

УДК 535, 534

О. А. Денисова

ФЛЕКСОПОЛЯРИЗАЦИЯ ВБЛИЗИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА НЕМАТИЧЕСКАЯ МЕЗОФАЗА – ИЗОТРОПНАЯ ЖИДКОСТЬ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
ул. Космонавтов, 1, 450062 Уфа, Россия. E-mail: denisovaolga@bk.ru

Методами модуляционной акустической спектроскопии изучался флексоэлектрический эффект в нематических жидких кристаллах. Использовалась ячейка типа «сэндвич», состоящая из трех пластин, разделенных прокладками, одна из которых подвижная. Она совершала сдвиговые колебания в горизонтальной плоскости. Исследовались тонкие слои нематических жидких кристаллов с гомеотропной ориентацией молекул толщиной от 20 до 100 мкм. Частота возбуждения 1 кГц. В рамках модели, предложенной Де Женом, основанной на теории фазовых переходов Ландау, сигнал наблюдаемый вблизи фазового перехода мезофаза – изотропное состояние имеет флексоэлектрическую природу и обусловлен дипольным механизмом. В работе исследованы температурные зависимости пьезосигнала, индуцированного сдвиговыми колебаниями, температурное влияние на величину среднего постоянного угла наклона $\bar{\theta}_c$ и амплитуды колебаний $\bar{\theta}_a$ директора жидкого кристалла. Так же получены зависимости флексокоэффициентов e_{33} от температуры для исследуемых жидких кристаллов, которые демонстрируют роль дипольного и квадрупольного механизмов в наблюдаемой молекулярно-ориентационной поляризации. Актуальность изучения рассматриваемой проблемы связана с возможностью создания жидкокристаллических дисплеев или транспарантов нового поколения. Использование жидких кристаллов дает ряд преимуществ (облегчение конструкции, малая потребляемая мощность и габаритные размеры, дешевизна).

Ключевые слова: нематические жидкие кристаллы, пьезоэлектрический эффект, флексоэлектрическая поляризация.

DOI: 10.18083/LCAppl.2017.2.14

О. А. Denisova

FLEXOPOLARIZATION IN THE VICINITY OF THE NEMATIC MESOPHASE – ISOTROPIC LIQUID PHASE TRANSITION

Department of Physics, Ufa State Petroleum Technological University,
1 Kosmonavtov St., Ufa, 450062, Russia. E-mail: denisovaolga@bk.ru

Flexoelectric effect in nematic liquid crystals was studied by modulation acoustic spectroscopy. A «sandwich» type cell, consisting of three plates separated by spacers, one of which is movable, was used. The movable spacer made shear vibrations in the horizontal plane. Thin layers of nematic liquid crystals with a homeotropic orientation of molecules and layer thickness of 20 to 100 μm were studied. The excitation frequency was 1 kHz. In the framework of the model proposed by De Gen, based on the Landau theory of phase transitions, the signal observed near the mesophase – isotropic liquid phase transition is of a flexoelectric nature and is due to a dipole mechanism. The temperature dependences of a piezoelectric signal induced by shear vibrations, the temperature influence on the value of the average constant angle of inclination $\bar{\theta}_c$, and the oscillation amplitude

$\bar{\theta}_d$ of the director of a liquid crystal were investigated. The dependences of the flexo-coefficients e_{33} on temperature for the studied liquid crystals, which demonstrate the role of dipole and quadrupole mechanisms in the observed molecular-orientation polarization, were also obtained. The relevance of the studied problem is connected with the possibility of creating liquid crystal displays or banners of a new generation. The use of liquid crystals offers a number of advantages (simplification of design, low power consumption, moderate overall dimensions and low cost).

Key words: nematic liquid crystals, piezoelectric effect, flexoelectric polarization.

