

УДК 532.783

А. М. Паршин^{1,2}, В. Г. Назаров², В. А. Гуняков^{1,2}, В. Я. Зырянов^{1,3}, В. Ф. Шабанов^{1,3}

СТРУКТУРНЫЙ ПЕРЕХОД В КАПСУЛИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОМ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

STRUCTURAL TRANSITION IN POLYMER DISPERSED LIQUID CRYSTALS PREPARED UNDER MAGNETIC FIELD

¹Институт физики им. Л. В. Киренского, КИЦ, СО РАН,
660036 Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: parshin@iph.krasn.ru

²Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, пр. Свободный, 79

³Сибирский государственный аэрокосмический университет,
660014 Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 31

Рассматривается спонтанный структурный переход в каплях нематических жидких кристаллов 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) и 4-н-пентил-4'-цианофенилциклогексан (5ФЦГ), капсулированных в поливинилбутиральной матрице в присутствии магнитного поля. Капли нематиков 5ЦБ, сформированные в присутствии магнитного поля $H^ < 4$ кЭ и 5ФЦГ при $H^* < 5$ кЭ, имеют классическую биполярную структуру. Если $H^* > 4$ кЭ, то в ансамбле капель 5ЦБ наблюдаются также однородные и радиальные структуры. В каплях 5ФЦГ, сформированных при $H^* > 5$ кЭ, проявляется тенденция выстраивания биполярных осей вдоль направления поля. Радиальные структуры в каплях 5ФЦГ отсутствуют. В интервале температур $t = (24 \div 34)^\circ\text{C}$ для 5ЦБ и $t = (32 \div 54)^\circ\text{C}$ для 5ФЦГ в каплях может происходить спонтанный циклический переход между биполярной конфигурацией директора и однородной структурой. Кроме того обсуждается второй вариант структурного перехода: биполярная – радиальная конфигурация.*

Ключевые слова: капсулированный полимером жидкий кристалл, капля нематика, конфигурация директора, магнитное поле, структурный переход.

The structural transition within the nematic liquid crystal droplets of 4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB) and 4-n-pentyl-4'-cyanophenyl-cyclohexane (5PCN) encapsulated in polyvinylbutyral matrix under magnetic field is reviewed. The nematic 5CB droplets formed under magnetic field $H^ < 4$ kOe as well as the 5PCN droplets formed under $H^* < 5$ kOe possess the classical bipolar structure. If $H^* > 4$ kOe, the uniform and radial structures are observed also in ensemble of the 5CB droplets. A tendency to align the bipolar axes along the field is revealed within the 5PCN droplets formed under $H^* > 5$ kOe. The radial structures inside the 5PCN droplets are absent. The spontaneous cyclic transition between the bipolar director configuration and homogenous structure can occur within the droplets in the temperature ranges $t = (24 \div 34)^\circ\text{C}$ for 5CB as well as $t = (32 \div 54)^\circ\text{C}$ for 5PCN. Moreover the second variant of structural transition: bipolar configuration – radial one is discussed.*

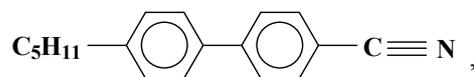
Key words: polymer dispersed liquid crystal, nematic droplet, director configuration, magnetic field, structural transition.

Введение

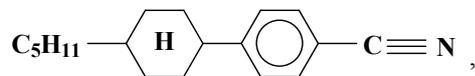
Исследование капсулированных полимером жидких кристаллов (КПЖК) открывает богатое многообразие ориентационных структур и их взаимопревращений, обусловленных уникальными свойствами мезофазы, в особенности, высокой чувствительностью к воздействию ограничивающего материала и внешних факторов [1, 2]. Изменение конфигурации директора внутри капле приводит к изменению оптических характеристик прошедшего через ансамбль капле света, что обеспечивает возможность широкого практического применения КПЖК пленок. Стандартные методы приготовления пленок, одним из которых является технология фазового разделения ЖК и полимера при испарении растворителя, позволяют получить капли нематика как с биполярной, так и с радиальной структурой, при этом конфигурация директора определяется, соответственно, тангенциальными или нормальными граничными условиями. С другой стороны, можно добиться изменения граничных условий и, варьируя температуру, плавно изменять угол между директором и нормалью к поверхности [3], если использовать полимерную матрицу с поверхностно-активным веществом, благодаря чему на границе ЖК – полимер есть силы, ответственные за тангенциальное упорядочение ЖК, и силы, дающие нормальную ориентацию. Это приводит к взаимопревращению между биполярной и радиальной структурами. Изменение концентрации сурфактанта, вводимого в раствор при формировании КПЖК пленок, расширяет многообразие структурных переходов, открывая новые устойчивые конфигурации [4]. Внешнее электрическое или магнитное поле, используемое при фазовом разделении, является дополнительным фактором, влияющим на формирование межфазной границы в КПЖК пленке. Поле, прикладываемое к капле в процессе ее формирования, за счет воздействия нематика на пластичную полимерную матрицу, способствует образованию ориентационной структуры, которая сохраняется после его выключения. Так, в фотоотверждающейся полимерной пленке, приготовленной в электрическом или магнитном поле, обнаружено существенное улучшение оптического пропускания нематика, полезное для практических применений [5]. Ориентация осей биполярных капле, приготовленных в присутствии магнитного поля методом фазового разделения ЖК и полимера при испарении растворителя, и оптическая анизотропия полученных пленок изучены в работах [6, 7]. Однако исследование структурных превращений в каплях нематиков, приготовленных в присутствии внешнего поля, ранее не проводилось. Следует отметить, что использование магнитного поля в эксперименте по сравнению с электрическим является более выгодным, поскольку устраняет из рассмотрения побочные эффекты, связанные с возможным накоплением заряда в каплях и возбуждением ионной проводимости в ЖК. В настоящей работе исследован структурный переход в КПЖК пленках, изготовленных по растворной технологии в присутствии магнитного поля.

