

УДК 532.783

Е. М. Аверьянов

**ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
КВАЗИНЕМАТИЧЕСКОГО СЛОЯ ХОЛЕСТЕРИКА
И ДИСКОИДНОГО НЕМАТИКА**

**TEMPERATURE BEHAVIOUR OF REFRACTIVE INDICES
OF QUASI-NEMATIC LAYER OF CHOLESTERIC AND DISCOID NEMATIC**

Институт физики им. Л. В.Киренского Сибирского Отделения РАН,
660036 Красноярск, Россия. E-mail: aver@iph.krasn.ru

Исследованы температурные зависимости показателей преломления $n_{o,e}(t)$ и величин $\langle n \rangle = (n_e + 2n_o)/3$, $\bar{\varepsilon} = (n_e^2 + 2n_o^2)/3$, $\bar{n} = \bar{\varepsilon}^{1/2}$ для квазинематического слоя каламитного холестерика (дискоидного нематика) при наличии точки t_o (t_e) минимума функции $n_o(t)$ ($n_e(t)$) внутри (вне) интервала холестерической (нематической) фазы. Для квазинематического слоя (дискоидного нематика) установлены линейные зависимости $\langle n \rangle(t)$, $\bar{\varepsilon}(t)$, $\bar{n}(t)$ и подтверждены полученные ранее соотношения, связывающие коэффициенты этих зависимостей со значениями $n_e(t_o)$ и $\bar{n}(t_o)$ ($n_o(t_e)$ и $\bar{n}(t_e)$). Для двух рассматриваемых типов нематиков установлены противоположные соотношения между коэффициентами зависимости $\langle n \rangle(t)$, или $\bar{n}(t)$, в мезофазе и зависимости $n_i(t)$ в изотропной фазе.

The temperature dependences of the refractive indices $n_{o,e}(t)$ and the values $\langle n \rangle = (n_e + 2n_o)/3$, $\bar{\varepsilon} = (n_e^2 + 2n_o^2)/3$, $\bar{n} = \bar{\varepsilon}^{1/2}$ were studied for the quasi-nematic layer of the calamitic cholesteric (discoïd nematic) liquid crystal in the presence of the minimum point t_o (t_e) of the function $n_o(t)$ ($n_e(t)$) within (out of) the range of cholesteric (nematic) phase. For the quasi-nematic layer (discoïd nematic) the linear dependences $\langle n \rangle(t)$, $\bar{\varepsilon}(t)$, $\bar{n}(t)$ were established and the relationships derived earlier and connecting the coefficients of these dependences with the values of $n_e(t_o)$ and $\bar{n}(t_o)$ ($n_o(t_e)$ and $\bar{n}(t_e)$) were confirmed. For the two types of nematics the reverse correlations were established between the coefficients of the dependence $\langle n \rangle(t)$, or $\bar{n}(t)$, in the mesophase and the dependence $n_i(t)$ in the isotropic phase.

Введение

В связи с миниатюризацией компонентов технических устройств и переходом к мезоскопическому (нано-) уровню их масштабов в настоящее время повышенный интерес и актуальность представляют особенности физических свойств конденсированных сред и, в частности, жидких кристаллов (ЖК), связанные с локальной симметрией и анизотропией таких сред на нано-масштабах, наличием иерархии уровней их структурной организации, возможным разнообразием локальных структур при одинаковой макроскопической симметрии среды [1]. При этом важно разделять эффекты,

смаатриваемые здесь оптические свойства. В заключении кратко суммированы основные результаты работы.

1. Особенности изменения $n_{o,e}(t)$ в нематиках N_Q и N_D

Рассмотрим совокупность подлежащих проверке соотношений отдельно для квазинематического слоя холестерика (квазинематика N_Q) и дискоидного нематика N_D .

Квазинематик N_Q . Локальная симметрия квазинематика N_Q с директором \mathbf{n} , перпендикулярным оси спирали \mathbf{q} , характеризуется точечной группой симметрии D_2 с тремя осями симметрии C_2 вдоль $X||\mathbf{q}$, $Y||[\mathbf{n}\times\mathbf{q}]$ и $Z||\mathbf{n}$ [1]. Наличие двух физически выделенных направлений \mathbf{n} и \mathbf{q} и плоскости \mathbf{nq} обуславливает локальную двуосность холестерика, которая проявляется в различии главных показателей преломления n_X и n_Y , подтверждаемом коноскопическими исследованиями [15]. Однако локальное двулучепреломление $n_X - n_Y$ термотропных холестериков пока не измерено и, вероятно, по порядку величины не превышает 10^{-3} , что оправдывает обычное использование одноосного приближения $n_X = n_Y = n_o$, $n_Z = n_e$ с двулучепреломлением $\Delta n = n_e - n_o$.

