

УДК 532.783

А. М. Паршин, В. Я. Зырянов, В. Ф. Шабанов

**КОНФИГУРАЦИИ ДИРЕКТОРА В СТРУКТУРАХ НЕМАТИКА,
АДСОРБИРОВАННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА**

Институт физики им. Л. В. Киренского, Красноярский научный центр СО РАН,
Академгородок, д. 50, 660036 Красноярск, Россия. E-mail: parshin@iph.krasn.ru

Исследованы ориентационные структуры нематических жидких кристаллов, возникающие на поверхности полимера в результате адсорбции, и их устойчивость относительно шлирен-текстуры. Изучены особенности точечных и линейных сингулярностей в исследуемых структурах. Рассмотрены конфигурации директора в слое нематика, определяемые комбинацией двух ориентирующих факторов: воздействием линейной дисклинации, фактора, стремящегося задать однородное планарное упорядочение, а также влиянием точечного дефекта, задающего радиальную структуру директора. С использованием расчетного метода проведен сравнительный анализ энергии упругих искажений поля директора для различных видов конфигураций: радиально-планарной, радиально-гомеотропной и радиально-радиальной в зависимости от толщины слоя нематика.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, полимер, адсорбция, дисклинация, конфигурация директора.

A. M. Parshin, V. Ya. Zyryanov, V. F. Shabanov

**DIRECTOR CONFIGURATIONS IN THE STRUCTURES OF THE NEMATIC
ADSORBED ON A POLYMER SURFACE**

Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Akademgorodok, 50, 660036 Krasnoyarsk, Russia. E-mail: parshin@iph.krasn.ru

The orientational structures of nematic liquid crystals that form at the polymer surface due to adsorption and their stability with respect to the schlieren texture are investigated. Features of point and linear singularities in these structures are studied. The director configurations in nematic layer as a result of the combination of two aligning factors, which are the linear disclination that tends to impose uniform planar ordering and point defect that imparts the radial structure to the director are considered. The analysis of the elastic distortions energies of the director configurations for the radial-planar, radial-homeotropic and radial-radial structures, depending on the nematic layer thickness was performed using the calculation method.

Key words: nematic liquid crystal, polymer, adsorption, disclination, director configuration.

Введение

Жидкие кристаллы (ЖК), благодаря тенденции молекул ориентироваться длинными осями параллельно друг другу, создают точечные или линейные сингулярности на поверхности с вырожденными граничными условиями, если на ней нет ни одной оси легкого ориентирования [1]. Исследованиям сингулярностей, которые наиболее эффективно проводятся топологическими методами, в настоящее время уделяется большое внимание, так как они служат модельными объектами теории поля и физики конденсированного состояния [2]. Классической структурой нематических ЖК является шлирен-текстура [3]. В поляризационный микроскоп в скрещенных поляризаторах в этой текстуре можно наблюдать точечные дефекты с зарядом $m = \pm 1/2$; ± 1 , который находится в соответствии с числом полос погасания [4]. Использование вариационных принципов, наряду с топологическими методами, позволяет исследовать не только сингулярности, но их устойчивость, а также распределение векторного поля директора ЖК вокруг дисклинаций, что существенно расширяет круг сопоставимости исследуемых объектов. Так, при минимизации свободной энергии нематиков на вырожденных поверхностях в работе [5] были получены уравнения, из которых определены основные виды конфигураций поля директора и их устойчивость относительно величины m . В дальнейшем при таком подходе было установлено, что все структуры ЖК, связанные с линейными сингулярностями с зарядом $m = \pm 1$, неустойчивы и вблизи них происходит «вытекание» директора в третьем измерении [6]. В связи с этим, в шлирен-текстуре центры с четырьмя полосами погасания размыты и являются не линейными, а точечными сингулярностями. В то же время, структуры с сингулярностями $m = \pm 1/2$ устойчивы, и представляют собой линейные дисклинации, наблюдаемые с конца в скрещенных поляризаторах микроскопа [2].

Как показано в [7], условия, заданные на поверхности, ограничивающей ЖК-слой, могут существенно влиять на структуру и тип сингулярностей. Так, в зависимости от экстраполяционной длины, находящейся в однозначном соответствии с полярной энергией сцепления нематика с поверхностью, можно

получить стенку Нееля, простирающуюся через объемный слой ЖК, или поверхностную линию дисклинации (ПЛД), представляющую собой ту же стенку, замкнутую на поверхности. Если накрыть шлирен-текстуру покровным стеклом с заданной однородной планарной ориентацией, то инверсные стенки [8], также имеющие характер стенок Нееля [9], могут простираться в объем ЖК.

С другой стороны, на гладких поверхностях, ограничивающих ЖК, может иметь место сильное азимутальное закрепление директора [10]. Данный эффект проявляется еще ярче на полимерных поверхностях, на которых в результате межмолекулярных взаимодействий могут возникнуть одно или несколько направлений легкого ориентирования, которые зависят от структуры и симметрии полимерных цепей [11]. Более того, как показано нами недавно [12–14], если использовать специальные физико-химические методы подготовки полимерных поверхностей, можно получить структуры ЖК с сильным азимутальным закреплением и вырожденными граничными условиями с непрерывным множеством осей легкого ориентирования. В указанных работах рассмотрены технологические аспекты получения доменных структур нематиков на поверхности поликарбоната (ПК), описаны их характерные текстурные картины, проведены температурные и полевые исследования.