Введение

Молекулярный порядок в жидких кристаллах (ЖК) приводит к анизотропии его физических свойств, которые определяют высокую чувствительность таких систем по отношению к изменению температуры и концентрации примесей, а также к действию электрических и магнитных полей, упругих напряжений и вязкого течения. Большинство эффектов, наблюдаемых в ЖК, связанных с особенностями их структурных превращений, не имеют аналогов в твердых телах и в изотропных жидкостях. К числу таких эффектов относится и пьезоэлектрический эффект. По определению прямой пьезоэффект в твердых кристаллах есть возникновение макроскопической объемной поляризации под действием механических напряжений или деформаций [1]. В жидких кристаллах, большинство из которых обладают центром симметрии, такой механизм невозможен. Однако, как показал Мейер [2], в нематической среде реализуется особый пьезоэлектрический эффект, который принято сейчас называть флексоэлектрическим (флексо – изгиб) [3]. Он заключается в появлении электрической поляризации \vec{P} в результате деформации изгиба или закручивания линий ориентации директора в пространстве вследствие взаимодействия дипольных молекул, имеющих анизотропную геометрическую форму.

Актуальность изучения вопроса распространения поперечных волн в жидких кристаллах [4–14] связана с перспективами практического применения в технике, например для создания дисплеев нового поколения. Применение жидких кристаллов означает экономическую эффективность, простоту, удобство, небольшие габариты устройств и малые потребляемые мощности. В связи с этим в настоящей работе исследован флексоэлектрический эффект в окрестности перехода нематический жидкий кристалл – изотропная жидкость.

Эксперимент

Для экспериментального исследования флексоэлектрического эффекта была разработана и собрана установка, блок-схема которой изображена на рис. 1. Прошедшая или отраженная световая волна от ячейки регистрируется спектрофотометрической приставкой, и постоянная компонента светового потока далее фиксируется милливольтметром постоянного тока. Переменные во времени гармоники интенсивности $I(n\omega t)$ усиливались и детектировались селективным усилителем, и сигнал выводится через АЦП на компьютер. Измерения проводятся в диапазоне звуковых частот 20 Гц – 20 кГц. Для регистрации структур объектов использовалась камера.

Ячейка с ЖК помещалась на предметный столик микроскопа и закреплялась. В нашем случае изучалось влияние на жидкокристаллическую пленку сдвиговых колебаний. Для создания акустического контакта мембрана диффузора соединялась с ячейкой при помощи стеклянного волновода. Излагаемая методика позволяла измерять амплитуду чисто оптическим способом [10].

Экспериментальное изучение флексоэлектрического эффекта, индуцированного поперечной волной в нематическом жидком кристалле (НЖК), проводились на ячейке типа «сэндвич». Ячейка собирается из трех прозрачных стеклянных пластин с проводящими покрытиями из хрома Cr, две из них были приготовлены из предметного стекла (20 x 30 x 2 мм), подвижная средняя пластина – из покровного стекла размером 24 x 24 мм и толщиной 100 мкм. Ячейка представляла собой конденсатор с некоторой частью свободного пространства, в который посредством микрошприца заправлялся ЖК.

В работе рассматривались нематические ЖК-пленки толщиной $h \sim 20\text{--}100$ мкм: *n*-метоксибензилиден-*n*-бутиланилин (МББА), цианофениловый эфир гептилбензойной кислоты (ЦФЭГБК),

нитрофенилоктилоксибензоат (НФООБ), 4-октил-4-цианобифенил (ОЦБ), будетилгептаноил-азоксибензол (БГАОБ); смеси ЖК на основе

двухкольчатых эфиров (ДКЭ) (жидкие кристаллы, имеющие смектическую и нематическую мезофазу) [10].

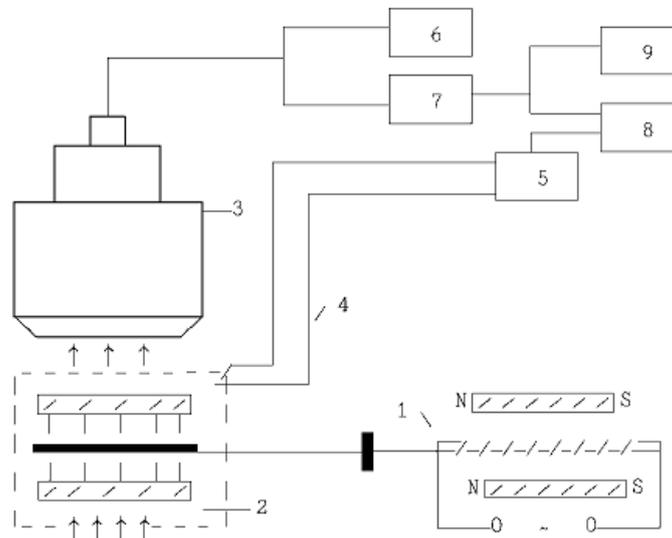


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования поляризационно-оптических эффектов:

1 – источник звуковых колебаний, 2 – предметный столик, 3 – поляризационный микроскоп с фотометрической приставкой, 4 – дифференциальная термопара, 5 – микровольтметр постоянного тока, 6 – милливольтметр постоянного тока, 7 – селективный усилитель У2-8, 8 – АЦП, 9 – компьютер

Fig. 1. Block diagram of a polarization-optical setup for the study of acousto-optic effects (shift):

1 – source of sound oscillations, 2 – stage, 3 – polarization microscope with photometric attachment, 4 – differential thermocouple, 5 – DC microvoltmeter, 6 – millivoltmeter Direct current, 7 – selective amplifier U2-8, 8 – ADC, 9 – computer

Рассмотрим эффекты поляризации, возникающие в изотропной фазе нематического жидкого кристалла (НЖК), при воздействии быстро осциллирующего течения, возбуждаемого колебаниями одной из ограничивающих слой НЖК-пластин. Такая вязкая волна быстро затухает. При этом величина затухания δ определяется вязкостью η , плотностью жидкости ρ и частотой колебания пластины ω и равна $\delta \approx \sqrt{\eta/\rho\omega}$ [15]. В НЖК такие колебания могут вызывать появление переменного электрического сигнала, являющегося следствием флексоэлектрического эффекта [16]. Так как в изотропной фазе поток индуцирует появление параметра порядка, то, как следствие, должна возникать флексоэлектрическая поляризация. При большой по абсолютной величине колебательной скорости v , распространяющаяся упруго-вязкая волна начи-

нает влиять на ориентацию и параметр порядка S [17], что аналогично эффекту Максвелла [18] – ориентации анизотропных молекул в потоке.

Де Жен предложил модель для описания предпереходных явлений в потоке на основе теории фазовых переходов Ландау, например, появление двойного лучепреломления в изотропной фазе [3]. Наблюдаемый сигнал за фазовым переходом имеет флексоэлектрическую природу и в данном случае обусловлен дипольным механизмом. Согласно [19] вклад в свободную энергию δF кристалла флексоэлектрического механизма можно записать следующим образом:

$$\delta F \sim e_{10} E_{\alpha} S_{\alpha\beta} \frac{\partial S_{\beta m}}{\partial x_m} + e_{30} E_{\alpha} S_{m\beta} \frac{\partial S_{\beta\alpha}}{\partial x_m},$$

где $S_{\alpha,\beta}$ – тензор параметра порядка, e_{10} – коэффициенты пропорциональности, слабо зависящие

от температуры. Откуда флексополяризация принимает вид:

$$P_\alpha = e_{10} E_\alpha S_{\alpha\beta} \frac{\partial S_{\beta m}}{\partial x_m} + e_{30} S_{m\beta} \frac{\partial S_{\beta\alpha}}{\partial x_m}.$$

Зависимость P_α от температуры и градиента скорости определяется из уравнений изотропной нематодинамики. Общая система уравнений [19]:

$$\begin{bmatrix} t_{\alpha\beta} \\ \Phi_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta & \mu \\ \mu & \nu \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{\alpha\beta} \\ R_{\alpha\beta} \end{bmatrix},$$

где $t_{\alpha\beta}$, $\Phi_{\alpha\beta}$ – обобщенные «силы», $d_{\alpha\beta}$, $R_{\alpha\beta}$ – потоки, $t_{\alpha\beta}$ – вязкий тензор напряжений. Так как $\Phi_{\alpha\beta} \approx -\partial F / \partial S_{\alpha\beta} = -A(T)S_{\alpha\beta}$

$$d_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial v_\beta}{\partial x_\alpha} \right), \quad R_{\alpha\beta} = \frac{\partial S_{\alpha\beta}}{\partial t},$$

то уравнение изотропной нематодинамики преобразуется к виду (при этом скорость v_x лежит в плоскости колеблющейся пластины, OZ перпендикулярна v_x и коллинеарна вектору нормали к поверхности):

$$\begin{aligned} -A(T)S_{xz} &= \mu \frac{\partial v_x}{\partial z} + \nu \frac{S_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} + 2\mu \frac{\partial S_{xz}}{\partial t}, \end{aligned}$$