Экспериментальная часть

Для приготовления КПЖК пленок использовались нематики 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) с последовательностью фазовых переходов (К – 22°C – Н – 34°C – И) и структурной формулой



и 4-*n*-пентил-4'-цианофенилциклогексан (5ФЦГ) с последовательностью фазовых переходов (К – 30°C – Н – 54°C – И) и структурной формулой



а также полимер поливинилбутираль.

Смесь ЖК и полимера в соотношении 2 : 3 растворялась в очищенном этиловом спирте и выливалась на стеклянную подложку. Образец устанавливался в зазор между полюсами электромагнита, и магнитное поле H^* прикладывалось в плоскости подложки в течение нескольких часов до полного испарения растворителя и образования КПЖК пленки. Изготовленные пленки вынимались из магнита и помещались в термостатируемую кювету. Изучение оптических текстур капель ЖК проводилось с использованием поляризационного микроскопа в геометрии скрещенных поляризаторов. Наблюдения показали, что пленки содержат ансамбли капель, имеющие в плоскости пленки форму эллипсоида со средним отношением длин полуосей $l = a/b \cong 1,1$ и размером $2a \cong 5 \div 15$ мкм.

Капли нематика 5ЦБ, сформированные в присутствии магнитного поля $H^* < 4$ кЭ, имеют классическую биполярную структуру (рис. 1, *a*), характерную для тангенциального поверхностного сцепления на границе раздела 5ЦБ/ПВБ. Биполярные оси капель хаотично ориентированы в плоскости композитной пленки, не коррелируя с направлением поля. Если биполярная ось совпадает с направлением одного из поляризаторов, то текстура капель содержит две полосы погасания, образующие крест, (поз. 1 на рис. 1, *a*). Если биполярная ось отклонена от направления поляризатора, то видны две темные дуги гиперболической формы (поз. 2 на рис. 1, *a*). Более узкая часть полос погасания выходит на буджумы, точечные поверхностные дефекты, являющиеся полюсами биполярной конфигурации. В поле $H^* = 4$ кЭ и более в КПЖК пленке наряду с биполярными конфигурациями (поз. 1, 2 на рис. 1, *b, в*) можно наблюдать также структуры, которые выглядят светлыми, если ось капли расположена под углом к поляризатору (поз. 3 на рис. 1, *b, в*). Изображение такой капли полностью затемняется, если ее ось совпадает с одним из поляризаторов, что наблюдается при повороте столика микроскопа. Отсутствие дисклинаций в этих каплях позволяет сделать заключение, что их ориентационная структура является практически однородной, т. е. директор во всех точках объема капли ориентирован преимущественно в одном и том же направлении. Такая структура наиболее близка к аксиальной конфигурации [2] без кольцевой экваториальной дисклинации и с высокой степенью упорядоченности директора в объеме капли. Кроме этого имеются капли с монополярными конфигурациями (поз. 4 на рис. 1, *b, з*), впервые обнаруженными и описанными в работе [4], а также радиальные структуры (поз. 5 на рис. 1, *b-з*). В радиальных структурах видны четыре полосы погасания, совпадающие с направлениями поляризаторов и образующие крест. Полосы сужаются к центру капли, где расположен точечный дефект-еж. Крест не изменяет своего положения относительно поляризаторов при вращении образца. Чем больше поле H^* , тем большее число капель имеет радиальную конфигурацию директора.