Данная статья посвящена изучению ориентационных структур нематика, сформированных на поверхности ПК, их оценке с топологической точки зрения, исследованию соответствующих сингулярностей, вопросам устойчивости дисклинаций и распределения векторного поля директора ЖК с использованием техники минимизации свободной энергии.

Объекты исследования и результаты

Образцы для исследований приготавливались по методикам, описанным в работах [12–14]. При этом слой нематика 5ЦБ или МББА наносился на поверхность пленки ПК с остаточным растворителем. В течение времени $t \sim 10$ мин. на полимерной пленке формировались структуры с сингулярностями. Верхняя граница образца либо оставалась свободной, либо слой ЖК накрывался покровным стеклом. Поверхность стеклянной подложки обрабатывалась лецитином для задания

гомеотропной ориентации или натиркой для планарной ориентации. Тefлоновая прокладка располагалась с одной стороны ячейки для образования клинообразного слоя нематика или с двух сторон ячейки для формирования плоскопараллельного слоя ЖК. Во втором случае планарная ориентация в объеме ЖК осуществлялась в магнитном поле H по методике, описанной в работе [14]. Ориентационные структуры нематиков изучались с помощью поляризационного оптического микроскопа.

Текстуры. В тонком слое ЖК ($d < 20$ мкм) в скрещенных поляризаторах микроскопа можно наблюдать классическую шлирен-текстуру, на фоне которой появляются доменные образования (рис. 1). Между доменами и полем директора в шлирен-текстуре прослеживаются границы, которые могут быть ярко выраженными и широкими. Текстура доменов формируется в процессе роста от зародыша до размера, ограниченного соседними доменами (радиуса $R \approx 85$ мкм) и постепенно замещает всю шлирен-текстуру.

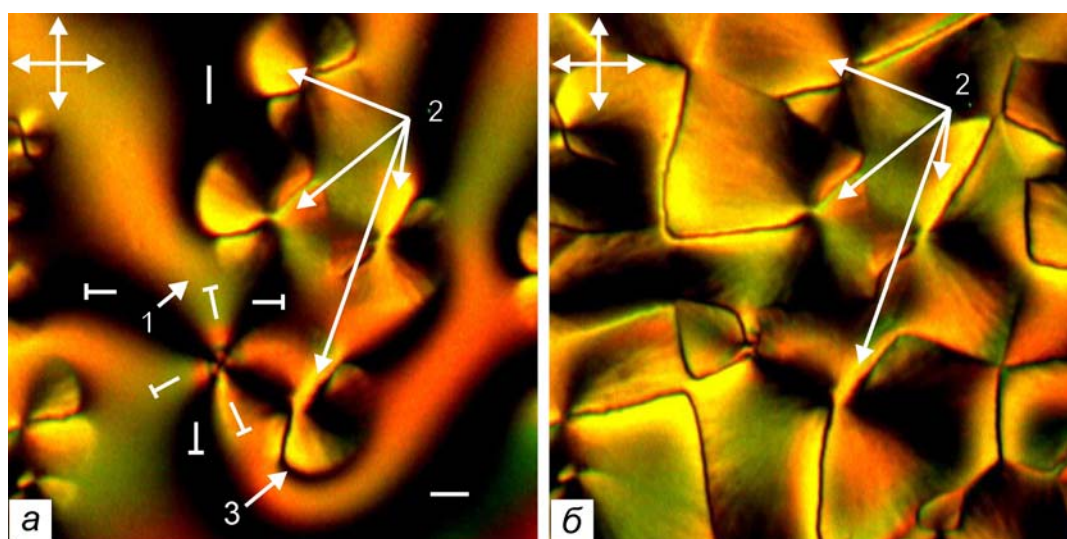


Рис. 1. Микрофотографии формирования (а – в процессе, б – по завершении) в слое нематика на фоне шлирен-текстуры 1 доменных текстур 2 с выраженными границами 3.

Ориентация молекул ЖК представлена в виде коротких линий и «гвоздиков».

Направления колебаний света в скрещенных поляризаторах показаны пересекающимися стрелками

Доменная текстура, наблюдаемая в скрещенных поляризаторах, существенно зависит от толщины нематического слоя d . При $d > 10$ мкм отдельный домен выглядит как диск с двумя полосами поглощения конической формы (рис. 2, а). Через центр домена проходит линия дисклинации, хорошо различимая на светлых полосах и постепенно исчезающая по мере того, насколько близко она расположена к центральным частям темных полос поглощения (рис. 2, б, в). При $d < 10$ мкм возле линии дисклинации начинает появляться темный сектор, идущий от периферии домена (рис. 2, з). Сектор приобретает четкие очертания, если линия дисклинации находится под углом $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ к направлениям поляризаторов

(рис. 2, д). Он также становится резко выраженным при приближении линии дисклинации к направлению одного из поляризаторов и уменьшении толщины слоя ЖК до 5 мкм (рис. 2, ж), а также при ориентации линии дисклинации в диапазоне $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ (рис. 2, з, и). В последних случаях домен выглядит как диск с четырьмя полосами поглощения. Иногда в текстурах наблюдаются домены с точечной дисклинацией в центре, (рис. 2, е), вокруг которой видны интерференционные кольца. При этом линия дисклинации едва заметна. Следует отметить, что домены с такой точечной дисклинацией встречаются в текстурах исключительно редко, и их появление не зависит от толщины слоя d .

