

УДК 539.6:539.22

Е. Н. Васильчикова, Н. Н. Барабанова, М. И. Козеева, Д. Л. Богданов, В. В. Беляев, А. К. Дадиванян

**ОРИЕНТАЦИОННЫЙ ПОРЯДОК В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МЕЗОГЕНОВ
ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗОТРОПНАЯ ФАЗА – НЕМАТИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ**

Московский государственный областной университет (МГОУ),
ул. Радио, д. 10а, 105005 Москва, Россия. E-mail: dadivank@mail.ru

Методом поляризационной микроскопии исследован ориентированный слой мезогенов на поверхности раздела фаз при переходе изотропная фаза – нематический жидкий кристалл. Определена толщина ориентированного слоя, равная $50 \div 1000$ мкм и убывающая с уменьшением радиуса кривизны поверхности. Получены аналитические выражения для разности фаз, возникающей при прохождении плоскополяризованного света через слой мезогена, ориентированного относительно цилиндрической и сферической поверхностей. Определен параметр порядка в мезогенах при переходе изотропная фаза – нематический жидкий кристалл.

Ключевые слова: жидкий кристалл, поляризационная микроскопия, ориентированный слой, двойное лучепреломление, параметр порядка.

E. N. Vasilchikova, N. N. Barabanova, M. I. Kozeeva, D. L. Bogdanov, V. V. Belyaev, A. K. Dadivanyan

**ORIENTATIONAL ORDER IN SURFACE LAYERS OF MESOGENS
AT THE ISOTROPIC PHASE – NEMATIC LIQUID CRYSTAL TRANSITION**

Moscow State Regional University (MSRU),
Radio str., 10a, 105005 Moscow, Russia. E-mail: dadivank@mail.ru

The oriented layer of mesogens on the interphase at the isotropic phase – nematic liquid crystal transition has been studied by the polarization microscopy method. The thickness of the oriented layer was found being equal to $50 \div 1000$ mcm and it decreases with the decrease of the surface curvature radius. Analytical expressions for the phase difference arising at passing of plane-polarized light through the mesogen layer oriented towards cylindrical and spherical surfaces were derived. The order parameter in mesogens at the isotropic phase – nematic liquid crystal transition was determined.

Key words: liquid crystal, polarization microscopy, oriented layer, birefringence, order parameter.

Введение

Исследование ориентационного порядка при переходе изотропная фаза – жидкий кристалл весьма актуально, так как упорядочение при этом переходе определяет степень порядка в жидком кристалле (ЖК). Особенно интересно поведение мезогенов на поверхности раздела, так как важные характеристики жидких кристаллов, в частности энергия сцепления, параметр порядка и другие, в значительной мере определяются ориентацией молекул мезогенов на поверхности раздела фаз [1–13].

В жидких кристаллах толщина ориентационного слоя достигает величины нескольких сот микрометров, параметр порядка $S = \frac{3\overline{\cos^2 \vartheta} - 1}{2}$,

где ϑ – угол между осью симметрии молекулы и нормалью к поверхности имеет порядок 10^{-1} [14, 15]. В стеклообразных полимерах на поверхности раздела с другими фазами также существует ориентационный порядок, который простирается на сотни микрометров. При этом величина S имеет порядок $10^{-3} \div 10^{-1}$ [16, 17]. В жидкостях и в высокоэластичных полимерах этот порядок распространяется на расстояниях не более нескольких нанометров. В растворах полимеров молекулы растворителя образуют ориентированный монослой, в котором параметр порядка меняется в пределах $0,03 \div 0,1$ [18, 19] и увеличивается с понижением температуры [20, 21].

Свойства изотропной фазы мезогенов в области фазового перехода изотропная фаза – жидкий кристалл существенно отличаются от их свойств как в изотропной фазе, так и в жидкокристаллической [14, 22]. Поэтому представляет интерес оценить параметр порядка и толщину ориентированного слоя в области перехода мезогенов из изотропной фазы в ЖК.