отсюда

$$\begin{aligned} S_{xz}[A(T) + i\nu\omega] &= \mu \frac{\partial S_x}{\partial z} = \mu G, \\ A(T) &= A_0(T - T_N^*), \end{aligned}$$

$$S_{xz} = \frac{\mu G e^{i\varphi}}{\sqrt{A_0^2(T - T_N^*)^2 + \nu^2 \omega^2}}, \quad \text{tg}\varphi = \frac{\nu\omega}{A(T - T_N^*)},$$

или учитывая, что $\nu \sim \exp(-\lambda z)$, $\lambda \sim (\rho\omega/\eta)^{1/2}$ и полагая $A(T) \gg \nu\omega$, имеем

$$P_x = e_{10} S_{xz} \frac{\partial S_{zx}}{\partial x} + e_{30} S_{zx} \frac{\partial S_{zx}}{\partial x} \approx 0, \quad \text{так как} \quad \frac{\partial S_{zx}}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$P_z = e_{10} S_{zx} \frac{\partial S_{zx}}{\partial z} + e_{30} S_{zx} \frac{\partial S_{zx}}{\partial z} \approx e_{10} (T - T_N^*)^{-2} \lambda^3 S_0^2.$$

Вдали от фазового перехода, когда параметр нематического порядка S значительно больше индуцируемой добавки, $\Delta S \approx \frac{\mu}{2a(T - T^*)} \frac{\partial v}{\partial z}$ [17].

Результаты и их обсуждение

Зависимость первой гармоники сигнала $U_{1\omega}$ для *n*-метоксибензильден-*n*-бутиламина (МББА) представлена на рис. 2. Однако по мере приближения к температуре фазового перехода T_N в изотропное состояние обнаруживается существенное изменение поведения пьезосигнала.

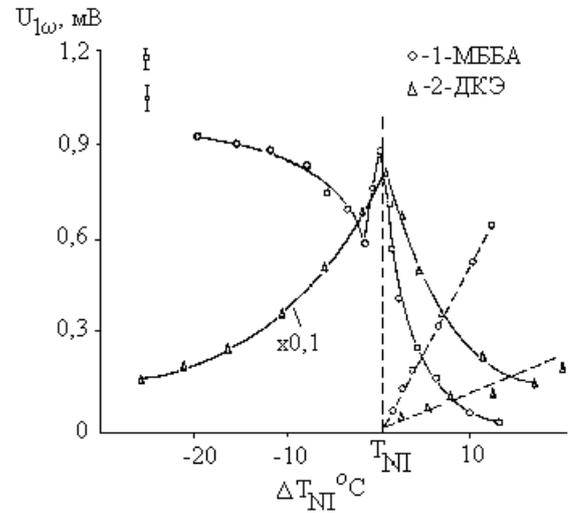


Рис. 2. Температурные зависимости первой гармоники $U_{1\omega}$ при скорости сдвига $\nu \gg \nu_c$ (сплошные линии). Зависимости корня из обратной величины сигнала от температуры (пунктирные линии)

Fig. 2. Temperature dependences of the first harmonic $U_{1\omega}$ at shear rate $\nu \gg \nu_c$ (solid lines). Dependences of the root of the reciprocal of the signal on temperature (dashed lines)

В точке фазового перехода величина сигнала не уменьшается скачком до нуля, что характерно для предпереходного поведения большинства параметров НЖК, а спадает по степенному закону от температуры типа $(T - T^*)^{-n}$, где T^* – температура фазового перехода. Анализ температурного изменения за фазовым переходом показывает, что $n \approx 2$. Аналогичная зависимость $U_{1\omega}$ имеет место и в случае исследования НЖК-смеси двухкольчатых эфиров (ДКЭ).

Эффекты, которые наблюдались в МББА и ДКЭ, имеют типичные особенности и характерны для других соединений, имеющих НЖК-фазу. Необходимо отметить, что за фазовым переходом при $T > T_c$ наблюдается зависимость флексоэлектрического сигнала, предсказанная по теории Де Жена, а величина флексоэлектрической поляризации: $P_z \sim (T - T_c)^{-2}$. Соотношение продольной и поперечной компонент поляризации P_z/P_x составляет 1,2 и 1, соответственно, для МББА и ДКЭ и находится в хорошем согласии с величинами диэлектрической проницаемости.

