

УДК 532.783

О. А. Скалдин, Ю. И. Тимиров, Е. Р. Гареева

**КАПЛИ НЕМАТОХОЛЕСТЕРИКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ:
ДИНАМИКА ДЕФЕКТОВ, СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ**

**NEMATIC-CHOLESTERIC DROPLETS IN AN ELECTRIC FIELD:
DYNAMICS OF DEFECTS, STRUCTURAL TRANSFORMATIONS**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт физики молекул и кристаллов» Уфимского научного центра РАН
450075 Уфа, пр. Октября, д. 151

Экспериментально изучена динамика и взаимопревращение дефектов в нематохлестерических каплях в электрическом поле. Показано, что в зависимости от соотношения радиуса капли к величине равновесного шага спирали R/P и приложенного напряжения могут быть реализованы различные ориентационно-структурные превращения. В частности, при соотношении $R/P < 1$ наблюдаются капли с одним разрушенным бужумом, которые начинают вращаться при приложении переменного электрического поля. При достижении некоторого порогового значения напряжения начинается процесс образования линейной цепочки дефектов, на конце которой находится «еж». В случае $R/P \approx 1$ динамика вращения цепочки дефектов трансформируется в процесс периодического распада бужума на два поверхностных дефекта.

Ключевые слова: нематохлестерик, жидкие кристаллы, динамика дефектов, ориентационные структуры.

The structural transformations and dynamics of defects in nematic-cholesteric droplets in an electric field have been studied experimentally. It was shown that the director configuration in droplets and the type of orientation-structural transformations depended on the ratio between the droplet radius and the equilibrium helical pitch R/P as well as the applied voltage magnitude. In particular, at the $R/P < 1$ ratio only droplets with single destroyed boojum were observed. In a.c. electric field such droplets rotate slowly, but above some threshold voltage boojums are converted into defect strings ended with a «hedgehog». In the case of the $R/P \approx 1$ ratio the rotation dynamics of defect strings was changed to a periodical process of boojum transformation into two surface defects and back to initial boojum.

Key words: nematic-cholesteric mixtures, liquid crystals, dynamics of defects, orientational structures.

В последние годы значительный интерес исследователей вызывает изучение и использование в электрооптических устройствах анизотропных дисперсных сред, представляющих собой взвеси капель жидких кристаллов в изотропной жидкости либо в полимерных матрицах [1—3]. Это связано с рядом нетривиальных физических свойств жидких кристаллов (ЖК) в малых объемах с замкнутой геометрией, что позволяет, например, уменьшить времена отклика капсулированных жидких кристаллов (КЖК) на воздействие электрического поля, упростить оптические схемы считывания (без применения поляризаторов), создать гибкие ЖК-устройства большой площади и т. д. Кроме того, в КЖК развиваются более сложные ориентационные процессы, чем в электро-

оптических ячейках на основе однородных слоев ЖК; наблюдаются различные топологические дефекты («буджумы», «ежи», дисклинации, солитоны и т. д.) [4—6], которые играют важную роль в протекании оптических, полевых, гидродинамических и других эффектов.

Многообразие неоднородных распределений в КЖК чрезвычайно велико, и их природа тесно связана с характером упорядочения ЖК. Свойство, дающее возможность создавать требуемую ориентационную структуру КЖК посредством формирования соответствующих граничных условий, служит основой для функционирования всех современных электрооптических ЖК-устройств. Исследования локальных переходов Фредерикса [7] заложили основу для формирования нового подхода к управлению ЖК. Так, в [8] впервые наблюдался локальный переход Фредерикса для плоского слоя нематика, где в качестве возмущающего внешнего фактора выступало изменение температуры. Капли нематика с изменяющимися граничными условиями за счет вариации температуры рассматривались в работах [5, 6, 9]. В работах [10, 11] изучены неравновесные ориентационные структуры КПЖК, возникающие при модификации граничных условий за счет добавки гомеотропного сурфактанта в каплях нематика, диспергированного в полимерной матрице. В [5] теоретически предсказан и экспериментально продемонстрирован сценарий трансформации поля директора сферических капель нематика, диспергированных в изотропной жидкости.

В работе [12] был предложен и реализован новый метод управления ориентационной структурой капель ЖК, основанный на модификации поверхностного сцепления ионообразующими сурфактантами под действием электрического поля, который наиболее актуален для практических приложений.

Таким образом, дисперсные системы на основе ЖК являются объектами активных исследований в области физики конденсированных сред. Однако в основном изучаются равновесные ориентационные переходы, в то время как динамика структурных превращений и дефектообразования в закритичной области неустойчивости капель представлена незначительно. В связи с этим целью данной работы является исследование динамики циклических процессов распада и слияния дефектов в каплях слабого нематохолестерика, инициируемых переменным электрическим полем.