Экспериментальная часть

Нами был исследован образец ЖК Н-96. Был приготовлен раствор ЖК в бензоле, объемная доля ЖК составляла 0,5. Исследования проводились с использованием поляризационных микроскопов «ПОЛАМ Р-112» и «МПСУ-1» при температуре 21 °С. Был использован фильтр для длины волны $\lambda = 550$ нм. Раствор помещался на предметное стекло микроскопа и в него погружались различные образцы со сферической и цилиндрической поверхностью разного диаметра: медная проволока, кератиновые волокна и частицы, металлические и пластмассовые шарики.

При объемной доле ЖК меньше 0,7 раствор был изотропным, о чем свидетельствовало отсутствие двойного лучепреломления (ДЛП).

При объемной доле ЖК 0,7 при скрещенных поляризаторах на границе с цилиндрическими поверхностями появлялись интерференционные полосы, интенсивность которых изменялась с течением времени (рис. 1, а, 1, б).

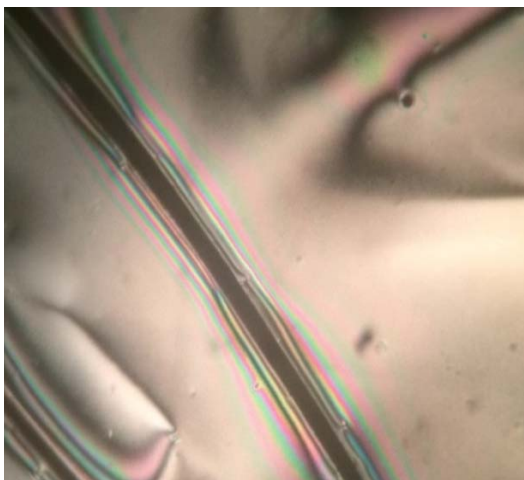


Рис. 1, а. Ориентационный порядок на поверхности раздела с кератиновым волокном

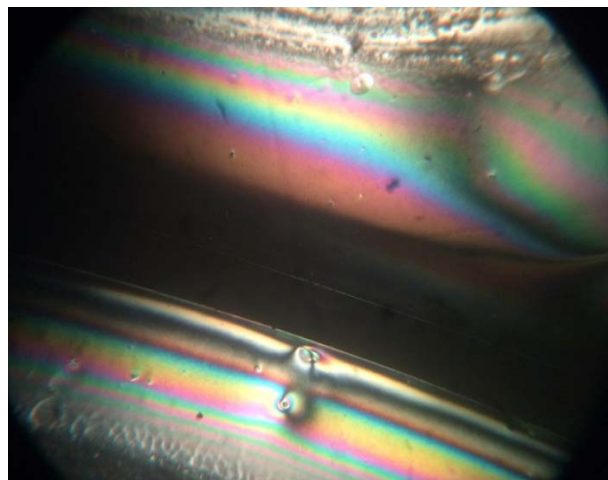


Рис. 1, б. Ориентационный порядок на поверхности раздела с медной проволокой

Такое поведение образца свидетельствует об изменении двойного лучепреломления света в граничном слое мезогена. На линии максимальной яркости ближайшей к границе раздела полосы в начале эксперимента разность хода равна $\lambda/2$. С течением времени эта полоса затемняется, и при последующем просветлении линии максимальной яркости соответствуют разности хода $\frac{3}{2}\lambda$ и т. д.

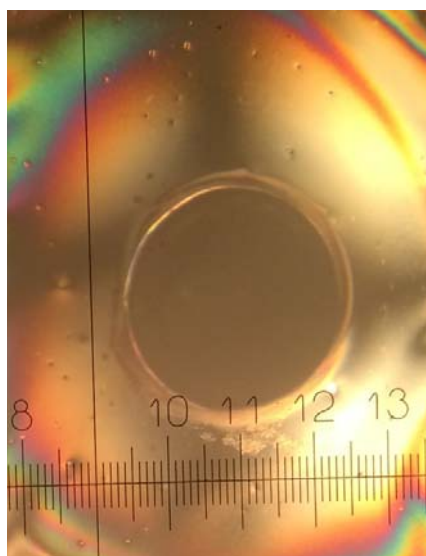


Рис. 1, в. Ориентационный порядок на поверхности раздела с металлическим шариком ($r_0 = 0,375$ мм)

С удалением от поверхности разность хода уменьшается для каждой следующей полосы на $\lambda/2$. В случае сферических частиц, а также пузырька воздуха, появлялось 4 лепестка с концентрическими дугowymi полосами (рис.1, в, з). Полосы образовывали мальтийский крест. При удалении фильтра получалась картина, состоящая из разноцветных полос.