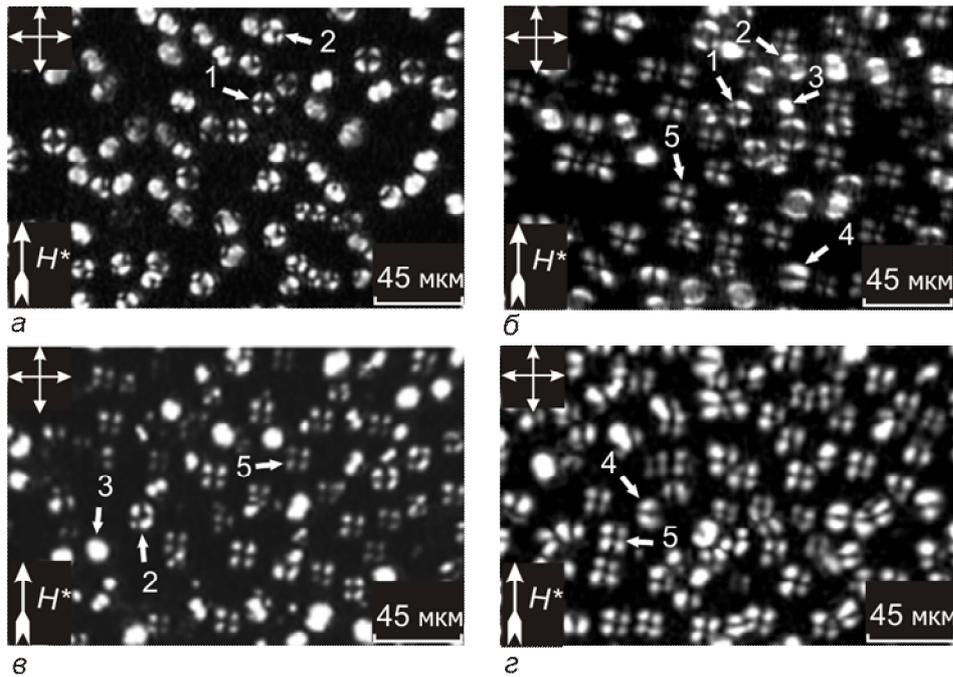


Рис. 1. Ансамбль капель нематика 5ЦБ, приготовленный в присутствии ориентирующего магнитного поля H^* :

$a - H^* = 3$ кЭ; $б - H^* = 4$ кЭ; $в - H^* = 6$ кЭ; $г - H^* = 15$ кЭ

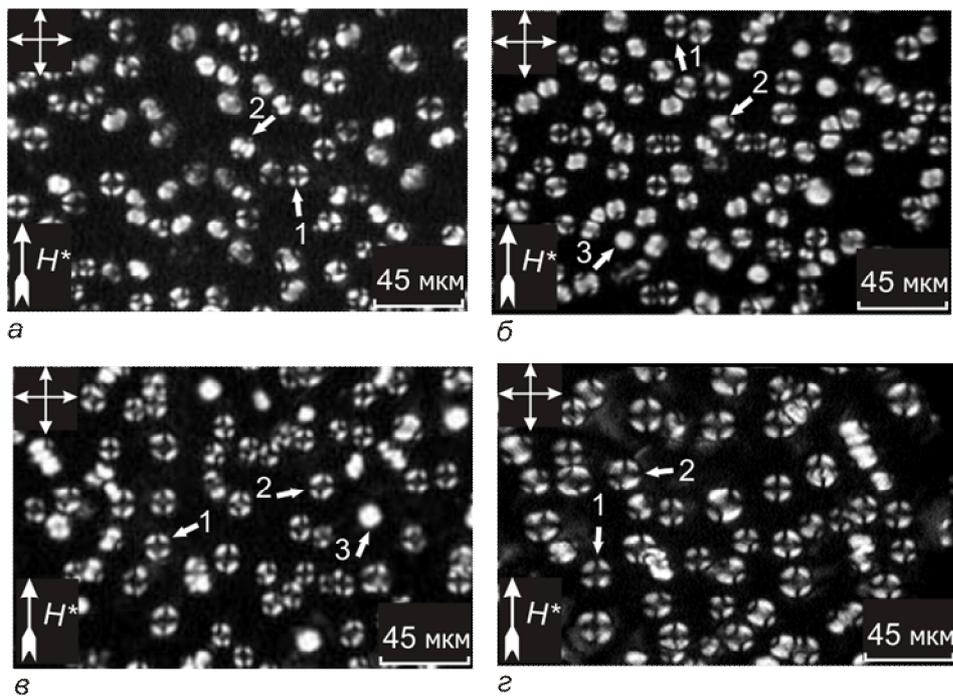


Рис. 2. Ансамбль капель нематика 5ФЦГ, приготовленный в присутствии ориентирующего магнитного поля H^* :

