид может существовать без топологических дефектов, что и наблюдается в эксперименте.

Выводы

Используя изотропные капли в нематической среде, мы реализовали последовательность переходов между различными топологическими состояниями. Наши эксперименты демонстрируют возможность изменения количества топологических дефектов с положительным топологическим зарядом. Мы определили характеристики топологических дефектов и капель на разных стадиях их эволюции.

Благодарность: работа была поддержана Российским научным фондом (грант 23-12-00200). Мы благодарим профессора В.П. Минеева за многочисленные и полезные обсуждения.

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (grant 23-12-00200). We thank Prof. V.P. Mineev for numerous and useful discussions.

Список источников / References

1. Gennes P.G. de, Prost J. The Physics of Liquid Crystals. 2nd Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
2. Kleman M., Lavrentovich O.D. Soft matter physics: an introduction. Springer, New York, 2003.
3. Volovik G.E., Lavrentovich O.D., The topological dynamics of defects: boojums in nematic drops. *JETP*, 1983, **58** (6), 1159–1166.
4. Lavrentovich O.D., Terent'ev E.M. Phase transition altering the symmetry of point topological defects (hedgehogs) in a nematic liquid crystal. *Sov. Phys. JETP*, 1986, **64** (6), 1237–1245.
5. Lubensky T.C., Pettey D., Currier N., Stark H. Topological defects and interactions in nematic emulsions. *Phys. Rev. E* 1998, **57**, 610. DOI: 10.1103/PhysRevE.57.610
6. Stark H. Physics of colloidal dispersions in nematic liquid crystals. *Phys. Rep.*, 2001, **351**, 386–474. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00144-7.
7. Mušević I., Škarabot M., Tkalec U., Ravnik M., Žumer S. Two-dimensional nematic colloidal crystals self-assembled by topological defects. *Science*, 2006, **313**, 954–958. DOI: 10.1126/science.1129660.
8. Senyuk B., Liu Q., He S., Kamien R.D., Kusner R.B., Lubensky T.C., Smalyukh I.I. Topological colloids. *Nature*, 2013, **439**, 200–205. DOI: 10.1038/nature11710.
9. Stannarius R., Harth K. Defect interactions in anisotropic two-dimensional fluids. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, **117**, 157801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.157801.
10. Абдуллаев А. С., Крахалев М. Н., Зырянов В. Я. Фотоиндуцированная трансформация ориентационной структуры хирального нематика с планарно-коническим сцеплением // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2024. Т. 24, № 1. С. 90–95. [Abdullaev A.S., Krakhalev M.N., Zyryanov V.Y. Photoinduced transformation of the orientational structure of a chiral nematic under planar-conical anchoring. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (1), 90–95. DOI: 10.18083/LCAppl.2024.1.90].
11. Gu Y., Abbott N.L. Observation of saturn-ring defects around solid microspheres in nematic liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**, 4719–4722. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.4719.
12. Долганов П. В., Болотин Б. М. Ориентационные дефекты в свободно подвешенных смектических С пленках // *Письма в ЖЭТФ*. 2003. Т. 77, № 3. С. 503–508. [Dolganov P.V., Bolotin B.M. Orientation defects in freely suspended smectic C films. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2003, **77** (8), 429–433. DOI: 10.1134/1.1587178].
13. Kleman M., Lavrentovich O.D. Topological point defects in nematic liquid crystals. *Phil. Mag.*, 2006, **86**, 4117–4137. DOI: 10.1080/14786430600593016.
14. Ravnik M., Škarabot M., Žumer S., Tkalec U., Poberaj I., Babič D., Osterman N., Mušević I. Entangled nematic colloidal dimers and wires. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**, 247801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.247801.
15. Alexander G.P., Chen B.G., Matsumoto E.A., Kamien R.D. Colloquium: Disclination loops, point defects, and all that in nematic liquid crystals. *Rev. Mod. Phys.*, 2012, **84**, 497.
16. Rudyak V.Y., Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya., Liu J.-H., Emelyanenko A.V., Khokhlov A.R. Electrically induced structure transition in nematic liquid crystal droplets with conical boundary conditions. *Phys. Rev. E*, 2017, **96**, 052701. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.052701.
17. Dolganov P.V., Spiridenko N.A., Dolganov V.K. Statics and dynamics of point boojums, line and modified Saturn ring topological defects in nematic confined geometry. *Eur. Phys. J. E*, 2023, **46**, 121. DOI: 10.1140/epje/s10189-023-00387-3.
18. Харламов С. С., Шмелева Д. В., Пасечник С. В., Захаров А. В. Вызванные электрическим полем кинк-образные волны в жидких кристаллах // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 3. С. 46–53. [Kharlamov S.S., Shmeliova D.V., Pasechnik S.V., Zakharov A.V. Electrically driven kink-like distortion waves in liquid crystals. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (3), 46–53. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.3.46].
19. Wu J.B., Wu S.B., Hu W. Azimuthal orientation guided topological defect evolution across the nematic-smectic phase transition. *Phys. Rev. B*, 2023, **108**, 224107. DOI: 10.1103/PhysRevB.108.224107.
20. Poénaru V. Elementary algebraic topology related to the theory of defects and textures. *Ill-Condensed Matter: Les Houches Sessions XXXI*. World Scientific, 1983, 263–319.
21. Munkres J.R. Elements of algebraic topology. Addison-Wesley, 1984. 468 p. DOI: 10.1201/9780429493911.
22. Fumeron S., Berche B. Introduction to topological defects: from liquid crystals to particle physics. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2023, **232**, 1813–1833. DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-00803-x.
23. Polyakov A.M. Isomeric states of quantum fields. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1975, **68** (6), 1975–1990.
24. Kibble T.W.B. Topology of cosmic domains and strings. *J. Phys. A*, 1976, **9** (8), 1387. DOI: 10.1088/0305-4470/9/8/029.
25. Stein D.L., Pisarski R.D., Andesson P.W. Boojums in superfluid ³He-A and cholesteric liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **40** (19), 1269–1272. DOI: 10.1103/PhysRevLett.40.1269.
26. Wang W., Hashimoto T. Symmetry-breaking and symmetry-recovering occurring during coalescence of nematic droplets with a bipolar structure. *Liq. Cryst.*, 1996, **20**, 669–672. DOI: 10.1080/02678299608031158.