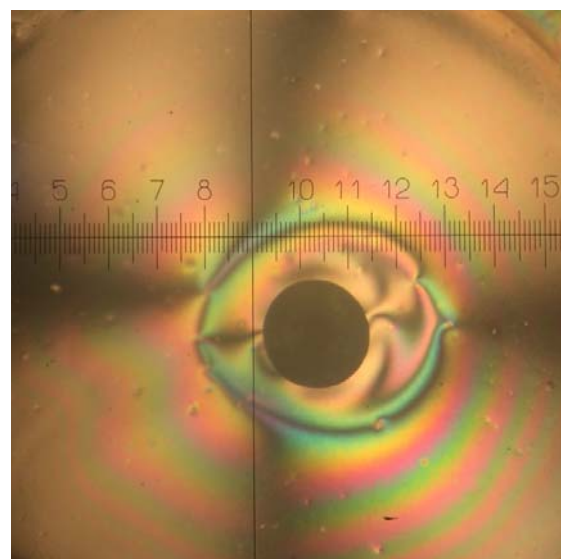


Рис. 1, з. Ориентационный порядок на поверхности раздела с полимерным шариком ($r_0 = 0,4$ мм)

Найдем выражение для разности фаз δ , возникающей при прохождении поляризованного света через слой dl вещества, ориентированного относительно цилиндрической или сферической поверхности (рис. 2). Величина разности фаз равна:

$$\delta = \int_{-\beta_0}^{\beta_0} d\delta, \quad (1)$$

где

$$d\delta = \frac{2\pi\Delta n dl}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n r d\beta}{\lambda \cos^2 \beta}, \quad (2)$$

Δn – величина ДЛП, обусловленная ориентированным слоем мезогена; r – расстояние от исследуемого луча до центра кривизны поверхности; l – расстояние, которое происходит луч света в образце; β – угол, определяемый соотношением $\operatorname{tg}\beta = \frac{l}{2r}$; λ – длина волны света.

Величина Δn определяется соотношением

$$\Delta n = \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2 \frac{2\pi N}{n} (a_{zz} - a_{yy}), \quad (3)$$

где n – средний показатель преломления образца, N – число молекул мезогена в единице объема.

Найдем разность поляризуемостей ($a_{zz} - a_{yy}$). Пусть главные оптические поляризуемости молекулы в собственной системе координат 1,2,3 равны $a_1, a_2 = a_3$.

Найдем поляризуемости молекулы в системе координат x', y', z' , связанной с частицей, относительно которой ориентируется молекула (рис. 2), по соотношению $a_{ik} = \sum a_{\sigma\tau} \cos(\sigma, i) \cos(\tau, k)$, где $i, k = x', y', z', \sigma, \tau = 1, 2, 3$.

Для этого воспользуемся формулами перехода, приведенными в работе [6] (рис. 3, табл.).

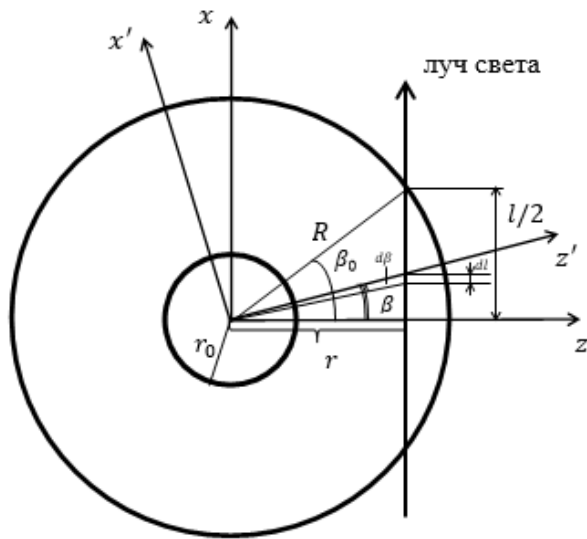


Рис. 2. Система координат x', y', z' , связанная с цилиндрической поверхностью:

x, y, z – неподвижная система координат; R – радиус кривизны внешней поверхности сферического или цилиндрического ориентированного слоя; r – расстояние исследуемого луча до центра кривизны поверхности; $l/2$ – расстояние, проходимое лучом света в ориентированном слое; β – угол, определяемый соотношением $\text{tg}\beta = l/2r$