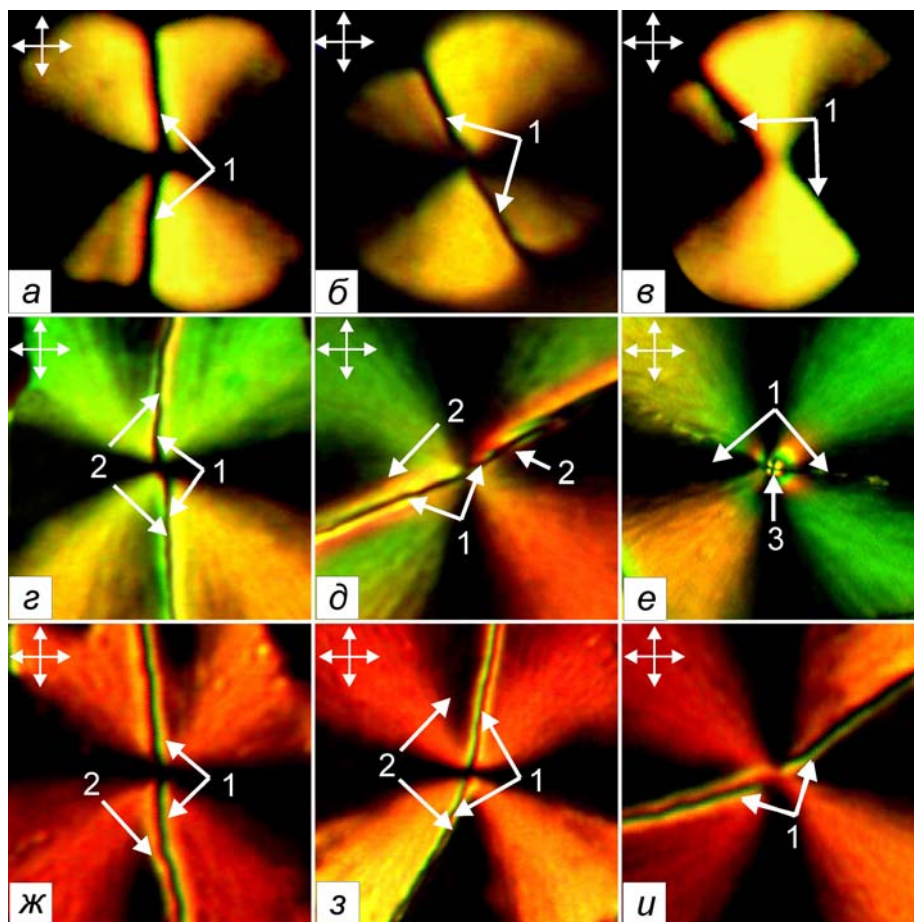


Рис. 2. Микрофотографии доменов нематиков, сформированных на пленках ПК с остаточным растворителем в клиновой ячейке при различной толщине слоя ЖК d : (а–в) 20, (г–е) 6, (ж–и) 4 мкм. 1 – линии дисклинации, 2 – темные секторы. Направления колебаний света в скрещенных поляризаторах показаны пересекающимися стрелками

В клиновой ячейке домены окрашены, и их окраски соответствуют интерференционным цветам жидкокристаллического слоя, рассматриваемого в белом свете в скрещенных поляризаторах (рис. 3). Из рисунка видно, что при изменении толщины слоя нематика от 10 до 1 мкм спектры интерференции снижаются от третьего до первого порядка. При $d > 10$ мкм цвета перестают изменяться, а при $d < 1$ мкм окраска клина остается черной.

Дисклинации. Линии дисклинации всегда резко очерчены. Их действительная ширина $2b \approx 2$ мкм. По мере уменьшения толщины нематическо-

го слоя в клиновой ячейке с покровным стеклом, обработанным натиркой для задания планарной ориентации, линии дисклинации все более упорядочиваются. Взаимная ориентация линий в ансамбле доменов начинает заметно проявляться с $d \approx 10$ мкм, а в более тонких слоях сингулярности выстраиваются параллельно друг другу и перпендикулярно направлению натирки. Подобный результат можно наблюдать в ячейках, приготовленных в магнитном поле. В данном случае ориентация доменов проявляется в зависимости от величины приложенного поля, при длине магнитной когерентности [14] $\xi_m > 10$ мкм (рис. 4).