При анализе зависимостей $n_{o,e}(t)$ для квазинематика N_Q используем соотношения

$$n_o = \langle n \rangle - \Delta n/3, \quad n_e = \langle n \rangle + 2\Delta n/3. \quad (1)$$

Характер зависимости $\langle n \rangle(t)$ для квазинематика N_Q был до сих пор неизвестен. По аналогии с каламитными нематиками [13] можно принять:

$$\langle n \rangle(t) = B_0 - Bt. \quad (2)$$

Температура t (T) соответствует шкале Цельсия (Кельвина). Поскольку значения $\bar{\epsilon}(t)$ и $\bar{n}(t)$ одинаковы для холестерика и квазинематического слоя, а для холестериков были установлены зависимости [13]

$$\bar{n}(t) = b_0 - bt, \quad \bar{\epsilon}(t) = g_0 - gt, \quad (3)$$

то они должны выполняться и для квазинематического слоя. Здесь коэффициенты связаны соотношениями:

$$g_0 = b_0^2, \quad g \approx 2b_0b[1 - bt_m/b_0]. \quad (4)$$

Значение $t_m = (t_{\min} + t_{\max})/2$ отвечает середине температурного интервала, в котором зависимости $\bar{n}(t)$ и $\bar{\epsilon}(t)$ аппроксимируются формулами (3). Поскольку даже при больших значениях Δn величины $\bar{n} > \langle n \rangle$ отличаются несущественно [13], то из (3) следует справедливость аппроксимации (2). Согласованность формул (2) и (3) можно проверить зависимостью

$$\bar{\epsilon}(t) = D_0 + D\langle n \rangle(t) \quad (5)$$

с коэффициентами

$$D_0 = g_0 - gB_0/B, \quad D = g/B. \quad (6)$$

Зависимость $\Delta n(T)$ аппроксимируется функцией [1]

$$\Delta n(T) = \Delta n_{\max}(1 - T/T_1)^\beta, \quad (7)$$

с подгоночными параметрами Δn_{\max} , β и $T_1 > T_{NI}$, T_{NI} – температура перехода нематик – изотропная жидкость (N–I). В точке t_0 минимума зависимости $n_o(t)$ параметры формул (2) и (7) связаны соотношениями [13]

$$B = \frac{\beta \Delta n_{\max}}{3T_1(1 - T_0/T_1)^{1-\beta}}, \quad t_1 - t_0 = T_1 \exp \left[\frac{1}{(1-\beta)} \ln \left(\frac{\beta \Delta n_{\max}}{3BT_1} \right) \right]. \quad (8)$$

С учетом (7) из первой формулы (8) следует связь

$$t_1 - t_0 = \frac{\beta}{3B} \Delta n(t_0). \quad (9)$$

В окрестности t_0 функция $n_0(t)$ в низшем приближении является параболой

$$n_0(t) = n_0(t_0) + \kappa_0(t - t_0)^2 \quad (10)$$

с коэффициентом $\kappa_0 = (1/2) \left(d^2 n_0(t) / dt^2 \right)_{t_0}$, который с учетом (7) приводится к виду

$$\kappa_0 = \frac{B(1-\beta)}{2(t_1 - t_0)}. \quad (11)$$

Коэффициенты формул (2) и (3) связаны соотношениями [13]

$$b/B = n_e(t_0) / \bar{n}(t_0), \quad g/B = 2n_e(t_0), \quad g/b = 2\bar{n}(t_0). \quad (12)$$

Дискоидные нематики. Для них $\Delta n < 0$ и формулы (1) перепишем в виде:

$$n_0 = \langle n \rangle + |\Delta n|/3, \quad n_e = \langle n \rangle - 2|\Delta n|/3. \quad (13)$$