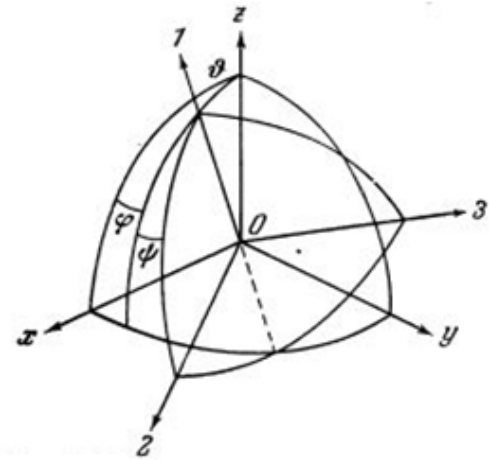


Рис. 3. Взаимное расположение лабораторной (неподвижной) x, y, z и молекулярной (подвижной) 1, 2, 3 систем координат

Косинусы углов перехода $\cos(i, x), \cos(i, y), \cos(i, z)$ от неподвижной системы координат x, y, z к подвижной (молекулярной) 1, 2, 3

	x	y	z
1	$\sin\vartheta \cdot \cos\varphi$	$\sin\vartheta \cdot \sin\varphi$	$\cos\vartheta$
2	$\cos\varphi \cdot \cos\psi \cdot \cos\vartheta - \sin\varphi \cdot \sin\psi$	$\sin\psi \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi \cdot \cos\vartheta$	$-\sin\vartheta \cdot \cos\psi$
3	$\sin\psi \cdot \cos\varphi \cdot \cos\vartheta - \cos\psi \cdot \sin\varphi$	$\cos\psi \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi \cdot \cos\vartheta$	$\sin\vartheta \cdot \sin\psi$

Рассмотрим случай аксиально симметричных молекул ($\alpha_2 = \alpha_3$). В этом случае вращение вокруг оси 1 не изменит оптических свойств системы, поэтому ψ можно взять любым, в частности, равным нулю. Считая распределение по φ равновероятным, после усреднения по φ и ϑ для компонент тензора поляризуемости молекулы мезогена в системе координат x', y', z' получим выражения:

$$\alpha_{x'x'} = \alpha_{y'y'} = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)\overline{\sin^2 \vartheta} + \alpha_2,$$

$$\alpha_{z'z'} = (\alpha_1 - \alpha_2)\overline{\cos^2 \vartheta} + \alpha_2.$$

Для нахождения компонент тензора поляризуемости в системе координат x, y, z воспользуемся рис. 1 и табл. 1. Как уже отмечалось, ψ можно считать равным нулю, φ равняется 0, так как ось x' направлена по x , а y' по y . Угол между осями z и z' берем равным β .

Так как луч света направлен по оси x , нам необходимо найти компоненты α_{zz} и α_{yy} :

$$\alpha_{yy} = \alpha_{y'y'};$$

$$\alpha_{zz} = (\alpha_{z'z'} - \alpha_{x'x'}) \cdot \cos^2 \beta + \alpha_{x'x'};$$

$$\begin{aligned} \alpha_{zz} - \alpha_{yy} &= (\overline{\alpha_{z'z'}} - \overline{\alpha_{x'y'}}) \cos^2 \beta + \overline{\alpha_{x'x'}} - \overline{\alpha_{y'y'}} = \\ &= \left[(\alpha_1 - \alpha_2) (\overline{\cos^2 \vartheta} - \frac{1}{2} \overline{\sin^2 \vartheta}) \right] \cos^2 \beta = \\ &= (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{3\overline{\cos^2 \vartheta} - 1}{2} \cos^2 \beta = (\alpha_1 - \alpha_2) S \cos^2 \beta. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя в (1) выражения (2)–(4), получим:

$$\begin{aligned} d\delta &= \frac{2\pi N}{\lambda n} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) S r d\beta; \\ \delta &= \frac{8\pi^2 N}{\lambda n} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) S r \beta_0 = \\ &= \frac{8\pi^2 N}{\lambda n} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) S r \arccos \left(\frac{r}{R} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Для разности фаз δ , возникающей при прохождении плоскополяризованного света через сферический слой, было получено выражение:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{8\pi^2 N}{\lambda n} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) S r \sin 2\chi \cdot \\ &\cdot \left\{ 3 \arccos \left(\frac{r}{R} \right) - \operatorname{tg} \left[\arccos \left(\frac{r}{R} \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где χ – угол между плоскостью поляризации и направлением, в котором наблюдается двойное лучепреломление.