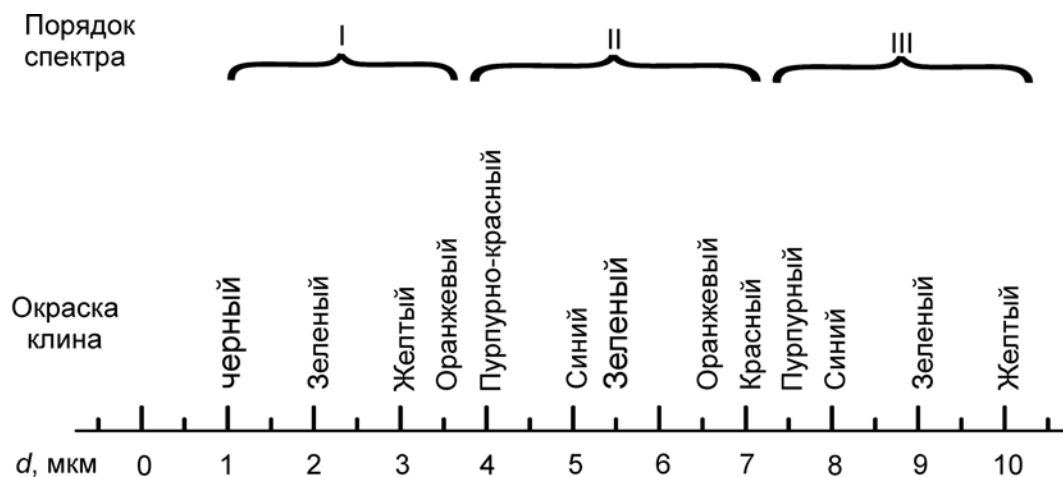


Рис. 3. Интерференционные окраски слоя 5CB в клиновидной ячейке с покровным стеклом, обработанным натиркой

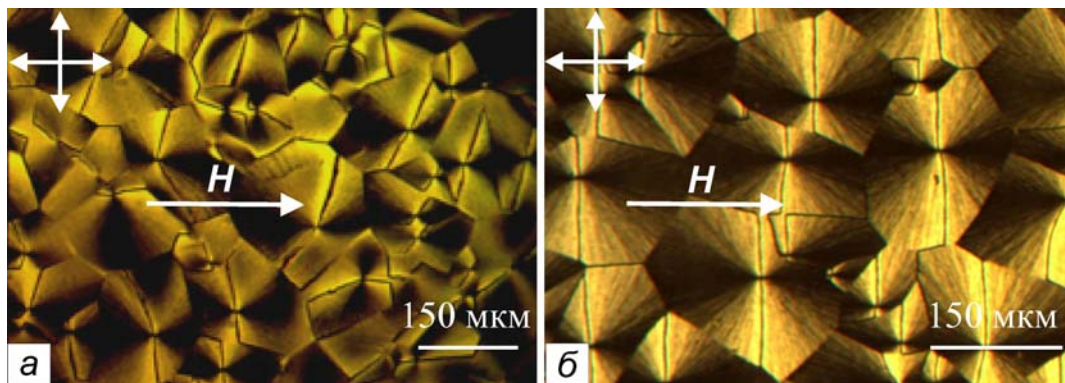


Рис. 4. Ориентация линий дисклиний в ячейке, приготовленной в магнитном поле, в зависимости от длины магнитной когерентности: а – $\xi_m = 10$ мкм, б – $\xi_m = 2$ мкм. Направления приложенного магнитного поля H показано стрелками. Направления колебаний света в скрещенных поляризаторах показаны пересекающимися стрелками

Обсуждение и модельные представления

Структуры. Ядро шлирен-текстуры на рис. 1 имеет топологический заряд $m = +1$, определенный из соотношения $m = N/4$, где N – число темных полос в текстуре. Знак заряда соответствует тому факту, что при вращении текстуры в скрещенных поляризаторах полосы вращаются в противоположном направлении. Конфигурация директора вокруг сингулярности соответствует радиальной структуре. Ранее [12] нами было установлено, что ядро доменной текстуры также имеет заряд $m = +1$. Рядом

расположенные топологические заряды должны отталкиваться друг от друга, а линии поля директора плавно изгибаться в окрестности между зарядами, что можно эффективно наблюдать в нематических коллоидах [15]. Наличие же резких границ между текстурами (стенок), представленных на рис. 1, как показано в [12], связано со спецификой формирования радиальной структуры (R) ЖК на поверхности ПК при испарении остаточного растворителя из полимерной пленки. В данном процессе молекулы ЖК формируют структуру R, постепенно располагаясь вокруг зародышевого центра, исходящего из полимерных

цепей [13], подобно тому, как это происходит при их взаимодействии с гранулами в коллоидных растворах. Адсорбция нематических молекул на поверхности полимера приводит к сильно закреплённому упорядочению, то есть к эффекту Ченга-Бойда [10] и формированию стенок. В дальнейшем, для простоты, будем называть доменные структуры, представленные на рис. 1, *адсорбционными*. В отличие от шлирен-текстуры, которая возникает на вырожденной поверхности в отсутствие осей легкого ориентирования, адсорбционную радиальную структуру следует рассматривать как структуру, сформированную на поверхности с непрерывным множеством осей легкого ориентирования [1], исходящих из доменного центра.