Согласно рис. 2 поведение величины поляризации в изотропной фазе типичное для любых НЖК и описывается формулой (1). Однако в НЖК-фазе поведение флексоэлектрической поляризации зависит от амплитуды сдвига. Например, в МББА при малых амплитудах сдвига имеет место классическое поведение, описываемое формулой (1). Когда $T > T_c$ поляризация пропорциональна $(T - T_c)^{-2}$, а в окрестности фазового перехода претерпевает скачок и далее определяется температурной зависимостью параметра порядка вдали от T_c . В этой ситуации отлична от нуля только компонента поляризации вдоль оси Z. При больших амплитудах сдвига появляется стационарный наклон директора, который зависит от амплитуды и температуры. Следствием этого будет появление второй компоненты поляризации P_x , которая сохраняется и в изотропной фазе. Зависимости величин стационарного угла девиации от температуры для трехкомпонентной смеси ДКЭ проиллюстрированы на рис. 3.

На рис. 3 также показаны две противоположные ситуации. В одной – для МББА, эффект флексоэлектрической поляризации определяет зависимость параметра порядка от температуры, когда стационарная ориентация директора определяет поведение величины индуцированной поляризации в окрестности фазового перехода НЖК–изотропная жидкость. Во второй ситуации существенными являются упругие эффекты, на которые накладывается девиация директора. Причем средний угол директора при действии сдвиговой волны определяется как $\langle \theta \rangle \sim \nu_0 \delta / K_{33}$, где $K_{33} \sim S^2$, а глубина проникания вязкой волны

$\delta \sim (T_c - T)^{-1/2}$. Однако в изотропной фазе температурное поведение индуцированной поляризации не зависит от упругости и одинаково для обоих типов соединений. Такое изменение в поведении индуцированной флексоэлектрической поляризации при появлении стационарного наклона директора в потоке косвенно указывает на изменение типа фазового перехода. Для более убедительного доказательства такого утверждения необходимы исследования термодинамических характеристик НЖК при появлении в нем поперечной вязкой волны большой интенсивности. На рис. 2 приведены соответствующие зависимости корня из обратной величины индуцированного сдвигом сигнала от величины $(T - T_N^*)$, подтверждающие ранее сделанное предположение, что наблюдаемая за фазовым переходом разность потенциалов имеет флексоэлектрическую природу.

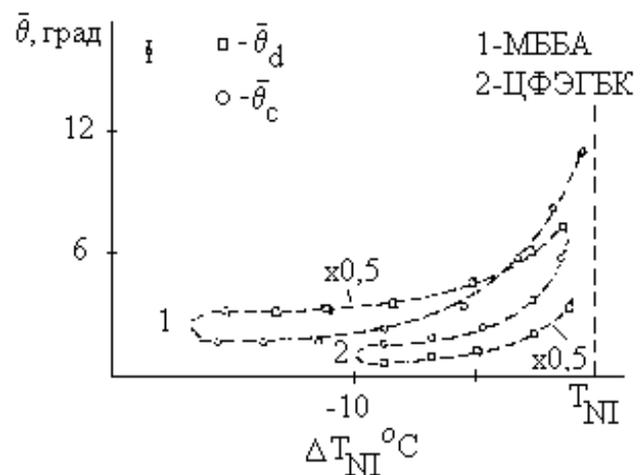


Рис. 3. Температурные зависимости угла девиации $\bar{\theta}_d$ и угла постоянного наклона $\bar{\theta}_c$ в ЖК-ячейке

Fig. 3. Temperature dependences of the deviation angle $\bar{\theta}_d$ and the angle of constant inclination $\bar{\theta}_c$ in the LC-cell

Зная температурные изменения величин, входящих в формулу для $U_{1\omega}$

$$U_{1\omega} \approx e_{33} \bar{\theta}_c \bar{\theta}_d (\lambda h^2) \exp(i\omega t),$$

получим зависимости флексокоэффициентов e_{33} для исследуемых веществ (рис. 4).