$a - H^* = 4$ кЭ; $б - H^* = 8$ кЭ; $в - H^* = 15$ кЭ; $г - H^* = 30$ кЭ

Капли нематика 5ФЦГ, сформированные в присутствии магнитного поля $H^* < 5$ кЭ, имеют биполярную структуру со случайно ориентированными осями по от-

ношению к полю H^* (поз. 1, 2 на рис. 2). В поле $H^* \geq 5$ кЭ имеется тенденция осей капель ориентироваться вдоль поля. Наряду с этим в ансамбле капель можно наблюдать однородные структуры (поз. 3). Биполярные структуры (поз. 1, 2) имеют расширенные буджумы. Монопольные и радиальные структуры в каплях 5ФЦГ не наблюдались. Характерные текстуры и соответствующие ориентационные структуры капель нематиков представлены на рис. 3.

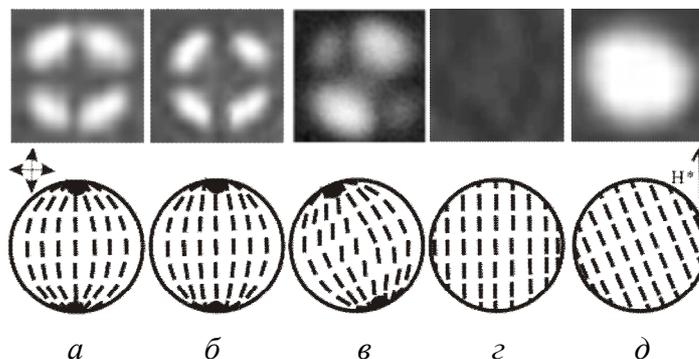


Рис. 3. Текстуры (сверху) и ориентационные структуры (снизу) капель нематиков в полимерной матрице, наблюдаемые в поляризационный микроскоп в скрещенных поляризаторах:

a – биполярная конфигурация капель, сформированных без поля, *б* – биполярная конфигурация капель с расширенными буджумами (ось капли совпадает с направлением магнитного поля H^*); *в* – биполярная конфигурация капель, расположенных под углом $\theta \approx 30^\circ$ к направлению магнитного поля); *г* – однородная структура, полученная в присутствии магнитного поля (ось капли совпадает с направлением поля); *д* – однородная структура, полученная в присутствии магнитного поля (ось капли расположена под углом $\theta \approx 30^\circ$ к направлению H^*).

Направления поляризаторов показаны двойными стрелками

В интервале температур $t = (24 \div 34)^\circ\text{C}$ в каплях 5ЦБ и $t = (32 \div 54)^\circ\text{C}$ в каплях 5ФЦГ происходит циклический переход между биполярной конфигурацией директора и однородной структурой. Переход происходит спонтанно, в отсутствие каких-либо внешних полей. Для исследования перехода использовалась видеосъемка, позволяющая установить детали процесса. Если ранее, в процессе формирования ось капли совпадала с направлением магнитного поля H^* , то сценарий перехода осуществляется в соответствии со структурными превращениями, изображенными на рис. 4, где ось капли расположена в направлении одного из поляризаторов микроскопа. Переход начинается с расширения буджумов биполярной структуры (рис. 4, *a*). В дальнейшем наблюдается поочередное погасание четырех светлых областей капли (рис. 4, *б–г*). В заключительной фазе светлые области полностью погасают в скрещенных поляризаторах, что означает формирование однородной структуры (рис. 4, *д*). По завершении полупериода происходит возврат к биполярной структуре в обратной последовательности.

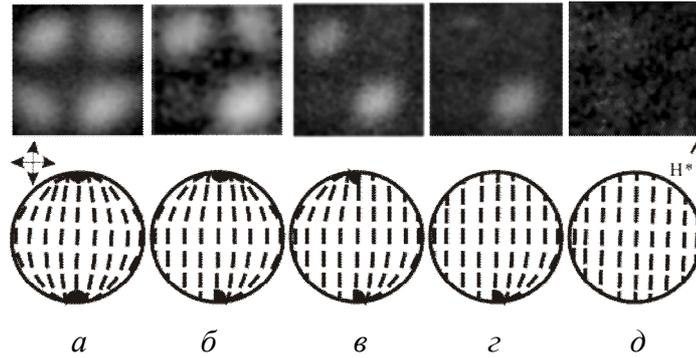


Рис. 4. Динамика спонтанного структурного перехода в капле нематика 5ЦБ размером 15 мкм. Образец был приготовлен при фазовом разделении в присутствии магнитного поля $H^* = 4$ кЭ. Ось капли в процессе формирования приблизительно совпадала с направлением поля. Направления поляризаторов показаны двойными стрелками

Если изначально ось капли располагалась под углом к полю H^* , то спонтанный переход реализуется в соответствии со сценарием, показанным на рис. 5. Период исчезновения и появления светлых областей неодинаков и зависит от параметров капли.