Для этих ЖК на основании данных [14] можно ожидать выполнения зависимости (2) и предполагать справедливость зависимостей (3), (5). Высокая точность аппроксимации изменения $|\Delta n(t)|$ формулой (7) для обычных и возвратных фаз N_D была показана ранее [1, 16]. Замена в (7) значений Δn и Δn_{\max} на $|\Delta n|$ и $|\Delta n|_{\max}$ с учетом (13) позволяет записать аналоги формул (8) следующим образом

$$B = \frac{2\beta |\Delta n|_{\max}}{3T_1(1 - T_e/T_1)^{1-\beta}}, \quad t_1 - t_e = T_1 \exp \left[\frac{1}{(1-\beta)} \ln \left(\frac{2\beta |\Delta n|_{\max}}{3BT_1} \right) \right]. \quad (14)$$

Аналогом формулы (9) является соотношение

$$t_1 - t_e = \frac{2\beta}{3B} |\Delta n(t_e)|. \quad (15)$$

В окрестности t_e зависимость $n_e(t)$ дается выражением

$$n_e(t) = n_e(t_e) + \kappa_e(t - t_e)^2, \quad (16)$$

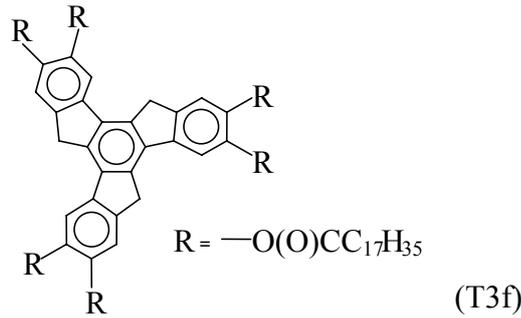
где коэффициент κ_e отличается от κ_0 (11) заменой t_0 на t_e . Аналогами соотношений (12) для нематиков N_D являются следующие [13]

$$b/B = n_0(t_e) / \bar{n}(t_e), \quad g/B = 2n_0(t_e), \quad g/b = 2\bar{n}(t_e). \quad (17)$$

Сравнение формул (12) и (17) показывает их существенное отличие.

2. Объекты исследования, результаты и обсуждение

Объектами проверки приведенных выше соотношений в настоящей работе взяты смесь холестерилхлорида с холестерилмиририлатом в весовом соотношении 1,75:1,00 (Ch-CI/M, $t_{\text{ChI}} = 67,9$ °C) [17] и возвратная нематическая фаза N_{Dre} соединения T3f ($t_{\text{NI}} = 82$ °C) [18], структурная формула которого приведена ниже.



Cr —58 °C— Col_{hd} —67 °C— N_{Dre} —82 °C— I_{re} —89 °C— Col_{hd} —183 °C— I

Для данных объектов интервалы мезофаз изменяются от 30 (Ch-CI/M) до 15° (T3f), что важно для проверки формул (2), (3). Для холестерической и изотропной фаз Ch-CI/M использованы локальные значения $n_{o,e}$ ($\lambda = 632,8$ нм) для квазинематического слоя, измеренные с использованием техники поверхностных плазмонов с точностью около 10^{-4} [17]. Для нематической и изотропной фаз T3f значения $n_{o,e}$ ($\lambda = 589$ нм), измеренные на рефрактометре Аббе, взяты из работы [18].

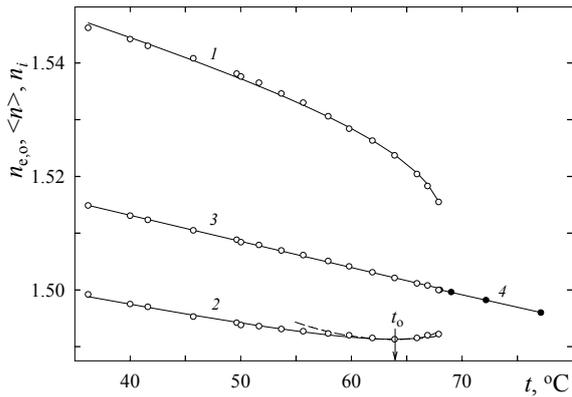


Рис. 1. Температурные зависимости величин n_e (1), n_o (2), $\langle n \rangle$ (3) и n_i (4) в квазинематическом слое холестерической фазы и в изотропной фазе ЖК Ch-CI/M. Сплошные линии – аппроксимации формулами (1), (2), (7), (19). Штриховая линия – зависимость $n_o(t)$, рассчитанная по формуле (10)