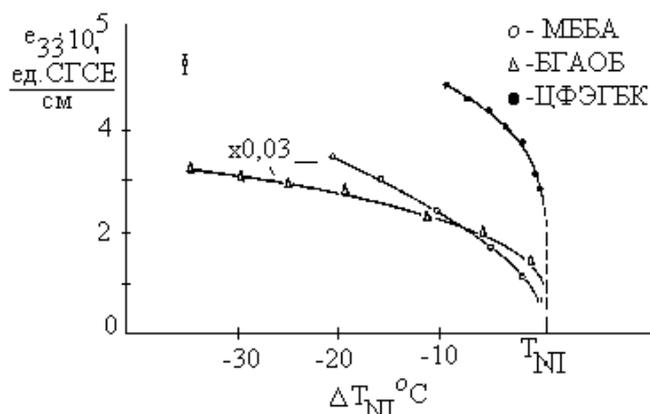


Рис. 4. Температурные зависимости величины флексоэлектрических коэффициентов e_{33} некоторых ЖК

Fig. 4. Temperature dependences of the magnitude of the flexoelectric coefficients e_{33} of some LC

Можно отметить, что функциональное поведение $e_{33}(T)$ ЖК в их нематической фазе описывается общей зависимостью от параметра порядка S как $e \sim \alpha S + \beta S^2$. Все значения весовых коэффициентов существенно отличаются в различных ЖК, но согласуются с данными, полученными для модулей e_{11} методом изгибных колебаний (табл.).

Таблица. Значения весовых коэффициентов для различных жидких кристаллов

Table. Values of weighting coefficients for various liquid crystals

Наименование кристалла	α	β
МББА	$\sim 0,1$	$\sim 0,9$
БГАОБ	$\sim 0,3$	$\sim 0,7$
ЦФЭГБК	$\sim 1,0$	—
НФООБ	$\sim 1,0$	—
ОЦБ	$\sim 1,0$	—

Например, в МББА $\alpha \sim 0,1$ $\beta \sim 0,9$, что указывает на дипольный механизм флексоэлектрической поляризации, тогда как в ЦФЭГБК $\alpha \sim 1$ $\beta \sim 0$, что говорит о квадрупольном характере флексоэлектрических коэффициентов нематиков этого класса.

Выводы

Резюмируем сказанное следующим образом. Исследованы температурные зависимости ЭДС, индуцированной сдвигами колебаниями, а также

изучено влияние температуры на величину среднего постоянного угла наклона $\bar{\theta}_c$ и амплитуды колебаний директора $\bar{\theta}_d$. Получены температурные зависимости флексокоэффициентов e_{33} для исследуемых веществ, демонстрирующие роль, которую играют дипольный и квадрупольный механизмы в индуцированной молекулярно-ориентационной поляризации. Результаты удовлетворительно согласуются с данными, полученными для флексокоэффициентов e_{11} методом изгибных колебаний. В случае немалых возмущений за фазовым переходом зарегистрирована ЭДС, которая имеет флексоэлектрическую природу. Полученные результаты могут быть использованы для разработки жидкокристаллических дисплеев нового поколения.

Список литературы / References

1. Желудев И. С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1968. 461 с. [Zheludev I.S. Physics crystalline dielectrics. Moscow: Nauka, 1968, 461 p. (in Russ.)].
2. Meyer R.V. Piezoelectric effects in liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1969, **22** (18), 918–921.
3. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 377 с. [De Gennes P.G. The Physics of Liquid Crystals. Oxford Univ. Press, 1974, 333 p.].
4. Скалдин О. А., Денисова О. А., Чувывров А. Н. Эффект памяти в жидкокристаллических слоях нематического типа // *Письма в Журнал технической физики*. 1994. Т. 20, № 24. С. 87–90. [Skaldin O.A., Denisova O.A., Chuvyrov A.N. The memory effect in nematic liquid crystal layers of the type. *Technical Physics Letters journal*, 1994, **20** (24), 87–90. (in Russ.)].
5. Баймакова О. А., Скалдин О. А., Чувывров А. Н. Генерация ориентационных волн в нематических жидких кристаллах под действием сдвигового импульса // *Кристаллография*. 1999. Т. 44, № 3. С. 544–547. [Baimakova O.A., Skaldin O.A., Chuvyrov A.N. Generation of orientation waves in nematic liquid crystals under shear pulse excitation. *Crystallography Reports*, 1999, **44** (3), 502–505].
6. Чувывров А. Н., Денисова О. А. Волнообразная неустойчивость смектических жидких кристаллов типа «С» в электрических полях // *Письма в Журнал технической физики*. 2001. Т. 27, № 22. С. 89–94. [Chuvyrov A.N., Denisova O.A. Electric field induced wavelike instability in smectic C liquid crystals. *Technical Physics Letters*, 2001, **27** (11), 975–977. DOI: 10.1134/1.1424411].