27. Dolganov P.V., Spiridenko N.A. Birth and annihilation of topological defects on the nematic-isotropic interface during droplet coalescence. *Liq. Cryst.*, 2022, **49** (14), 1933–1941. DOI: 10.1140/epje/s10189-023-00387-3.
28. Koizumi R., Golovaty D., Alqarni A., Li B.X., Sternberg P.J., Lavrentovich O.D. Topological transformations of a nematic drop. *Sci. Adv.*, 2023, **9** (27), eadf3385 (11 p.). DOI: 10.1126/sciadv.adf3385.
29. Dolganov P.V., Spiridenko N.A., Dolganov V.K. Ordered structures formed by nematic topological defects and their transformation with changing the Euler characteristics. *Phys. Rev. E*, 2024, **110**, 024703. DOI: 10.1103/PhysRevE.110.024703.
30. Kim Y.K., Shiyonovskii S.V., Lavrentovich O.D. Morphogenesis of defects and tactoids during isotropic-nematic phase transition in self-assembled lyotropic chromonic liquid crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2013, **25**, 404202. DOI: 10.1088/0953-8984/25/40/404202.
31. Fernández-Nieves A., Vitelli V., Utada A.S., Link D.R., Márquez M., Nelson D.R., Weitz D.A. Novel defect structures in nematic liquid crystal shells. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**, 157801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.157801.
32. Lopez-Leon T., Bates M.A., Fernández-Nieves A. Defect coalescence in spherical nematic shells. *Phys. Rev. E*, 2012, **86**, 030702(R). DOI: 10.1103/PhysRevE.86.030702.
33. Eggers J., Lister J.R., Stone H.A. Coalescence of liquid drops. *J. Fluid Mech.*, 1999, **401**, 293–310. DOI: 10.1017/S002211209900662X.
34. Wu M., Cubaud T., Ho C.M. Scaling law in liquid drop coalescence driven by surface tension. *Phys. Fluids*, 2004, **16** (7), 51–54. DOI: 10.1063/1.1756928.
35. Paulsen J.D., Burton J.C., Nagel S.R. Viscous to inertial crossover in liquid drop coalescence. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106** (11), 114501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.114501.
36. Rahman M.M., Lee W., Iyer A., Williams S.J. Viscous resistance in drop coalescence. *Phys. Fluids*, 2019, **31** (1), 012104. DOI: 10.1063/1.5064706.
37. Klopp C., Tittel T., Stannarius R. Self similarity of liquid droplet coalescence in a quasi-2D free-standing liquid-crystal film. *Soft Matter*, 2020, **16** (19), 4607–4614. DOI: 10.48550/arXiv.2002.04854.
38. Dolganov P.V., Zverev A.S., Baklanova K.D., Dolganov V.K. Dynamics of capillary coalescence and breakup: Quasi-two-dimensional nematic and isotropic droplets. *Phys. Rev. E*, 2021, **104**, 014702. DOI: 10.1103/PhysRevE.104.014702.
39. Hakemi H., Jagodzinski E.F., DuPré D.B., Temperature Dependence of the Anisotropy of Turbidity and Elastic Constants of Nematic Liquid Crystal Mixture E7. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1983, **91** (1–2), 129–136. DOI: 10.1080/00268948308083080.
40. Chen H., Zhu R., Zhu J., Wu S.-T., A simple method to measure the twist elastic constant of a nematic liquid crystal. *Liq. Cryst.*, 2015, **42** (12), 1738–1742. DOI: 10.1080/02678292.2015.1070925.
41. Haputhanthrige N.P., Paladudu S., Lavrentovich M.O., Lavrentovich O.D., Trapping of isotropic droplets by disclinations in nematic liquid crystals controlled by surface anchoring and elastic constant disparity. *Phys. Rev. E*, 2024, **109**, 064703. DOI: 10.1103/PhysRevE.109.064703.

Вклад авторов:

¹Долганов П. В. – разработка концепции научной работы, проведение исследований, подготовка иллюстраций, написание текста статьи.

²Спириденко Н. А. – проведение исследований, подготовка иллюстраций, редактирование текста статьи.

³Долганов В. К. – разработка концепции научной работы, консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹Dolganov P. V. – development of the concept of scientific work, conducting research, preparing illustrations, writing the text of the article.

²Spiridenko N. A. – conducting research, preparing illustrations, editing the text of the article.

³Dolganov V. K. – development of the concept of scientific work, consultation on planning, methodology and research implementation, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

¹<https://orcid.org/0000-0003-4906-0488>

²<https://orcid.org/0000-0002-2604-9414>

³<https://orcid.org/0000-0002-7898-2521>

Поступила 28.05.2025; одобрена 23.06.2025; принята 4.08.2025
Received 28.05.2025; approved 23.06.2025; accepted 4.08.2025