Аналогичный подход был использован одним из авторов для определения параметра порядка в

стеклообразных полимерах на поверхности раздела с цилиндрическими и сферическими поверхностями [12]. Однако в этой работе величина δ определялась не из соотношения (2), а из соотношения

$$\delta = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda}, \quad (6)$$

которое справедливо при $l \ll \lambda$.

На рисунке 4 приведена зависимость δ / δ_{\max} от соотношения r/R , полученная по соотношению (5). Там же приведены экспериментальные данные, полученные нами при различных значениях R . Результаты эксперимента соответствуют кривой, полученной из выражения (5), что свидетельствует о правильности теоретических результатов, полученных нами.

Пользуясь соотношением (5), можно определить параметр порядка S . Однако для этого надо знать, сколько длин волн помещается в разность хода, соответствующую измеряемой разности фаз. Это можно выяснить, рассмотрев зависимость интенсивности интерференционной картины от величин r/R .

Энергия световой волны, прошедшей через двупреломляющий ориентированный слой, равна квадрату напряженности электрического поля:

$$W = 2E_0^2 \sin^2 \delta \cos^2(\omega t + \delta),$$

и после усреднения по времени имеем:

$$\overline{W} = E_0^2 \sin^2 \delta = W_0 \sin^2 \delta,$$

где W_0 – энергия световой волны до прохождения через двупреломляющий слой.

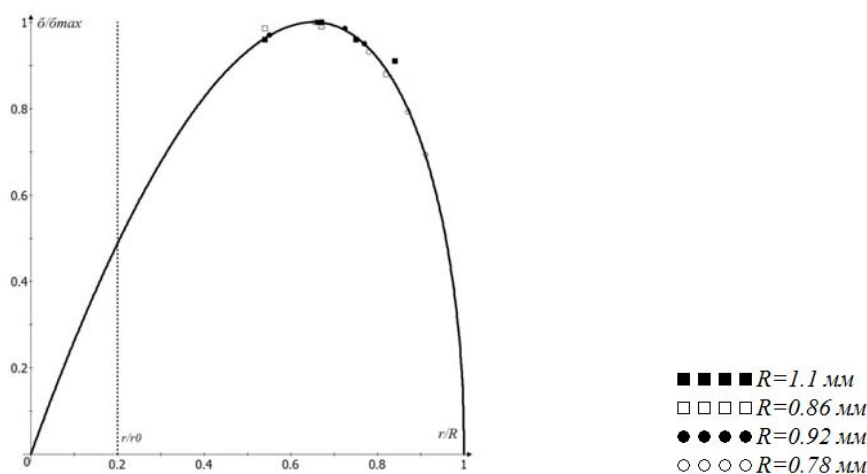


Рис. 4. Зависимость величины δ / δ_{\max} от соотношения r/R , r_0 – радиус образца

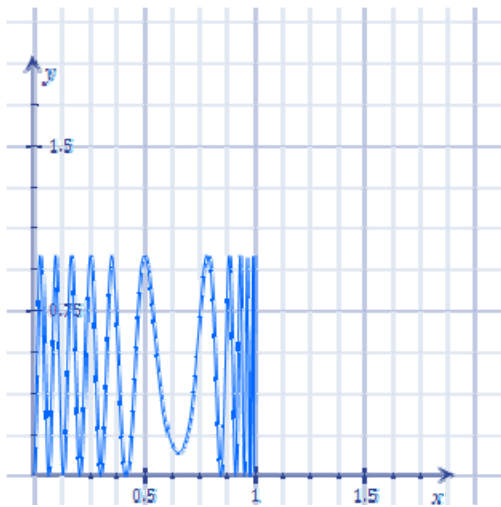
Тогда интенсивность света, прошедшего через двупреломляющий слой, будет равна:

$$J = J_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = J_0 \sin^2 \left[\frac{4\pi^2 N \left(\frac{n^2+2}{3}\right)^2}{\lambda n} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) S r \arccos\left(\frac{r}{R}\right) \right]. \quad (7)$$