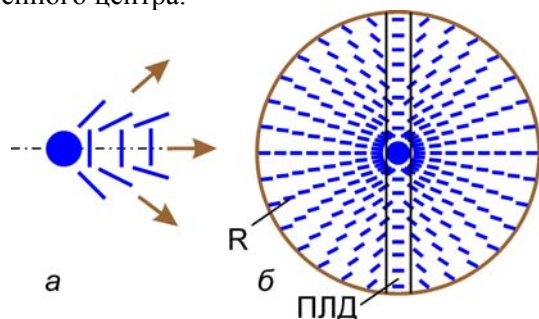


Рис. 5. Схема конфигураций директора нематика на поверхности полимера:

а – в течение роста домена (показано стрелками),
б – после формирования структуры R с ПЛД

Дисклинации. Детальное наблюдение за процессом роста доменов, проведенное в [12], показало, что формирование структуры R и ПЛД происходит шаг в шаг с одновременным закреплением двух конкурирующих ориентаций: первая связана с распределением поля директора относительно точечной дисклинации, вторая – с ПЛД. В результате данного процесса на поверхности возникает адсорбированная структура, схематично изображенная на рис. 5, а. При этом ПЛД экранирует ядро структуры R, препятствуя «вытеканию» директора в третье измерение, которое обычно происходит в структуре R без ПЛД [16], или в структуре с некачественно сформированной ПЛД, представленной на рисунке 2, f. Однако на границах перехода от однородной части ПЛД к конфигурации R, ввиду резкого изменения направлений директора \mathbf{n} , возникают две линии, образующие ПЛД (рис. 5, б). Поэтому ПЛД на

рис. 2 видны как широкие линии, ограниченные двумя резкими линиями. ПЛД стремится поставить стенку, простирающуюся в объем ЖК-слоя. Однако в рассматриваемых нами структурах сформированная стенка не распространяется в объем на бесконечное расстояние. По мере удаления от поверхности, силы, связанные с адсорбцией, проявляют все меньшую способность удержания «жесткой» поверхностной конфигурации, и конфигурация директора становится обусловленной равновесным состоянием между однородной ориентацией, исходящей от ПЛД, и структурой R.

Можно предположить, что на некотором расстоянии от поверхности ξ структура R плавно трансформируется в однородную структуру, поскольку последняя должна иметь меньшую свободную энергию в виду отсутствия деформаций. Такое гипотетическое представление структуры, в которой конфигурация R с ПЛД сосредоточена на поверхности и существует переходный слой к однородной ориентации, имеет экспериментальное подтверждение. Так, на рис. 2 текстуры, наблюдаемые в толстых слоях ЖК, имеют сингулярности с зарядом $m = +1/2$ и переходят в текстуры с зарядом $m = +1$ в тонких слоях. Данная трансформация, как показано в [17], запрещена топологическими законами. Представление о равновесном существовании неоднородной и однородной структур в слое ЖК легко объясняет противоречие. В толстых слоях ЖК, планарная ориентация, «закрепленная» на ПЛД, накладываясь на радиальную конфигурацию, преобразует оптическую картину так, что в текстуре с зарядом $m = +1$ наблюдается две полосы погасания. В то же время, в толстом образце с натертой подложкой влияние внешней поверхности оказывается недостаточным для ориентации ПЛД, которая наблюдается как широкая темная линия для всех положений скрещенных поляризаторов (рис. 2), благодаря волноводному эффекту Могена [1]. Переход к текстуре с четырьмя полосами погасания в тонких слоях происходит за счет изменения ориентации директора ЖК в однородной структуре, что приводит к преобразованию оптической картины. Поскольку преобразование, наблюдаемое в виде темного сектора и развивающееся от периферии текстуры, имеет резкую границу с ПЛД, можно предположить, что деформация структуры связана с нарушением равновесного состояния между широким полем радиальной конфигурации и однородной

ориентацией, обусловленной узкой ПЛД. Эффект упорядочения ПЛД внешней поверхностью, обработанной натиркой, а также магнитным полем, которое осуществляется опосредованно через молекулы объемного слоя ЖК, и зависимость степени упорядочения сингулярностей от толщины нематического слоя, показанные на рис. 4, подтверждают наши модельные представления.

Конфигурация поля директора в структуре. Для любой конфигурации директора \mathbf{n} свободная энергия ЖК в объеме V в

приближении равенства констант упругости K запишется в виде (1)

$$F = \frac{1}{2} K \int_V [(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + (\operatorname{rot} \mathbf{n})^2] dV \quad (1)$$

Для конфигурации R^+P , соответствующей трансформации радиальной структуры с ПЛД в однородную структуру, представленной на рис. 6, в цилиндрических координатах компоненты директора будут $n_\rho = -\cos \psi$, $n_\varphi = \cos \psi$, $n_z = 0$.