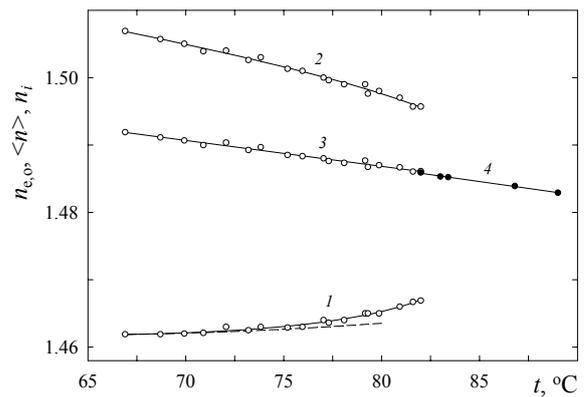


Рис. 2. Температурные зависимости величин n_e (1), n_o (2), $\langle n \rangle$ (3), n_i (4) в нематической и изотропной фазах ЖК T3f. Сплошные линии – аппроксимации формулами (2), (7), (13), (19). Штриховая линия – зависимость $n_e(t)$, рассчитанная по формуле (16)

Температурные зависимости величин $n_{o,e}$, $\langle n \rangle$ и n_i для этих ЖК представлены на рис. 1, 2. Для обоих объектов выполняется линейная зависимость (2). Из соотношений

$$n_{e,Ch} = n_o, \quad n_{o,Ch} = [(\epsilon_o + \epsilon_e)/2]^{1/2} > (n_o + n_e)/2 \quad (18)$$

для показателей преломления холестерика ($n_{o,e,Ch}$) и его квазинематического слоя ($n_{o,e}$) следует неравенство $\langle n \rangle_{Ch} > \langle n \rangle$, которое усиливается по мере снижения t и роста Δn . В

результате коэффициенты $B_{0,Ch}$, B_{Ch} и B_0 , B зависимостей (2) для холестерика и его квазинематического слоя должны подчиняться неравенствам $B_{0,Ch} > B_0$, $B_{Ch} > B$. Так же хорошо для обоих ЖК выполняются зависимости (3), (5) и (7), коэффициенты которых приведены в таблице. При этом соотношения (4), (6) подтверждаются с высокой точностью, особенно для ТЗf с более точными значениями $n_{o,e}$. Значения B_0 , b_0 , g_0 (B , b , g) для Ch-Cl/M несколько (заметно) выше, чем для ТЗf.

Экспериментальные и рассчитанные по указанным формулам коэффициенты, фигурирующие в зависимостях (2), (3), (5), (7), (10), (16), (19) для исследованных ЖК

ЖК	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_1 - t_{e(o)}, ^\circ\text{C}$	Δn_{\max}	β	B_0	b_0
Ch-Cl/M	68,79	4,86	0,0784	0,2069	1,5316	1,5319
ТЗf	85,43	21,99	0,0996	0,2685	1,5175	1,5180
ЖК	g_0		$B \cdot 10^4, ^\circ\text{C}^{-1}$	$b \cdot 10^4, ^\circ\text{C}^{-1}$	$g \cdot 10^4, ^\circ\text{C}^{-1}$	
	опыт	(4)			опыт	(4)
Ch-Cl/M	2,3462	2,3467	4,6133	4,6519	14,0253	14,0272
ТЗf	2,3036	2,3043	3,8318	3,8908	11,5861	11,5871
ЖК	b/B		g/B		g/b	
	опыт	(12), (17)	опыт	(12), (17)	опыт	(12), (17)
Ch-Cl/M	1,0084	1,0143	3,0402	3,0476	3,0150	3,0043
ТЗf	1,0154	1,0104	3,0237	3,0178	2,9778	2,9866
ЖК	$-D_0$		D	b_{0i}	$b_i \cdot 10^4, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\kappa \cdot 10^5, ^\circ\text{C}^{-2}$
	опыт	(6)				
Ch-Cl/M	2,3094	2,3095	3,0397	1,5300	4,4066	3,7640
ТЗf	2,2835	2,2849	3,0228	1,5196	4,1209	0,6373

В изотропной фазе зависимость $n_i(t)$ имеет вид:

$$n_i(t) = b_{0i} - b_i t, \quad (19)$$

причем соотношение величин b_{0i} для обоих ЖК близко к соотношению коэффициентов B_0 или b_0 . Для фазы N_Q имеют место такие же неравенства $b_{0i} < B_0 < b_0$ и $b_i < B < b$, что и для изученных ранее каламитных нематиков СНСА ($b_{0i} = 1,4739$; $b_i = 3,5714 \cdot 10^{-4}$) и 5ВСО ($b_{0i} = 1,5355$; $b_i = 2,4034 \cdot 10^{-4}$) [13]. Однако для фазы N_D характерны соотношения $B_0 < b_0 < b_{0i}$ и $B < b < b_i$. Для Ch-Cl/M и ТЗf при $t = t_{NI}$ различие значений $\langle n \rangle$ и n_i пренебрежимо мало.