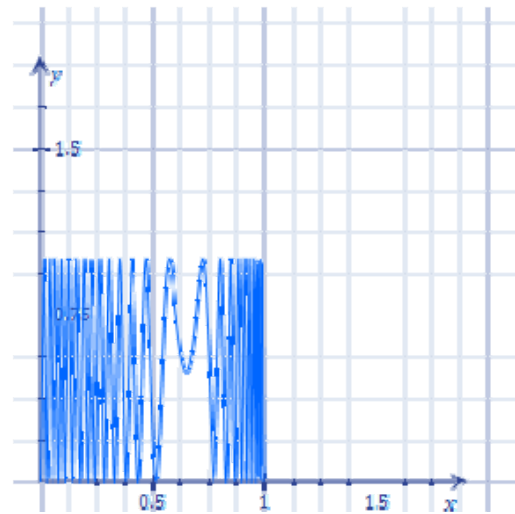
Зависимость J от r/R при различных значениях $S r \arccos(r/R)$ приведена на рис. 5.

Максимумы соответствуют значениям разности фаз $\frac{2k+1}{2} \cdot \frac{\pi}{4}$.

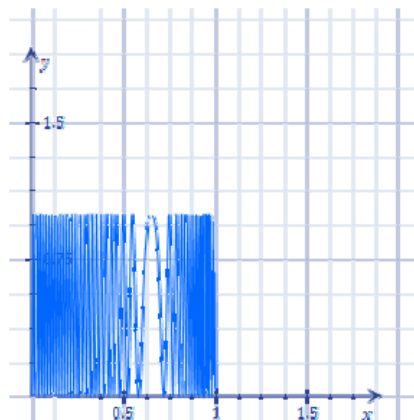
Как следует из рис. 5, интерференционные полосы вблизи внешней границы ориентированного слоя имеют малую ширину и различаются слабо. Поэтому можно измерить величины r_n и r_{n+1} , соответствующие разности фаз далеких от внешней границы n -ой и $n+1$ -ой полос δ_n и δ_{n+1} , и по этим значениям определить параметр порядка.



$$\gamma = R\lambda = 300$$



$$\gamma = R\lambda = 700$$



$$\gamma = R\lambda = 1500$$

Рис. 5. Зависимости относительной интенсивности интерференционной картины $y = I/I_0$ от величины $x = r/R$ при различных значениях параметра $\gamma = R\lambda$

Используя значение разности поляризуемостей $\alpha_1 - \alpha_2 = 2 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3$, рассчитанной по валентно-оптической схеме, мы нашли значение S , которое оказалось равным $2 \cdot 10^{-2}$. Это означает, что параметр порядка примерно на порядок меньше, чем в жидких кристаллах.

Выводы

1. Определена толщина ориентированного слоя в мезогенах на поверхности раздела фаз при переходе изотропная фаза – нематический жидкий кристалл. Показано, что толщина ориентированного слоя убывает с радиусом кривизны поверхности и равна $50 \text{ мкм} \div 1000 \text{ мкм}$.

2. Получены аналитические выражения для разности фаз, возникающей при прохождении плоскополяризованного света через слой мезогена, ориентированный относительно цилиндрической и сферической поверхностей.

3. Полученные выражения находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

4. Определен параметр порядка в мезогенах при переходе изотропная фаза – нематический жидкий кристалл.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-07-00574_а).