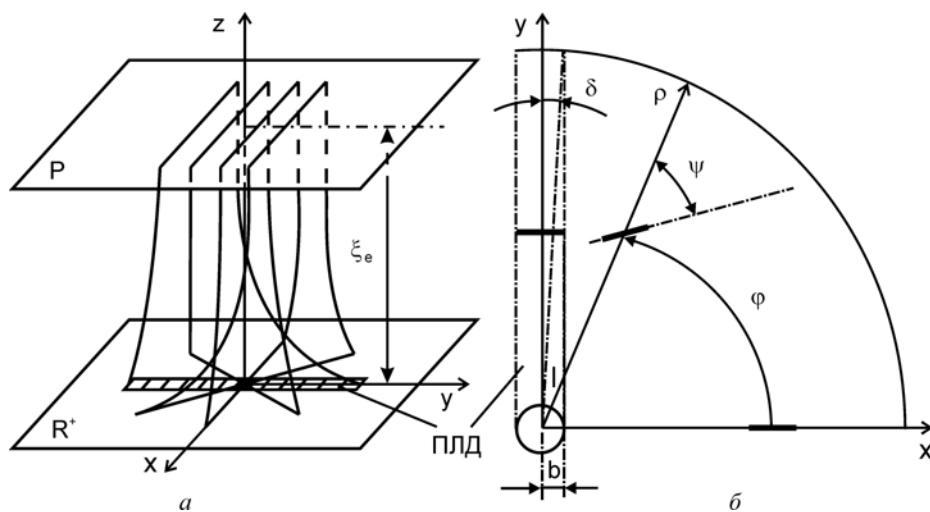


Рис. 6. Конфигурации директора нематика \mathbf{n} при трансформации радиальной структуры R^+ с ПЛД в однородную планарную структуру P на равновесном расстоянии ξ_e от поверхности полимерной пленки (а) и параметры для расчетов в цилиндрических координатах (б)

Угол отклонения молекул от полярного радиуса ρ на поверхности с молекулярной адсорбцией $\psi = 0$ при $z = 0$, и $\psi = \varphi$ на расстоянии $z = \xi$. Положим $\psi = (1 - \exp z/\xi)\varphi$, допуская, что локально искаженная ориентация директора экспоненциально затухает с расстоянием от поверхности [18]. Подставив компоненты директора в выражение (1), и интегрируя в пределах $l \leq \rho \leq R$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi - 4\delta$, $0 \leq z \leq \infty$, получим

$$F_1 = \frac{1}{2} K \left[\pi \ln \left(\frac{R}{b} \right) \xi + \left(\frac{\pi^3}{12} - \frac{\pi^2}{4} + 1 \right) \frac{R^2}{2} \frac{1}{\xi} + \left(\frac{\pi^2}{4} - \pi \right) R \right] + F_1', \quad (2)$$

где R – радиус домена, b – полуширина ПЛД, F_1 – ее энергия (содержит угловую часть, для вычисления которой необходимо принимать во внимание угол δ , характеризующий угловой

размер ПЛД, и геометрическую часть, связанную с размером $l = b/\cos \varphi$).

Равновесное значение ξ_{e1} получим, минимизируя (3)

$$\xi_{e1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi^3}{12} - \frac{\pi^2}{4} + 1 \right) \frac{R^2}{2}}{\pi \ln \left(\frac{R}{b} \right)}} \quad (3)$$

Чтобы ответить на вопрос, почему конфигурация (R^+P) сохраняется даже в том случае, если внешняя поверхность слоя ЖК свободная или накрыта покровным стеклом с заданной нормальной ориентацией, рассчитаем радиально-гомеотропную конфигурацию RH с вырожденными граничными условиями [16].

При $z = 0$, угле между директором \mathbf{n} и осью z $\theta = 0$, $\theta = \pi/2$ на расстоянии ξ_{e2} , а для произвольного значения z $\theta = \pi/2(1-z/\xi)$, подставив значения $n_\rho = -\sin \theta$, $n_\varphi = 0$, $n_z = \cos \theta$ в выражение (1), и интегрируя в пределах $r \leq \rho \leq R$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $0 \leq z \leq \xi$, получим

$$F_2 = \frac{1}{2}K \left[\pi \ln\left(\frac{R}{r}\right)\xi + \left(\frac{\pi^3}{4}\right)R^2 \frac{1}{\xi} - \pi^2 R \right] + F_c, \quad (4)$$

где r – радиус ядра, F_c – его энергия (содержит геометрическую часть, связанную с r).

