

07

Нелинейное ориентационное взаимодействие нематического жидкого кристалла с тепловым потоком

© Е.И. Деменев, Г.А. Поздняков, С.И. Трашкеев

Новосибирский государственный университет

E-mail: elusor@gmail.com

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск

E-mail: georg@itam.nsc.ru

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

E-mail: sitrskv@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2009 г.

Экспериментально зарегистрировано воздействие теплового потока на ориентацию нематического жидкого кристалла, в исходном состоянии однородно ориентированного. Включение пространственно-периодического теплового потока вызывало деформацию ориентации директора, не сопровождаемую гидродинамическим течением. Картина, наблюдаемая в поляризованном свете, похожа на систему полос, возникающую при переходе Фредерика в статическом пространственно-периодическом электрическом поле. Сделан вывод о существовании эффекта ориентационной термоупругости, определяемой квадратичной зависимостью от градиента температуры. Наблюдаемое термоориентационное взаимодействие находится в противоречии с утвердившимся положением об отсутствии движения директора жидкого кристалла, имеющего зеркальную симметрию.

PACS: 42.65.Sf

К необычным свойствам жидких кристаллов (ЖК), отличающим их от традиционных жидких и кристаллических веществ, относятся и специфические термомеханические явления, вызванные изменением ориентационной структуры ЖК под действием температурных полей. Сюда относится эффект Лемана (вращение директора холестерического ЖК в поле градиента температуры [1]) и достаточно недавно обнаруженный эффект вращения вещества нематического жидкого кристалла (НЖК), имеющего неоднородную исходную ориентацию директора [2,3]. Эти линейные по градиенту температуры явления

согласуются с положением об отсутствии (или нарушении) зеркальной симметрии ЖК [1]. В случае НЖК [2,3] нарушение зеркальной симметрии среды может быть вызвано неоднородностью граничных условий или воздействием внешних электромагнитных полей. Основным вывод, сделанный исследователями термоориентационных явлений в ЖК, заключался в принципиальной невозможности подобных эффектов в зеркально-симметричных ЖК [1,4].

Авторы настоящей работы исследовали термоориентационный эффект в НЖК 1289, имеющем в исходном состоянии гомеотропную ориентацию, и экспериментально продемонстрировали наличие этого эффекта в неоднородном нестационарном поле температуры.

Эксперимент проводился по схеме, представленной на рис. 1. Взаимодействие наблюдалось в тонком слое НЖК, которым заполнялся зазор 4 между стеклянной 1 и термостатированной медной 5 пластинами. Толщина слоя $40\ \mu\text{m}$ задавалась прокладками 3. На поверхность стеклянной пластины, обращенной к НЖК, был нанесен полупрозрачный проводящий ИТО-слой 2 так, как показано на рис. 1, б. Справа и слева покрытие имеет никелевые контактные площадки (темно-серые). Нагревательные элементы (серые) шириной $50\ \mu\text{m}$ расположены с шагом $100\ \mu\text{m}$. Полное сопротивление ИТО-слоя составляло $587\ \Omega$. Медная поверхность, обращенная к НЖК, была зеркально отполирована. Пластины перед сборкой обрабатывались хромоланом для получения однородной гомеотропной ориентации директора НЖК. Возникающая картина, связанная с переориентацией директора НЖК, наблюдалась в поляризованном свете с помощью микроскопа с CCD-камерой б. Образец по направлению полос ориентировался под углом 45° к поляризаторам.

При подключении напряжения к нагревателю возникало нестационарное (вследствие тепловой диффузии в среде НЖК и вдоль верхней ограничивающей пластины) неоднородное поле температуры, периодическое поперек полос. Существенные изменения происходили в моменты включения и выключения нагревателя. Эффект начинал проявляться при напряжении $U \sim 20\ \text{V}$.

На рис. 2 приведена последовательность кадров, полученных при $U = 30\ \text{V}$. Напряжение включалось в момент времени $t = 0.15\ \text{s}$, выключалось в момент времени $t = 2.3\ \text{s}$. При включении резко возникали светлые полосы в промежутках между полосами нагревателя с периодом $0.1\ \text{mm}$, затем происходила релаксация и картина стабилизирова-