Зависимости $n_{o,e}(t)$ хорошо аппроксимируются формулами (1), (2), (7) во всем интервале мезофазы, включая точки $t_{o,e}$ и температуру t_{NI} . Значения разности $(t_1 - t_{o,e})$, рассчитанной по формулам (8) и (14), приведены в таблице. Их существенное различие обусловлено отличием формул (9), (15) и совокупным различием входящих в них параметров. Из рисунка видно, что формулы (10), (16) описывают изменение $n_{o,e}(t)$ в окрестности точек $t_{o,e}$, а область их применимости расширяется по мере увеличения разности $(t_1 - t_{o,e})$ и уменьшения коэффициента κ при переходе от Ch-Cl/M к ТЗf.

Табличные данные показывают, что для обоих объектов соотношения (12), (17) выполняются с достаточно хорошей точностью, хотя для ТЗf точка t_e лежит за предела-

- ~~~~~
 ≈≈
5. *Palfy-Muhoray P., Lee V. A., Petschek R. G.* // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 60. № 22. P. 2303 – 2306.
 6. *Ayton C., Patey G. N.* // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. № 2. P. 239 – 242.
 7. *Аверьянов Е. М.* // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 12. С. 805 – 810.
 8. *Аверьянов Е. М.* // Опт. журн. 1998. Т. 65. № 7. С. 5 – 15.
 9. *Аверьянов Е. М., Гуняков В. А., Корец, А. Я., Аконова О. Б.* // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70. № 1. С. 30 – 35.
 10. *Аверьянов Е. М., Гуняков В. А., Корец, А. Я., Аконова О. Б.* // Опт. и спектр. 2000. Т. 88. № 8. С. 979 – 986.
 11. *Аверьянов Е. М., Жуйков В. А., Шабанов В. Ф.* // Кристаллография. 1984. Т. 29. № 3. С. 542 – 545.
 12. *Gunyaev V. A., Shibli S. M.* // Liq. Cryst. 2003. Vol. 30. № 1. P. 59 – 64.
 13. *Аверьянов Е. М.* // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2007. Вып. 2. С. 63 – 73.
 14. *Phillips T. J., Jones J. C.* // Liq. Cryst. 1994. Vol. 16. № 5. P. 805 – 812.
 15. *Минеев Л. И., Курсанов Е. А.* // Жидкие кристаллы и их практическое применение: Межвуз. сб. / Под ред. И. Г. Чистякова. Иваново: Иван. гос. ун-т, 1976. С. 32 – 37.
 16. *Аверьянов Е. М.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. № 5. С. 1820 – 1840.
 17. *Chao N.-M., Chu K. C., Shen Y. R.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1982. Vol. 81. № 1 – 2. P. 103 – 120.
 18. *Warmerdam T. W., Nolte R. J. M., Drenth W. et al.* // Liq. Cryst. 1988. Vol. 3. № 8. P. 1087 – 1104.
 19. *Аверьянов Е. М.* // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2007. Вып. 3. С. 5 – 13.
 20. *Madhusudana N. V., Dhara S.* // Eur. Phys. J. E. 2004. Vol. 13. № 2. P. 401 – 408.
 21. *Блинов Л. М., Кац Е. И., Сонин А. А.* // УФН. 1987. Т. 152. № 3. С. 449 – 477.
 22. *Анисимов М. А.* Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. М.: Наука, 1987. 271 с.
 23. *Kumar S., Litster J. D., Rosenblatt C.* // Phys. Rev. A. 1983. Vol. 28. № 3. P. 1890 – 1892.
 24. *Аверьянов Е. М.* // ФТТ. 2005. Т. 47. № 2. С. 365 – 375.

Поступила в редакцию 22.06.2007 г.