Минимизируя (4), получим равновесное значение ξ_{e2}

$$\xi_{e2} = \sqrt{\frac{\frac{\pi^3}{4}R^2}{\pi \ln\left(\frac{R}{r}\right)}} \quad (5)$$

Если бы структура R была устойчивой, то есть не происходило бы «вытекание» директора вблизи точечной дисклинации в объем, то распределение поля директора соответствовало бы однородной конфигурации RR . Подставив значения компонент директора $n_\rho = -1$, $n_\varphi = 0$, $n_z = 0$, и интегрируя в пределах $r \leq \rho \leq R$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq z \leq \xi$, получим

$$F_3 = \frac{1}{2}K \left[2\pi \ln\left(\frac{R}{r}\right)\xi \right] + F_c \quad (6)$$

Следуя экспериментальным данным, из которых $R \approx 85$ мкм, $r \approx b \approx 2$ мкм, получим $\xi_{e1} \approx 17$ мкм, $\xi_{e2} \approx 63,3$ мкм для конфигураций R^+P и RH , соответственно. На рис. 7 представлены зависимости свободной энергии для конфигураций R^+P , RH и RR . Значения F_1 , F_2 , F_3 построены из выражений (2), (4), (6) при $K = 6 \cdot 10^{-7}$ дин [19] с учетом значений F_1 и F_c . Рассчитанное и отмеченное на графике значение ξ_{e1} соответствует минимуму свободной энергии конфигурации R^+P , которая действительно наиболее отчетливо наблюдалась в слоях ЖК $d \sim 30$ мкм, используемых в эксперименте. Конфигурация RH могла бы эффективно проявляться в нематических слоях $d \sim 60 \div 70$ мкм, вблизи значения ξ_{e2} . Однако, поскольку F_1 меньше F_2 во всем диапазоне практически реализуемых толщин ξ , конфигурация R^+P вместо RH имела место во всех наших наблюдениях. Энергия F_3 линейно зависит

от толщины нематического слоя и минимизируется при $\xi \rightarrow 0$. Зависимости $F_3(\xi)$ и $F_1(\xi)$ имеют общую точку при $\xi_c \approx 10$ мкм. Именно с этого значения, как показано в экспериментальной части, начинают происходить постепенные изменения в структуре R^+P , заключающиеся во все большем проявлении структуры R при $\xi \rightarrow 0$. При малых толщинах слоя ЖК ($\xi \sim b$) трансформация R^+P в RR может сопровождаться изменением равновесного распределения поля директора в стенке между ПЛД и радиальной структурой. Данное обстоятельство может привести к снижению ориентирующего влияния и к «вытеканию» директора нематика вблизи ядра в третье измерение в структуре RR и переходу к структуре RH . Независимо от того, происходит трансформация $R^+P \rightarrow RH$ или $R^+P \rightarrow RR \rightarrow RH$ оптические наблюдения визуализируют переход сингулярности с зарядом $m = 1/2$ к сингулярности с зарядом $m = 1$, что и представлено на рис. 2.

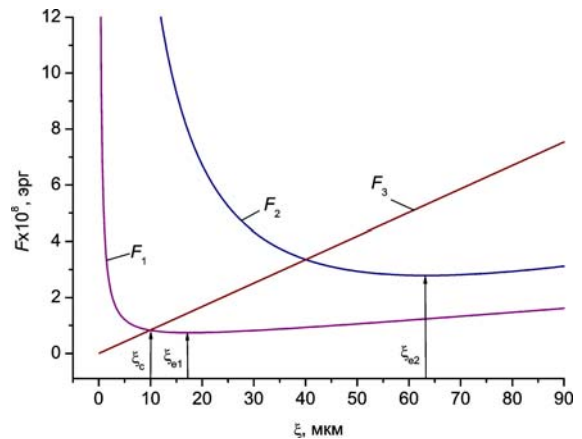


Рис. 7. Зависимости свободной энергии F_1, F_2, F_3 для конфигураций R^+P, RG и RR :

ξ_{e1}, ξ_{e2} – расстояния от поверхности ПК, соответствующие минимумам свободных энергий конфигураций R^+P и RH ;
 ξ_c – критическое расстояние от поверхности, соответствующее началу структурной трансформации $R^+P \rightarrow RR$ (RH)

Можно предположить, что неравенство модулей упругости K_{11}, K_{22}, K_{33} должно было бы повлиять на стабильность изученных структур, препятствуя вытеканию директора в третье измерение. Однако, следуя результатам работы [20], плоская дисклинация с $m = 1$ устойчива с расположением линий директора по концентрическим окружностям в нематике при условии $K_{22} > 2 K_{33}, K_{11} > K_{33}$, не выполнимым для большинства классических ЖК.

При этом для радиальной конфигурации, рассматриваемой в нашем эксперименте, дисклинация оказывается неустойчивой при любых значениях модулей упругости. Исследования устойчивости дисклинаций с различными значениями m , проведенные в [6] и [16], подтверждают справедливость использования одноконстантного приближения.

Заключение

Таким образом, в данной работе исследованы структуры нематика, сформированных на поверхности ПК, с топологической точки зрения. Показано, что радиально-планарная ориентация, содержащая элемент однородного упорядочения, энергетически более выгодна по сравнению с другими конфигурациями, поэтому она может легко реализовываться и оказываться более устойчивой в сравнении с другими структурами.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке программ Президиума РАН и РФФИ (грант № 15-02-06924).