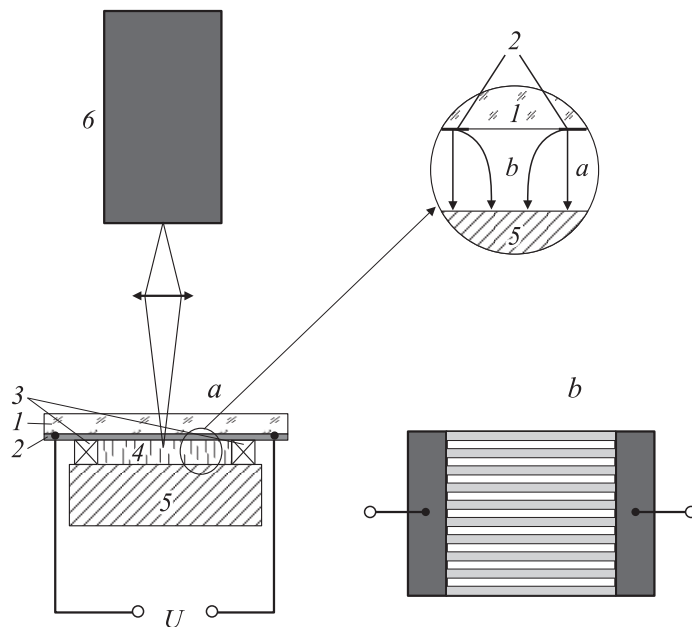


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки: *1* — стеклянная пластина с полупрозрачным проводящим покрытием (*2*), *3* — диэлектрические прокладки толщиной $40\ \mu\text{m}$, *4* — слой НЖК 1289 с начальной гомеотропной ориентацией, *5* — термостатируемая медная пластина с зеркальной верхней поверхностью, *6* — поляризационный микроскоп с CCD-камерой; *b* — эскиз полупрозрачной (ITO) нагревательной решетки на стеклянной пластине *1*.

лась. При выключении такое же резкое просветление наблюдалось в местах, где располагались темные полосы при включении, после чего происходила релаксация в течение нескольких сотен миллисекунд. При увеличении прикладываемого напряжения до $50\ \text{V}$ время релаксации оставалось практически прежним и составляло около $2\text{--}3\ \text{s}$.

Одномерные распределения прозрачности образца поперек полос на отрезке, примерно равном двум периодам, приведены на последующих рисунках. Кривые построены для различных моментов времени. На рис. 3 приведены графики для $U = 30\ \text{V}$, полученные фотометрированием кадров, показанных на рис. 2. Поведение образца при напряжении

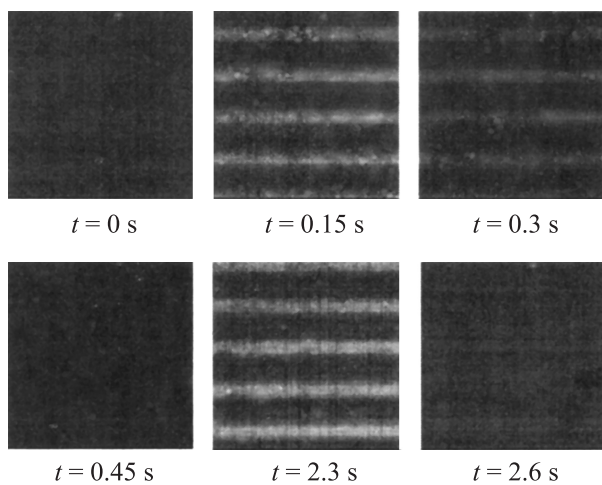


Рис. 2. Поверхностное распределение прозрачности образца в поляризованном свете при включении ($t = 0.15$ s) и выключении ($t = 2.3$ s) напряжения питания $U = 30$ V.

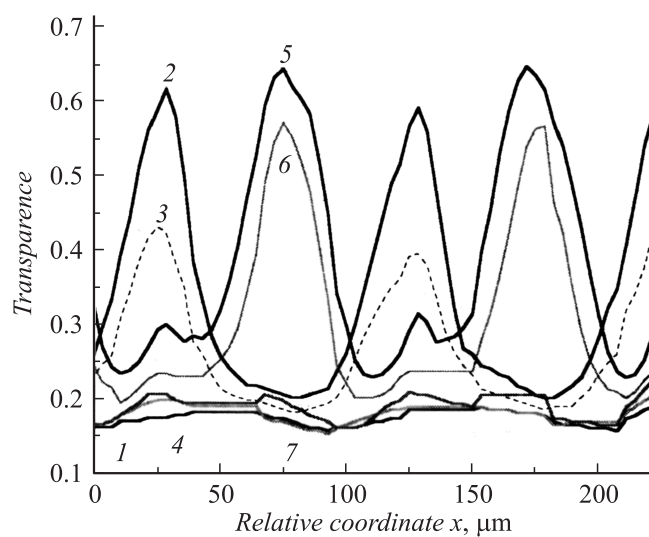


Рис. 3. Распределение прозрачности образца поперек полос в различные моменты времени для $U = 30$ В: 1 — $t = 0$ s, 2 — $t = 0.15$ s, 3 — $t = 0.31$ s, 4 — $t = 0.45$ s, 5 — $t = 2.27$ s, 6 — $t = 2.42$ s, 7 — $t = 2.56$ s.