Методика эксперимента

Исследуемые образцы представляют собой смесь на основе нематического ЖК 4-метоксибензилиден-4'-*n*-бутиланилина и холестерического ЖК – холестерилхлорида в пропорции 1:0,0017 и 1:0,0022 весовых долей. Для определения шага спирали полученных смесей был использован метод, представленный в [13], со значениями равновесного шага $P = 72$ мкм и $P = 54$ мкм соответственно. ЖК-ячейка размещалась на термостолке HCS250 (Instec, США) с термостабилизацией лучше 0,01 °С. Термостолк располагался на вращающемся предметном столике поляризационно-оптического микроскопа AxioImager A1.m (Carl Zeiss, Германия). Для получения капель в изотропном окружении расположенная в термостолке ЖК-ячейка перегревалась для полного перехода ЖК в изотропное состояние. Затем ячейка медленно охлаждалась до появления зародышей мезофазы, которые далее укрупнялись до образования ЖК-капель нужного размера. Величина получаемых капель регулировалась либо охлаждением для увеличения размеров, либо нагреванием для их уменьшения. Измерения размеров капель проводились в программном пакете AxioVision Rel.4.7 (Carl Zeiss, Германия) со встроенной системой определения размеров объекта. Точность определения размеров

капель была порядка 1 мкм. Полученные с помощью видеокамеры PCO VX-440 (Instec, Германия) экспериментальные изображения и последовательности видеоизображений отцифровывались с помощью фрейм-граббера Pinnacle USB-700 (Pinnacle System, Германия) с разрешением $720 \div 576$ пикселей и записывались на жесткий диск для дальнейшей обработки. К ЖК-слою прикладывалось переменное электрическое напряжение U с частотой $f = 50$ Гц.

Циклические процессы распада «бужума»

Рассмотрим структурные превращения в каплях с шагом P равновесного геликоида в диапазоне $54 \leq P \leq 72$ мкм и $R > 25$ мкм, где образуются капли с одним разрушенным бужумом (рис. 1, *а*, *б*) [10]. Состояния этих капель становятся нестационарными, т. е. они начинают вращаться при достижении порогового значения $U \approx 1.5$ В. При напряжении выше 3 В оптическая картина и динамика капли становятся более сложными, т. е. появляется одномерная цепочка дисклинаций (рис. 1, *з*), которая также продолжает вращаться. Детальное изучение ее структуры показало, что данное образование состоит из цепочки точечных дефектов, на конце которой находится «еж», в пользу чего говорит наличие в теле капли четырех изогир, сходящихся к концу данной цепочки (см. рис. 1, *з*). Было также установлено, что длина цепочки зависит от приложенного напряжения U , т. е., в конечном счете, этот процесс является следствием роста упругих напряжений внутри капли. Количество же дефектов в цепочке должно удовлетворять ограничениям, определяемым теоремами Пуанкаре и Гаусса [6], т. е., ко всему прочему они должны быть ещё и разного знака. Кроме того, такая цепочка, как будет показано ниже, при соответствующих условиях может быть неустойчивой.

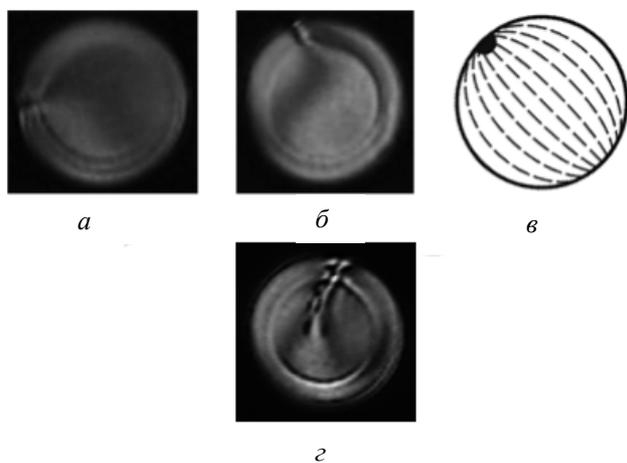


Рис. 1. Изображения капли с одним разрушенным бужумом – (*а*), (*б*), где (*в*) схематическое изображение распределения поля директора в ней, (*з*) вращающаяся линия цепочки дефектов ($R = 50$ мкм)