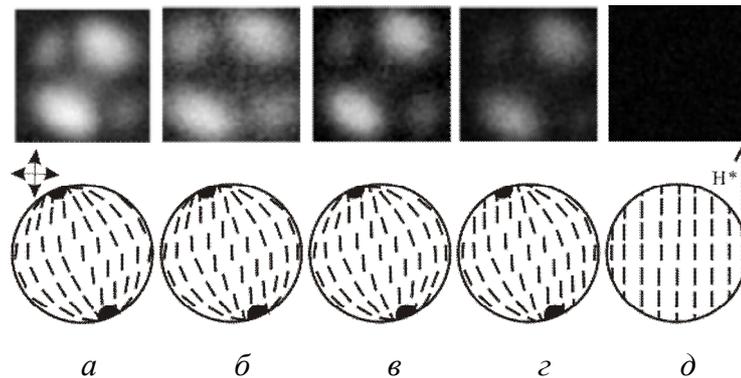


Рис. 5. Динамика структурного фазового перехода в капле нематика 5ЦБ размером 15 мкм, сформированной при фазовом разделении в полимере ПВБ в присутствии магнитного поля $H^* = 6$ кЭ. Ось капли в процессе формирования располагалась под углом $\theta \approx 30^\circ$ к магнитному полю. Направления поляризаторов показаны двойными стрелками

В капле, изготовленной в присутствии поля H^* , реализуются условия, при которых локальные области исчезают и появляются в скрещенных поляризаторах с различной частотой и независимо друг от друга. При этом одни из областей капли могут находиться в стабильной однородной конфигурации, в то время как другие подвергаться циклическому изменению. Тем не менее, если взаимопревращения реализовывались, то они устойчиво повторялись в течение многих месяцев наблюдения за образцами. Для исследуемых нематиков период цикла для локальных областей размером $r \cong (2,5 \div 7,5)$ мкм составляет $\tau \cong (0,5 \div 3,5)$ с.

Обсуждение

Магнитное поле, прикладываемое в процессе формирования КПЖК пленки, упорядочивает объем нематика, поверхностный слой которого взаимодействует с поверхностным слоем образующейся полимерной матрицы. Конфигурация поля директора нематика в капле определяется балансом объемной и поверхностной энергий. В случае отвердевшей поливинилбутиральной (ПВБ) матрицы сцепление ЖК 5ЦБ с поверхностью достаточно сильное $W = 0,8 \times 10^{-2}$ Эрг/см² [8], и в эксперименте реализуется деформированная структура, при которой на поверхности сохраняются тангенциальные граничные условия, в то время как в объеме линии директора вытянуты вдоль направления магнитного поля [1]. При воздействии магнитного поля во время формирования капли энергия сцепления нематика с неотвердевшим полимером существенно меньше: $W = 5.3 \times 10^{-4}$ Эрг/см² [6]. В данных условиях можно ожидать отрыва директора нематика от поверхности под действием используемого в эксперименте магнитного поля H^* .

Значение магнитного поля, при котором произойдет отклонение директора нематика от поверхности капли, определим из выражения [9]

$$\sin(\theta_0 - \theta_s) = \frac{\sqrt{K\Delta\chi}H^*}{2W}, \quad (1)$$

где $K = (K_{11} + K_{22} + K_{33})/3$ – модуль упругости нематика, представляющий собой среднее арифметическое констант поперечного изгиба, кручения и продольного изгиба директора, соответственно; $\Delta\chi$ – анизотропия магнитной восприимчивости; θ_0 – исходный (при $H = 0$) и θ_s – результирующий углы между направлением H^* и директором нематика на поверхности капли.

Схематически структурный переход при ослаблении тангенциального сцепления можно представить в двух вариантах (рис. 6): переход биполярная – однородная структура и переход биполярная – радиальная структура.