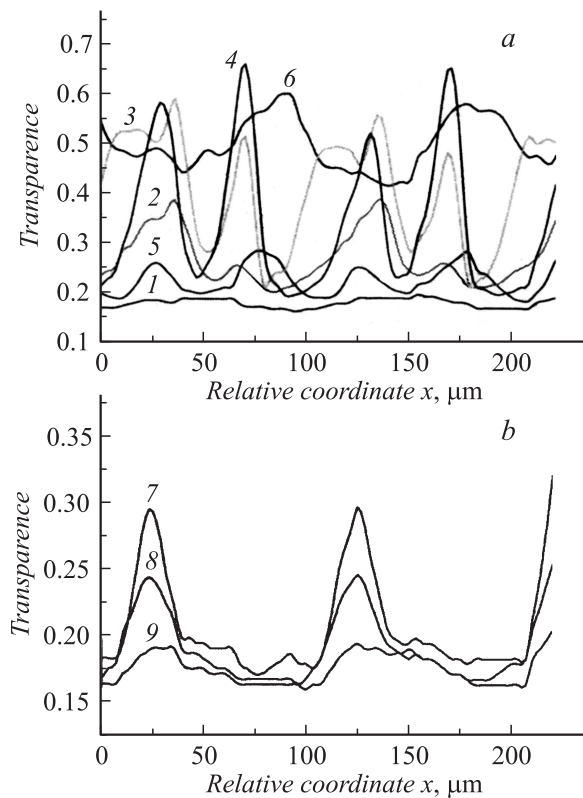


Рис. 4. Распределение прозрачности образца поперек полос в различные моменты времени для $U = 50$ V. *a*: 1 — $t = 0$ s; 2 — $t = 0.15$, 3 — $t = 0.31$, 4 — $t = 0.45$, 5 — $t = 2.42$, 6 — $t = 2.56$ s; *b*: 7 — $t = 2.7$ s, 8 — $t = 3.16$, 9 — $t = 3.41$ s.

$U = 50$ V (рис. 4) значительно сложнее, поэтому (чтобы не загромождать рисунок) приведены некоторые характерные из полученных зависимостей. При включении напряжения возникает по две светлые полосы у каждого нагревательного элемента (кривые 2 и 3). Далее происходит более медленная релаксация до состояния, соответствующего распределению прозрачности 5. При выключении происходит просветление образца *b* и последующая релаксация 7–9.

Оценим значения некоторых параметров, характеризующих процессы теплообмена в образце при $U = 30$ В. Необходимые для этого данные следующие: теплопроводность ЖК $\lambda = 0.15\text{--}0.35$ Вт/(м·К) [5], его теплоемкость $C \sim C_v \sim C_p \sim 10^3$ Дж/(кг·К) [4], площадь решетки нагревательных элементов $S \approx 2 \cdot 10^{-4}$ м². Остальные параметры приведены выше при описании эксперимента.

При включении нагревателя первым устанавливается градиент температуры поперек полос, затем по мере прогрева стеклянной подложки этот градиент уменьшается и наблюдается тепловая релаксация образца. Оценим времена установления и релаксации градиента температуры поперек полос. Порядок величины может быть получен исходя из соотношения $\tau \sim C_p L^2 / \lambda$, где L — характерный пространственный масштаб. Время установления поля температуры по толщине слоя ЖК составляет $\tau_1 \approx 10^{-4}$ с, что значительно меньше времени релаксации образца, которое оценивается по толщине стеклянной подложки и имеет порядок $\tau_2 \approx 1$ с. Стационарная разность между температурами ЖК вблизи поверхности нагревателя и на поверхности медной подложки при напряжении $U = 30$ В оценивается величиной 2–3 К. Можно предположить, что температура ЖК вблизи и вдоль поверхности стеклянной подложки в течение 10^{-4} с после включения питания модулирована с глубиной порядка 1 К в направлении, нормальном к направлению нагревательных элементов. Это связано с тем, что у поверхности медной подложки температура однородна, а пути, по которым происходит теплопередача, различаются примерно в 1.5 раза для тепловых потоков вдоль вертикального (*a*) и горизонтального (*b*) направлений в плоскости чертежа (см. выноску на рис. 1).