Для этих капель (рис. 1) были определены угловые скорости вращения ω как функция приложенного напряжения U с учетом их радиусов R . Как следует из графиков (рис. 2), угловая скорость вращения дефекта растет с напряжением, причем в каплях с меньшим радиусом скорость вращения выше. Кроме того, можно выделить две области на кривой зависимости $\omega(U)$ (рис. 2) для капель с $R \leq 50$ мкм, которые разделены точкой перегиба $U \approx 6.4$ В. При электрическом напряжении до точки перегиба вращение капли может быть связано с электромеханическим

эффектом [14], когда угловая скорость $\omega \sim E$,

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{v_e E}{3\gamma_1} \sim U, \quad (1)$$

где ν_e – коэффициент электромеханического сцепления, γ – динамический коэффициент вязкости НХЖК. Как следует из выражения (1), угловая скорость $\omega \sim E$, а значит, также $\omega \sim U$, что достаточно хорошо согласуется с экспериментом (рис. 2). При значениях $6.4 < U < 6.8$ В имеет место переходная область включения электроконвективного механизма, а далее угловая скорость $\omega \cong U^2$. Из уравнения Навье-Стокса с учетом электрических сил получаем следующее [15]

$$\eta \Delta v = E \delta q, \quad (2)$$

где η – обычный коэффициент вязкости, v – конвективная скорость, δq – аккумулярированный связанный объемный заряд в ЖК за счет анизотропии проводимости.

С учетом уравнения Пуассона

$$\text{div } \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon} \delta q, \quad (3)$$

из (2) следует

$$v \sim E^2 \sim U^2. \quad (4)$$

А поскольку в циклическую частоту ω имеется вклад скорости электроконвективного движения, то для нее из выражения (4) качественно получаем

$$\omega \sim v \sim U^2. \quad (5)$$

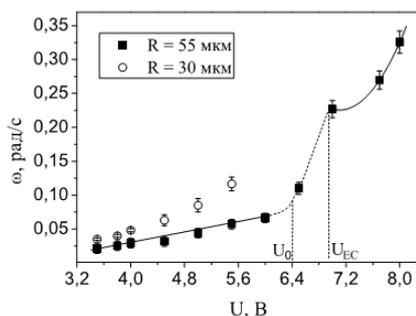


Рис. 2. Зависимость угловой скорости вращения капли с разрушенным буджом от приложенного напряжения U для $P = 72$ мкм

Последнее также хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью (рис. 2). Как было сказано выше, в этом случае трансформация структуры капли приводит к вращению уже линейной цепочки дефектов (рис. 1, z), при этом равновесный шаг холестерической спирали $P = 72$ мкм, а радиус капли $R \approx 25$ мкм.

Если уменьшить шаг спирали до 54 мкм, то в каплях размером $R \geq 50$ мкм, как было сказано выше, начинается процесс периодического рождения и аннигиляции двух поверхностных дефектов (рис. 3). Он может происходить в силу следующих причин. Во-первых, в данном случае в объеме капли имеется один «еж», причем сильно деформированный, что хорошо видно на рис. 3, e , а его образование является следствием отрыва буджума от поверхности, например, за счет локального изменения граничных условий [6]. Во-вторых, поскольку это состояние является динамически неустойчивым, то смещение «ежа» обратно к поверхности приводит к рождению пары диаметрально расположенных поверхностных дефектов, которые, взаимодействуя, аннигилируют. Это фактически можно интерпретировать как периодический распад буджума на два поверхностных дефекта (рис. 3, b). Здесь же (рис. 3) приводится последовательность фаз движения поверхностных дефектов от распада (рис. 3, b, d) до слияния (рис. 3, $в, e$), которое завершает цикл превращений (рис. 3, $a - e$). Порог начала этого процесса приблизительно $U_{th} \approx 5$ В (рис. 4). Следует отметить, что в отличие от схемы перехода от «ежа» к биполярной капле в чистом нематике в случае каплей слабого нематохолестерика (рис. 3, $a - e$) итоговая конфигурация биполярной капли является слабо скрученной. Именно благодаря этой скрученности в исследуемых каплях, вероятнее всего, и образуется пара стенок, изображенных на рис. 3, b, d .

Для этого случая, а именно, процесса периодического распада буджума на два поверхностных дефекта, были определены зависимости угловой скорости от величины приложенного напряжения (рис. 4), которые коррелируют с зависимостями, изображенными на рис. 2. А именно, в области напряжений $U \leq U_{th}$ (рис. 4), где циклическое движение структурных особенностей-дефектов предположительно обусловлено электромеханическим эффектом, эти зависимости подобны.