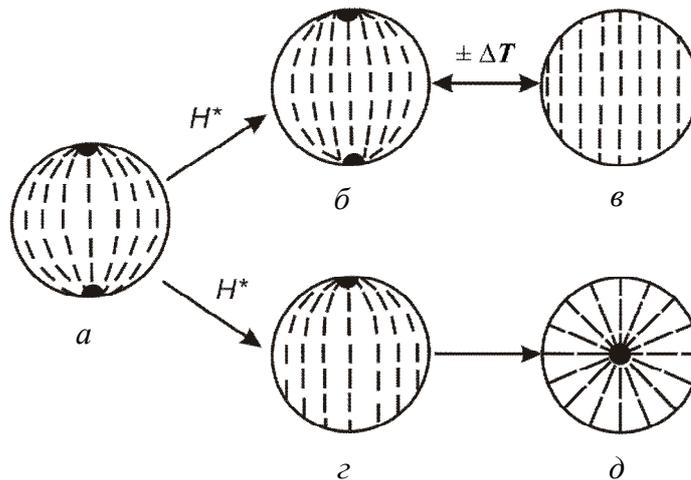


Рис. 6. Схематическое представление структурного перехода в каплях нематиков, сформированных в присутствии магнитного поля H^* :
 а – биполярная структура, б – биполярная конфигурация с расширенными буджумами,
 в – однородная структура, г – монополярная конфигурация, д – радиальная структура;
 ΔT – температура

Переход биполярная – однородная структура

Приняв вблизи буджума $\theta_0 = \pi/2$ и используя данные при температуре $t = 24$ °С: $K_{11} = 6,42 \times 10^{-7}$ дин, $K_{33} = 8,6 \times 10^{-7}$ дин [10] $K_{22} = 3 \times 10^{-7}$ дин [11], $K = 6 \times 10^{-7}$ дин; $\Delta\chi = 1,16 \times 10^{-7}$ [10]; $W = 5,3 \times 10^{-4}$ Эрг/см², из выражения (1) получим $\theta_s = 0$ при $H^* = 4,1$ кЭ для 5ЦБ. Используя данные при $t = 32$ °С: $K = 7 \times 10^{-7}$ дин [12], $\Delta\chi = 0,5 \times 10^{-7}$ [13], получим $H^* = 5,7$ кЭ для 5ФЦГ. При данных значениях H^* ориентация директора нематика на поверхности вблизи буджума должна изменяться от тангенциальной к нормальной. Значение H^* согласуется с экспериментально наблюдаемым значением поля начала трансформации структуры $H^* \cong 4$ кЭ для 5ЦБ и $H^* \cong 5$ кЭ для 5ФЦГ для случая совпадения магнитного поля с осью капли. При этом может происходить исчезновение буджумов по сценарию, описанному в работе [2], с параметром $A = \sin^2(\alpha/2)$, где α – равновесный угол между директором нематика на поверхности и нормалью к ней. Если ось сформировавшейся капли расположена под углом к магнитному полю H^* , переориентация директора внутри капли зависит от степени закрепления буджумов. В случае слабого закрепления буджумы легко перемещаются по поверхности капли под действием внешнего поля так, что биполярная ось переориентируется вдоль силовых линий поля без изменения симметрии структуры и сохраняется тангенциальное упорядочение на всей поверхности капли [2]. Если буджумы закреплены жестко [14], то вдоль направления оси капли будет действовать проекция магнитного поля $H^{**} = H^* \cos\beta$ (β – угол между направлением H^* и осью капли), способствующая распаду буджума. При $H^* = 6$ кЭ и $\beta = 30^\circ$ значение $H^{**} = 5,2$ кЭ превышает поле начала трансформации структуры $H^* = 4$ кЭ, что ведет к образованию однородного упорядочения нематика с директором, расположенным под углом к формирующему полю. Аналогичный сценарий реализуется в каплях 5ФЦГ, в которых при $H^* = 8$ кЭ и $\beta = 30^\circ$ значение $H^{**} = 6,9$ кЭ выше $H^* = 5$ кЭ. Наряду с этим под действием магнитного поля H^* буджумы будут перемещаться по поверхностям капель в зависимости от степени их закрепления, причем в каплях 5ФЦГ легче, чем в каплях 5ЦБ, что связано с различной энергией их тангенциального сцепления с полимером. На модифицированной молекулами ЖК-поверхности капли в присутствии магнитного поля H^* образуется ось легкого ориентирования, отвечающая равновесному состоянию нематика, которая фиксируется после отвердевания полимера. При выключении поля поверхностная энергия будет содержать два энергетических минимума, один из которых соответствует данному равновесному состоянию, а другой обусловлен ориентационной анизотропией, связанной с несферичностью капли.