7. Денисова О. А., Чувывров А. Н. Релаксация директора при азимутальной неустойчивости жидких кристаллов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2012. Вып. 1. С. 52–58. [Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Relaxation director at azimuthal instability of liquid crystals. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.* 2012, 1, 52–58 (in Russ.)].
8. Денисова О. А., Чувывров А. Н. Возможный механизм возникновения эффекта азимутальной неустойчивости жидких кристаллов // *Челябинский физико-математический журнал.* 2011. № 15. С. 42–44. [Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Possible mechanisms of the effect of the azimuthal instability of liquid crystals. *Chelyabinsk physical and mathematical journal*, 2011, **15**, 42–44. (in Russ.)].
9. Денисова О. А., Чувывров А. Н. Эффекты электрогидродинамической неустойчивости в смектических жидких кристаллах типа С // *Кристаллография.* 2013. Т. 58, № 2. С. 307–310. [Chuvyrov A.N., Denisova O.A. Effect of electrodynamic instability in smectic C liquid crystals. *Crystallography Reports*, 2013, **58** (2), 324–327. DOI: 10.1134/S1063774513020077].
10. Денисова О. А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* 2013. Т. 9, № 2. С. 107–113. [Denisova O.A. One of the methods of experimental research liquid crystals. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2013, **9** (2), 107–113. (in Russ.)].
11. Денисова О. А. Распространение ультразвуковых волн в твист-структурах жидких кристаллов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2011. Вып. 2. С. 62–65. [Denisova O.A. Propagation of ultrasonic waves in a twist the structures of liquid crystals. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2011, 2, 62–65 (in Russ.)].
12. Денисова О. А., Чувывров А. Н. Резонансное изменение скорости поперечных акустических волн в твист-структурах жидких кристаллов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2011. Вып. 3. С. 25–29. [Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Resonant speed variation of the transverse acoustic waves in a twist the structures of liquid crystals. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2011, 3, 25–29. (in Russ.)].
13. Денисова О. А., Скалдин О. А. Пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* 2013. Т. 9, № 4. С. 145–153. [Denisova O.A., Scaldin O.A. Piezoelectric effect in liquid crystals. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2013, **9** (4), 145–153. (in Russ.)].
14. Денисова О. А., Скалдин О. А. Прямой флексоэффект в нематике в окрестности фазового перехода // *Письма о материалах.* 2016. Т. 6, № 3 (23). С. 168–172. [Denisova O.A., Skaldin O.A. Direct flexoelectric in a nematic liquid crystal in the vicinity of the phase transition. *Letters on materials*, 2016. **6** (3), 168–172. (in Russ.)]. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-3-168-172.
15. Jakli A., Janosy I., Bata L., Buka A. A special shear method of alignment for smectic liquid crystals. *Kozp. fiz. kut inter. Prepz.*, 1988, **31E**, 1–11.
16. Barbero G. On the instability threshold of subjected to external fields. *Int. J. Mod. Phys.*, 1992, **6** (14), 2521–2530.
17. Пикин С. А. Структурные превращения в жидких кристаллах. М.: Наука, 1981. 336 с. [Pikin S.A. Structural transformations in liquid crystals. Moscow, Nauka, 1981, 336 p. (in Russ.)].
18. Волькенштейн М. В. Молекулярная оптика. М.; Л.: Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1951. 744 с. [Volkenstein M. Molecular Optics. Moscow-Leningrad: State ed. tehn.-teoret. lit., 1951, 744 p. (in Russ.)].
19. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы / пер. с англ. Л. Г. Шалтыко. М.: Мир, 1980. 344 с. [Chandrasekhar S. Liquid crystals. Cambridge University Press, 1980, 352 p.].

Поступила в редакцию 19.04.2017 г.
Received 19 April 2017