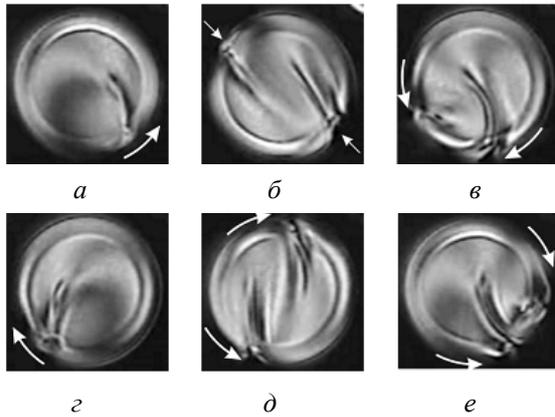


Рис. 3. Изображения циклического движения капель при напряжении $U = 5.5$ В (а) – (е). Стрелками показаны поверхностные дефекты и направления их движения ($R = 50$ мкм)

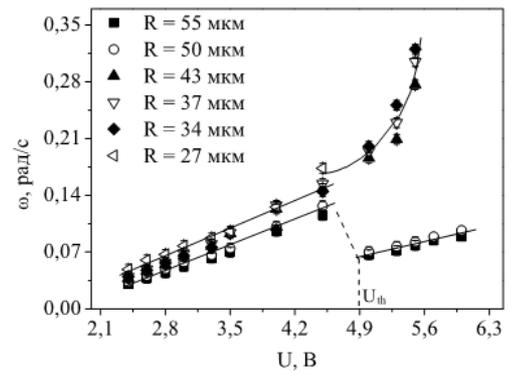


Рис. 4. Зависимость периода циклического распада буджума от приложенного напряжения U для капель с различными радиусами R и шагом спирали $P = 54$ мкм

По мере приближения к пороговым значениям электрического поля развитие электроконвекции в каплях $R/P \cong 1$ инициирует процесс периодического распада буджума на два поверхностных дефекта с последующим их слиянием. На рисунке 4 этому соответствует скачок ω ($R \geq 50$ мкм) в сторону ее уменьшения, для более же мелких капель при $U \geq U_{th}$ характерен нелинейный рост скорости вращения линейной цепочки точечных дефектов и отсутствие процессов деления.

Заключение

Таким образом, из полученных данных следует, что для капель нематохолестерика выше порога динамической неустойчивости структурные особенности – точечные дефекты, их цепочки и т. д. становятся нестационарными. В частности, начинают вращаться капли с одним буджумом, механизм которого предположительно связан с электромеханическим эффектом. При $R/P \approx 1$ конфигурация капли становится неустойчивой, начинается периодический процесс распада разрушенного буджума на два поверхностных точечных дефекта с последующим их слиянием, что завершает период пре-вращений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 12-02-97039 и финансовой поддержке компании ОПТЭК.

**Список использованной литературы**

1. *Жаркова Г. М., Сонин А. С.* Жидкокристаллические композиты. Новосибирск : Наука, 1994. 224 с.
2. *Ковальчук А. В., Курик М. В., Лаврентович О. Д.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 5. С. 44.
3. *Klosowicz S. J., Zmija J.* // Optical Engineering. 1995. Vol. 34, № 12. P. 3440.
4. *Crawford G. P., Zumer S.* Liquid Crystals in Complex Geometries. London : Taylor & Francis Publ., 1996. 584 p.
5. *Воловик Г. Е., Лаврентович О. Д.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 85, вып. 6. С. 1997.
6. *Курик М. В., Лаврентович О. Д.* // УФН. 1988. Т. 154, вып. 3. С. 381.
7. *Dubois-Violette E., De Gennes P. G.* // J. de Phys. Lett. 1975. Vol. 36. L-255.
8. *Ryschenkow G., Kleman M.* // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 64, № 1. P. 404.
9. *Сутормин В. С., Крахалев М. Н., Прищепина О. О.* // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. 2009. Т. 2, № 3. С. 352—359.
10. *Прищепина О. О., Зырянов В. Я.* // Вестн. Краснодар. гос. ун-та. 2005. Вып. 4. С. 82—88.
11. *Prischepa O. O., Shabanov A. V., Zyryanov V. Ya.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2005. Vol. 438. P. 141—150.
12. *Зырянов В. Я., Крахалев М. Н., Прищепина О. О., Шабанов А. В.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86, вып. 6. С. 440—445.
13. *Скалдин О. А., Тимиров Ю. И., Лебедев Ю. А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 19. С. 23—30.
14. *Madhusudana N. V., Pratibha R.* // Liquid Crystals. 1989. Vol. 5. P. 1827—1840.
15. *Блинов Л. М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с.

Поступила в редакцию 27.09.2012 г.