Поверхностную энергию для двухосной границы, описывающую тенденцию директора нематика \mathbf{n} ориентироваться тангенциально в направлении \mathbf{v} на поверхности капли и вдоль оси легкого ориентирования \mathbf{h} , заданной магнитным полем H^* , представим в виде [15]

$$F_s = -\frac{1}{2}W_1(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})^2 - \frac{1}{2}W_2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2, \quad (2)$$

где W_1 и W_2 – энергии сцепления для тангенциальной (вдоль оси ориентации \mathbf{v}) и аксиальной (вдоль оси ориентации \mathbf{h}) ориентации нематика на поверхности. Энергии могут иметь различную температурную зависимость, поскольку связаны с различными механизмами молекулярного упорядочения ЖК на границе раздела с полимером. Если $W_1 > W_2$, то реализуется биполярная конфигурация с тангенциальной ориентацией ди-

ректора. При $W_1 < W_2$ имеется тенденция образования аксиальной конфигурации директора нематика. В переходном режиме в определенном диапазоне температур ΔT параметры сцепления могут оказаться близкими по величине $W_1 \approx W_2 \approx W$, а потенциальный барьер между двумя конфигурациями может быть преодолен тепловыми флуктуациями директора, что обусловит циклические взаимопревращения структуры капли.

Действительно, энергия тепловых колебаний молекул нематика, приведенная к площади $U \sim k_b \cdot T/a^2$, где k_b – постоянная Больцмана, a – молекулярный размер, заметно больше значения энергии сцепления W . Взяв $T = 297$ °С, $a = 20 \cdot 10^{-8}$ см, $k_b = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К, получим, что $U \sim 1$ эрг/см² существенно превышает значение $W = 0,8 \cdot 10^{-2}$ Эрг/см².

Кроме того, следует отметить постепенное увеличение энергии тангенциального сцепления от полюсов к экватору капли, которое можно наблюдать при перемещении системы координат с осями v , u вдоль меридиана. Т. е., поверхностный слой ЖК более жестко закреплен в экваториальной области, в то время как область вблизи буджумов гораздо чувствительнее к термическому возбуждению, что может привести к независимой переориентации локальных областей капли. Изменяющаяся ориентация ЖК на поверхности передается в объем, и внутри капли начинают происходить циклические структурные превращения, период и размер которых должен зависеть от времени релаксации директора нематика и размерных параметров капли. Выражение, связывающее время релаксации нематика τ , анизотрию капли l , вращательную вязкость γ_1 и константу упругости K , полученное из баланса моментов упругости и вязкости при переориентации директора внутри капли, можно представить в виде [16].

$$\tau = \frac{\gamma_1 a^2}{K(l^2 - 1)}, \quad (3)$$

Используя данные $\gamma_1 = 0,82$ Пз и $\gamma_1 = 0,97$ Пз [17]; $K = 6 \cdot 10^{-7}$ дин и $K = 6 \cdot 10^{-7}$ дин для нематиков 5ЦБ и 5ФЦГ, соответственно, а также $l = 1,1$; $\tau = (0,5 \div 3,5)$ с, получим, что такие времена переключения характерны для капель размером $a = (2,8 \div 7,5)$ мкм, что согласуется с данными проведенного эксперимента.

Переход биполярная – радиальная структура

Как видно из рис. 1, капли не являются идеально сферическими или эллипсоидальными по форме, и условия существования двух буджумов могут отличаться. Данное обстоятельство может привести к тому, что рассасыванию подвергнется лишь один из буджумов, в то время как для уничтожения другого критического поля H^* окажется недостаточным, чтобы преодолеть силы сцепления нематика с поверхностью. В этом случае одна часть капли окажется однородно ориентированной, в то время как другая будет представлять собой сходящееся к буджуму поле директора, то есть монополярную структуру (поз. 4 на рис. 1, б, г). При модификации граничных условий буджум имеет возможность превратиться в «еж» по сценарию с параметром $A = \cos^2(\alpha/2)$ и уйти в объем капли [2], в которой тогда образуется радиальная конфигурация. Однако, как показано ранее [3, 4], для реализации данного сценария необходимы нормальные граничные условия. Следует обратить внимание на то, что в деформированной структуре ЖК за счет флексоэлектрического эффекта могут сформироваться пространственно разделенные заряды [18]. Деформации поля директора в биполярной капле 5ЦБ создают пространственный заряд, наибольший вблизи буджумов, где имеет место поперечный