Список литературы / References

1. Коньяр Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей. Минск, 1986. 104 с. [Cognard J. Alignment of nematic liquid crystals and their mixtures. London bridge science publishers, London, New-York, Paris, 1982. 101 p.]
2. Pikin S. A. Structural Transformations in Liquid Crystals. Gordon and Breach Science Publishers, NY, 1991. 229 p.
3. Блинов Л. М., Фридкин В. М., Палто С. П., Буне А. В., Даубен П. А., Дюшарм С. Двумерные сегнетоэлектрики // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, № 3. С. 247–262 [Blinov L. M., Ducharme S., Palto S. P., Fridkin V. M., Bune A. V., Dowben P. A. Two-dimensional ferroelectrics // Physics-Uspekh. 2000. Vol. 43, № 3. P. 243–257. DOI: 10.1070/PU2000v043n03ABEH000639].
4. Belyakov V. A., Kats E. I. Surface anchoring and pitch variation in thin smectic C* layers in an electric field // JETP. 2001. Vol. 93, Iss. 2. P. 380–392. DOI: 10.1134/1.1402738.
5. Belyakov V. A., Stewart I. W., Osipov M. A. Surface anchoring and dynamics of jump-wise director reorientations in planar cholesteric layers // Phys. Rev. E 71. 2005. P. 051708 (12 p.). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.71.051708>.
6. Kiselev A. D., Chigrinov V. G., Dan Ding Huang. Photoinduced ordering and anchoring properties of azo-dye films // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 72. P. 061703.
7. Belyakov V. A. Defect modes in chiral liquid crystals: an analytic approach // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. Vol. 494, Iss. 1. P. 127–152. DOI: 10.1080/15421400802429879.
8. Дадиванян А. К., Чаусов Д. Н., Пашина Ю. М., Беляев В. В. Моделирование ориентации молекул жидкокристаллического октилцианбифенила на поверхности кристаллов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2010. Вып. 4. С. 61–69 [Dadivanyan A. K., Chausov D. N., Pashinina Yu. M., Belyaev V. V. Modelirovanie orientatsii molekul zhidkokristallicheskogo oktiltsianbifenila na poverkhnosti kristallov (Simulation of LC octylcyanbiphenyl molecules orientation on the crystals surface) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie (Liq. Cryst. & Appl. Russ. J.). 2010. Vol. 4. P. 61–69 (in Russian)].
9. Dolganov P. V., Zhilin V. M., Dolganov V. K., Kats E. I. Manifold of polar smectic liquid crystals with spatial modulation of the order parameter // Phys. Rev. E. 2011. Vol. 83. P. 061705.
10. Benderskii V. A., Kats E. I. Non-ergodic dynamics of Nanosystems // J. Appl. Funct. Anal. 2011. Vol. 6, Iss.1. P. 26–36.
11. Dadivanyan A. K., Pashinina Yu. M., Chausov D. N., Belyaev V. V., Solomatin A. S. Mesogen Molecules Orientation on Crystal Surfaces // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2011. Vol. 545. P. 159/1383–167/[1391].
12. Дадиванян А. К., Чаусов Д. Н., Ноа О. В., Беляев В. В., Чигринов В. Г., Пашина Ю. М. Влияние параметра порядка на энергию сцепления жидких кристаллов // ЖЭТФ. 2012. Т. 142, вып. 12. С. 1253–1257 [Dadivanyan A. K., Chausov D. N., Belyaev V. V., Pashinina Yu. M., Noa O. B., Chigrinov V. G. Influence of the Order Parameter on the Anchoring Energy of Liquid Crystals // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2012. Vol. 115, № 6. P. 1100–1104. DOI: 10.1134/S1063776112110027].
13. Беляев В. В., Соломатин А. С., Чаусов Д. Н. Оптические свойства ЖК-ячеек с произвольным краевым углом наклона директора // Вестник МГОУ. Сер.: Физика–Математика. 2013. № 1. С. 32–40 [Belyaev V. V., Solomatin A. S., Chausov D. N. Opticheskie svoystva ZhK-yacheek s proizvol'nym kraevym uglom naklona direktora (Optical properties of the liquid crystal in cells with arbitrary LC director pretilt angle) // Vestnik MGOU. Ser. «Fizika-Matematika» (Bulletin of the MSRU). 2013. Vol. 1. P. 32–40 (in Russian)].

14. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с. [*de Gennes P. G. The Physics of Liquid Crystals. Claredon Press, Oxford, 1974. 400 p.*].
15. Беляев В. В., Соломатин А. С. Ориентационные и оптические свойства слоев жидкого кристалла с одной ориентирующей и одной неориентирующей поверхностью // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Т. 14, № 2. С. 4–20 [*Belyaev V. V., Solomatina A. S. Orientational and optical properties of liquid crystalline layers with orienting and non-orienting surfaces // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie (Liq. Cryst. & Appl. Russ. J.). 2014. Vol. 14, № 2. P. 4–20 (in Russian)*].
16. Саркисян В. А., Асратян М. Г., Мхитарян А. А., Катрдзьян К. Х., Дадиванян А. К. Ориентация макромолекул на поверхности раздела полимера с наполнителями // Высокомолек. соед. Сер. А. 1985. Т. 27, № 6. С. 1331–1335 [*Sarkisyan V. A., Asratyan M. G., Mkhitarjan A. A., Katrdzhyan K. Kh., Dadivanyan A. K. Orientation of macromolecules at the interface of polymer and fillers // Polymer Science U.S.S.R. 1985. Vol. 27, Iss. 6. P. 1494–1498. Doi:10.1016/0032-3950(85)90299-0*].
17. Глушко И. К., Губина Л. Н., Дубровицкий В. И., Смехов Ф. М., Кабанов Н. М., Дадиванян А. К. Ориентационный порядок на поверхности раздела стеклообразных диановых олигомеров с другими фазами // Высокомолек. соед. Сер. А. 1989. Т. 31, № 10. С. 2224–2229 [*Glushko I. K., Gubina L. N., Dubrovitskii V. I., Smekhov F. M., Kabanov N. M., Dadivanyan A. K. Orientational order near the boundaries of glassy diene-based oligomers with the surrounding phases // Polymer Science U.S.S.R. 1989. Vol. 31, Iss. 10. P. 2446–2452*].
18. Frisman E. V., Dadivanyan A. K. Effect of solvent on the optical behavior of macromolecules in a laminar flow // *J. Polymer Sci. Part C. 1967. Vol. 16, Iss. 2. P. 1001–1009. DOI: 10.1002/polc.5070160235*.
19. Дадиванян А. К., Адоңц В. Г., Айрапетян Г. А., Кан П. С., Левинтал С. Средняя степень ориентации молекул растворителя относительно полимерных цепей // Высокомолек. соед. 1977. Т. 19. С. 392. [*Dadivanyan A. K., Adonts V. G., Ayrapetyan G. A., Kan P. S., Levintal S. Srednyaya stepen' orientatsii molekul rastvoritelya otnositel'no polimernykh tsepey (Mean orientation degree of solvent molecules on polymer chains) // Visokomolek. soed. 1977. Vol. 19. P. 392 (in Russian)*].
20. Дадиванян А. К., Игнатов Ю. А., Ноа О. В. Температурная зависимость степени ориентационного порядка в растворах полимеров // Вестник Московского государственного областного университета: Труды Центра фундаментальных научных исследований. 2006. № 2. С. 49–54 [*Dadivanyan A. K., Ignatov Yu. A., Noa O. V. Temperaturnaya zavisimost' stepeni orientatsionnogo poriyadka v rastvorakh polimerov (Temperature dependence of the orientational order degree in polymer solutions) // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta: Trudy Tsentra fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy. 2006. № 2. P. 49–54 (in Russian)*].
21. Дадиванян А. К., Ноа О. В. Ближний ориентационный порядок и термодинамические свойства растворов полимеров // Высокомолек. соед. Сер. А. 2007. Т. 49, № 2. С. 313–320 [*Dadivanyan A. K., Noa O. V. Short-range orientational order and thermodynamic properties of polymer solutions // Polymer Science. Series A. 2007. Vol. 49, № 2. P. 198–204. DOI: 10.1134/S0965545X07020137*].
22. Цветков В. Н., Рюмцев Е. И. Флуктуации ориентационного порядка в аморфной фазе ЖК-веществ и их электрооптические свойства // ДАН СССР. 1967. Т. 176. С. 382 [*Tsvetkov V. N., Ryumtsev E. I. Fluktuatsii orientatsionnogo poriyadka v amorfnoy faze ZhK-veshchestv i ikh elektroopticheskie svoystva (Fluctuations orientation order in the amorphous phase LC-matter and their electro-optical properties) // DAN SSSR (Reports of the Academy of Sciences of the USSR). 1967. Vol. 176. P. 382. (in Russian)*].

Поступила в редакцию 22.05.2014 г.