Список литературы / References

1. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с. [*de Gennes P.G. The Physics of Liquid Crystals. Oxford: Clarendon Press; 1974. 360 p.*]
2. Kleman M., Lavrentovich O. D. Topological point defects in nematic liquid crystals // *Phil. Mag.* 2006. Vol. 86. P. 4117–4137.
3. Sackmann H., Demus D. The polymorphism of liquid crystals // *Mol. Cryst.* 1966. Vol. 2. P. 81–102.
4. Nehring J., Saupe A. O. On the schlieren texture in nematic and smectic liquid crystals // *J. Chem. Soc. Far. Trans. II.* 1972. Vol. 68. P. 1–15.
5. Frank F. C. On the theory of liquid crystals // *Discuss. Faraday Soc.* 1958. Vol. 25. P. 19–28.
6. Meyer R. B. On the existence of even indexed disclinations in nematic liquid crystals // *Phil. Mag.* 1973. Vol. 27. P. 405–424.
7. Ryshenkow G., Kleman M. Surface defects and structural transitions in very low anchoring energy nematic thin films // *J. Chem. Phys.* 1976. Vol. 64. Iss. 1. P. 404–412.
8. Kleman M., Williams C. Anchoring energies and the nucleation lines in nematics // *Phil. Mag.* 1973. Vol. 28. P. 725–731.
9. Williams C., Vitek V., Kleman M. Surface disclination lines in 4-methoxy-benzylidene-4'-n-butylaniline (MBBA) // *Solid State Commun.* 1973. Vol. 12. P. 581–584.
10. Cheng J., Boyd G. D. The liquid-crystal alignment properties of photolithographic gratings // *Appl. Phys. Lett.* 1979. Vol. 35. P. 444–446.
11. Vetter P., Ohmura Y., Uchida T. Study of memory alignment of nematic liquid crystals on polyvinyl alcohol coatings // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 32. P. L 1239–L 1241.
12. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Доменные структуры нематиков на поверхности полимера // *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2012. Вып. 1. С. 42–51. [*Parshin A. M., Gunyakov V. A., Zyryanov V. Ya., Shabanov V. F. Domennyye struktury nematikov na poverkhnosti polimera (Nematic domain structures on polymer surface) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie (Liq. Cryst. & Appl. Russ. J.).* 2012. Iss. 1. P. 42–51 (in Russian)].
13. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Физико-химическое взаимодействие нематиков с поверхностью полимера // *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2012. Вып. 2. С. 51–59 [*Parshin A. M., Gunyakov V. A., Zyryanov V. Ya., Shabanov V. F. Fiziko-khimicheskoe vzaimodeystvie nematikov s poverkhnost'yu polimera (Physico-chemical interaction of nematics with polymer surface) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie (Liq. Cryst. & Appl. Russ. J.).* 2012. Iss. 2. P. 51–59 (in Russian)].
14. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Ориентационные переходы в электрическом и магнитном поле в двухслойных структурах нематика, индуцированных поверхностью полимера // *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2013. Вып. 2. С. 26–36. [*Parshin A. M., Gunyakov V. A., Zyryanov V. Ya., Shabanov V. F. Orientatsionnye perekhody v elektricheskom i magnitnom pole v dvukhsloynnykh strukturakh nematika, indutsirovannykh poverkhnost'yu polimera (Orientational transitions in electric or magnetic field in two-layer nematic structures induced by polymer surface) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie (Liq. Cryst. & Appl. Russ. J.).* 2013. Iss. 2. P. 26–36 (in Russian)].
15. Lubensky T. C., Petey D., Currier N. Topological defects and interactions in nematic emulsions // *Phys. Rev. E.* 1998. Vol. 57. P. 610–625.
16. Lavrentovich O. D., Nastishin Yu. A. Defects in degenerate hybrid aligned nematic liquid crystals // *Europhys. Lett.* 1990. Vol. 12. P. 135–141.
17. Курик М. В., Лаврентович О. Д. Дефекты в жидких кристаллах: гомотопическая теория и экспериментальные исследования // *УФН.* 1988. Т. 31. С. 382–431 [*Kurik M. V., Lavrentovich O. D. Defects in liquid crystals: homotopy theory and experimental studies // Sov. Phys. Usp.* 1988. Vol. 31. P. 196–224].

-
-
18. *Berreman D. W.* Anomalous stiffness and tilt angle in nematics from nonuniform attachment angle // *J. Phys. Colloq.* 1979. Vol. 40. P. C3-58–C3-61.
19. *Parshin A. M., Nazarov V. G., Zyryanov V. Ya., Shabanov V. F.* Magnetic-field-induced structural transition in polymer-dispersed liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2012. Vol. 557. P. 50–59.
20. *Анисимов С. И., Дзялошинский И. Е.* Новый тип дисклинаций в жидких кристаллах и устойчивость дисклинаций разных типов // *ЖЭТФ.* 1972. Т. 63. С. 1460–1471 [*Anisimov S. I., Dzyaloshinskii I. E.* A new type of disclination in liquid crystals and the stability of disclinations of various types // *Sov. Phys. JETP.* 1973. Vol. 36. P. 774–779].

Поступила в редакцию 17.03.2015 г.