изгиб, и наименьший на экваторе капли в условиях продольного изгиба. Так, например, электрическое поле, созданное зарядами в каплях, плавающих на поверхности изотропной жидкости, способствует притяжению капель друг к другу сингулярными точками [18]. Расчет распределения зарядов в биполярной структуре представляет сложную задачу, поскольку необходимо согласованное решение для флексоэлектрического эффекта и стабильной конфигурации капли [1]. Тем не менее, феноменологически влияние зарядов на структуру ЖК оценить можно. Электрическое поле E_u , созданное поверхностными зарядами, возникающими в результате флексоэлектрической поляризации P_u , направлено по радиусу капли (вдоль оси u) и дает вклад в поверхностную энергию [19]

$$F_{se} = \frac{1}{2}[-W_e + W_0]\cos^2 \theta_s, \quad (4)$$

где $W_e = 1/4\lambda\Delta\epsilon E_u$; λ – длина Дебая; $\Delta\epsilon$ – диэлектрическая анизотропия; W_0 – энергия сцепления, обусловленная стерическими и ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями.

Подставив данное выражение в уравнение (2), можно привести его к виду

$$F_s = -\frac{1}{2}W_1^*(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})^2 - \frac{1}{2}W_2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2, \quad (5)$$

где $W_1^* = -W_e + W$ – эффективная энергия сцепления. Если энергия сцепления $W = W_0 + W_1$ соответствует тангенциальным граничным условиям, то при $W_1^* > W_2$, реализуется тангенциальная ориентация, а при $W_1^* < W_2$ проявляется тенденция к радиальному упорядочению директора нематика. В зависимости от значения W_e энергия сцепления W_1^* может изменить знак и реализоваться как та, так и иная ориентация директора нематика. В случае использования нематика 5ФЦГ, значение его диэлектрической анизотропии $\Delta\epsilon = 9,9$ [20] существенно ниже значения $\Delta\epsilon = 13,3$ [10] для 5ЦБ, и электрического поля для 5ФЦГ недостаточно, чтобы значение W_1^* превысило W_2 , и реализовалась радиальная структура.

Работа выполнена при поддержке грантов: РФФИ № 08-03-01007; НШ 3818.2008.3; № 110 СО РАН; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Список литературы

1. *Dubois-Violette E., Parodi O.* // J. Phys. (Paris) Colloq. 1969. Vol. 30. P. C4-57 – C4-64.
2. *Ковальчук А. В., Курик М. В., Лаврентович О. Д., Серган В. В.* // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. С. 360 – 364.
3. *Воловик Г. Е., Лаврентович О. Д.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. С. 1997 – 2010.
4. *Prishchepa O. O., Shabanov A. V., Zyryanov V. Ya.* // Phys Rev. E. 2005. Vol. 72. P. 031712-1 – 031712-11.
5. *Margerum J. D., Lackner A. M., Ramos E. et al.* // Liq. Cryst. 1989. Vol. 5. P. 1477 – 1487.
6. *Назаров В. Г., Паршин А. М.* // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2007. Вып. 3. С. 92 – 99.

7. Назаров В. Г., Паршин А. М., Гуняков А. В. и др. // Оптический журнал. 2005. Т. 72. С. 28 – 31.
8. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. С. 62 – 68.
9. Паршин А. М., Назаров В. Г., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. // Cryst. Reports. 2009. Vol. 54 (в печати).
10. Bradshaw M. J., Raynes E. P., Bunning J. D., Faber T. E. // J. Phys. 1985. Vol. 46. P. 1513 – 1520.
11. Bunning J. D., Faber T. E., Sherrell P. L. // J. Phys. 1981 Vol. 42. С. 1175 – 1182.
12. Wu S.-N., Wu C.-S. // Phys. Rev. A. 1990. Vol. 42. P. 2219 – 2227.
13. Вика А., де Jeu W. H. // J. Phys. 1982. Vol. 43. P. 361 – 367.
14. Шабанов А. В., Пресняков В. В., Зырянов В. Я., Ветров С. Я. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. С. 696 – 700.
15. Monkade M., Voix M., Durand G. // Europhys. Lett. 1988. Vol. 5. P. 697 – 702.
16. Wu B. G., Erdmann J. H., Doane J. W. // Liq. Cryst. 1989. Vol. 5. P. 1453 – 1465.
17. Беляев В. В. Вязкость нематических жидких кристаллов. М. : Физматлит, 2002. 224 с.
18. Meyer R. B. // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 22. P. 918 – 921.
19. Barbero G., Petrov A. G. // J. Phys.: Condens. Matter. 1994. Vol. 6. P. 2291 – 2306.
20. Pohl L., Eidenschink R., Krause G., Erdmann D. // Phys. Lett. 1977. Vol. 60A. P. 421 – 423.

Поступила в редакцию 23.09.2009 г.