Просветление образца наблюдается в тех областях, где происходит поворот директора ЖК. Как предполагалось, это происходит в зонах максимальных градиентов температуры, расположенных вблизи краев полос нагревателей. В наших экспериментах такая картина наблюдалась при включении напряжения 50 В. При напряжении $U = 30$ В по невыясненной причине, возможно связанной с особенностями технологии приготовления образца, просветление в момент включения наблюдалось возле одного из краев нагревательного элемента (на графике левого) и при выключении — вблизи другого края. Одним из объяснений несимметричности может быть наличие некоторой начальной ориентации директора ЖК. Выключение питания также сопровождалось появлением светлых полос.

После анализа проведенных экспериментов было сделано предположение (в дальнейшем требующее строгого доказательства) о воздействии на ориентацию НЖК поля градиента температур аналогично электрическому полю в эффекте Фредерикса. Несложный анализ в отсутствие гидродинамического переноса НЖК позволяет записать уравнения для плоской переориентации, определяемой одним углом θ и температурой T , вида

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} &= K \Delta \theta + \alpha (\mathbf{n} \nabla T) (\mathbf{m} \nabla T), \\ C \frac{\partial T}{\partial t} &= \operatorname{div} [\lambda_{\perp} \nabla T + \lambda_a \mathbf{n} (\mathbf{n} \nabla T)] + \gamma \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где γ — вращательная вязкость; K — упругий параметр для одноконстантного приближения; α — введенный нами термоориентационный коэффициент; C — теплоемкость НЖК; λ_{\parallel} , λ_{\perp} , $\lambda_a = \lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}$ — параметры тензора теплопроводности НЖК. Дифференциальные операторы в (1) являются двумерными. Ось x направлена вдоль плоскости пластин в направлении, перпендикулярном нагревательным полосам, ось y — ортогональна ограничивающим НЖК поверхностям. Директор \mathbf{n} и ортогональный к нему единичный вектор \mathbf{m} определяются через угол θ следующим образом:

$$\mathbf{n} = (\sin \theta, \cos \theta), \quad \mathbf{m} = \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \theta} = (\cos \theta, -\sin \theta);$$

$$\theta = \theta(t, x, y), \quad T = T(t, x, y).$$

Первое уравнение в (1) аналогично ориентационному уравнению, описывающему эффект Фредерикса. В уравнении теплопроводности системы (1) последний член учитывает тепловыделение за счет вращательной вязкости [6]. Введенный термоориентационный параметр имеет размерность $[\alpha] = \text{N/K}^2$.

В описываемом эксперименте градиент температуры в отличие от электрического поля при эффекте Фредерикса является динамической переменной. Этим, как было отмечено выше, определяется релаксация ориентационной картины, наблюдаемой на первых четырех фотографиях рис. 2.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить порядок величины введенного параметра α . Сравнивая вклады упругого и термоориентационного взаимодействий, получаем

$$\frac{K}{L^2} \sim \alpha \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^2.$$

Подставляя характерное значение $K \sim 10^{-11}$ Н и разность температур $\Delta T \sim 1$ К, зарегистрированную в эксперименте, находим $|\alpha| \sim 10^{-11}$ Н/К².

В рассмотренном эффекте возможно воздействие на ориентацию НЖК электрических полей. Однако в случае постоянного питающего напряжения наведенные электрические поля должны компенсироваться проводимостью среды. Характерные времена релаксации электрических полей за счет ионной проводимости НЖК оцениваются величиной порядка 10^{-2} с [7], что намного меньше времени релаксации деформированного состояния НЖК (~ 2 с) после включения напряжения питания нагревателей (см. рис. 4).

Представленный экспериментальный материал доказывает наличие термоориентационных взаимодействий в НЖК, являющихся анизотропными средами с зеркальной симметрией. В соответствии с этим предполагается, что зависимость отклонения директора НЖК от своего начального невозмущенного состояния определяется квадратичной формой от градиента температуры, аналогично зависимости от электрического поля в эффекте Фредерикса. Обнаруженный впервые эффект не является следствием термомеханической переориентации, обсуждавшейся ранее в работах [2,3].

Список литературы

- [1] Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. М.: Мир, 1980.
- [2] Акопян Р.М., Зельдович Б.Я. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. В. 5(11). С. 1660–1669.
- [3] Лаврентович О.Д., Настихин Ю.А. // Укр. физ. журн. 1987. Т. 32. № 5. С. 710–712.
- [4] Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука, 1983.
- [5] Томилин М.Г., Пестов С.М. Свойства жидкокристаллических материалов. СПб.: Политехника, 2005.
- [6] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. Т. VII. М.: Наука, 1987.
- [7] Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах.: Наука, 1981.