

УДК 53

ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ С ГОМЕОТРОПНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ МОЛЕКУЛ

Денисова О.А.,

*Уфимская государственная академия экономики и сервиса, г. Уфа
e-mail: denisovaolga@bk.ru*

Чувывров А.Н.,

Башкирский государственный университет, г. Уфа

Аннотация. *Методом двойного лучепреломления исследовалось распространение поперечной вибрационной вязкоупругой волны в тонких гомеотропных слоях нематических жидких кристаллов под действием низкочастотного периодического сдвига (частота воздействия ~ 100 Гц). Обнаружено, что при достижении пороговой амплитуды наблюдается ориентационная неустойчивость молекул жидкого кристалла, выражающаяся в эффекте образования стационарного угла наклона молекул жидкого кристалла. Результаты данного исследования могут быть использованы при разработке оптических датчиков для диагностики механических неустойчивостей нефтяных и газовых трубопроводов.*

Ключевые слова: *нематический жидкий кристалл, ориентационная неустойчивость, гомеотропная ориентация молекул*

Рэлеем, а также Ландау и Лифшицем в курсе теоретической физики [1] рассматривалось движение, возникающее в вязкой жидкости при колебаниях погруженных в нее твердых тел, которое обладает рядом характерных особенностей. В изотропной жидкости при колебательном движении с частотой ω и амплитудой a возникает быстрозатухающая поперечная вязкая волна (рис. 1), глубина проникновения которой δ .

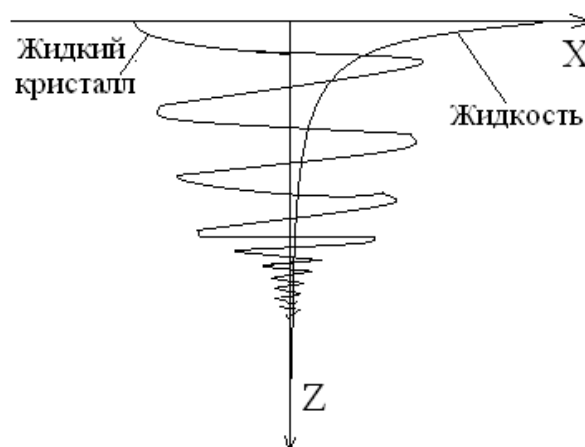


Рис. 1. Распространение поперечной вязкоупругой волны в жидкости и жидком кристалле

В пристеночном слое величина скорости v_y будет падать по направлению к поверхности по закону

$$v_y = u_0 e^{-i\omega t} \left[1 - e^{-(1-i)z\sqrt{\omega/2\nu}} \right].$$

Важной особенностью этих волн является малая глубина проникновения

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}},$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости.

В обычной жидкости эта величина при $\omega \sim 10^2 - 10^3$ Гц составляет $\delta \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ см.

Действующая на твердую поверхность сила трения направлена по оси y (отнесенная к единице площади):

$$\sigma_{zy} = -\sqrt{\frac{\omega\eta\rho}{2}} u_0,$$

где η – динамическая вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости.

Средняя энергия диссипации в единицу времени, на единицу поверхности колеблющейся пластины:

$$-\langle \sigma_{zy} u \rangle = \frac{u_0^2}{2} \sqrt{\frac{\omega\eta\rho}{2}}.$$

Она пропорциональна корню из частоты колебаний и вязкости жидкости. То есть диссипация энергии определяется только вязкой составляющей силы. Из-за трения колеблющегося тела, происходит нагрев вязкой жидкости вблизи поверхности. Распространение тепла в жидкой среде от колеблющегося тела дальше должно произойти либо за счет термоконвекции, либо за счет термодиффузии.

В жидком кристалле существует особенность за счет зацепления вязких и ориентационных мод. Для нематического жидкого кристалла (НЖК) с начальной гомеотропной ориентацией директора, колеблющееся тело совершает периодические колебания с частотой ω и некоторой максимальной амплитудой a . В линейном приближении уравнения движения директора \mathbf{n} и центров инерции молекул запишутся в виде [2]:

$$\begin{aligned} K_{33} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \eta_4 \frac{\partial \theta}{\partial t} + \eta_1 \frac{\partial v_x}{\partial z} &= 0; \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} + \eta_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z \partial t} - \eta_3 \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где η_1, η_3, η_4 – коэффициенты вязкости.

Решение в общем виде можно записать:

$$v \approx v_0 \exp \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} q(z-\delta) \right] \cos \left[\frac{\sqrt{2}}{2} q(z-\delta) \right] \cos \omega t;$$

$$\theta \approx \frac{\rho v_0}{\eta_1 q} \exp \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} q (z - \delta) \right] \sin \left[\frac{\sqrt{2}}{2} q (z - \delta) \right] \cos \omega t ; \quad (2)$$

$$\sigma_{zy} \approx (\alpha_4 + \alpha_6) \frac{\partial v_y}{\partial z} + \alpha_3 \frac{\partial \theta}{\partial t} ,$$

при $\theta|_{z=0}=0$ $-\langle \sigma_{zy} u \rangle \approx \frac{u_0^2}{2} \sqrt{\frac{\omega(\alpha_4 + \alpha_6)\rho}{2}}$, но если граничные условия для θ слабые, все определяется условием быстрой диссипации энергии. Она определяется коэффициентом теплопроводности $\chi_{\perp} \ll \chi_{\parallel}$, и именно поэтому в слое устанавливается (реализуется) переход от n_z к n_x , закономерности которого и будут исследованы ниже.

Движение колеблющегося тела (подвижной пластины) в НЖК, приводящее к нагреву, изменит параметр порядка до порога возникновения термоконвекции, что приведет к ориентационным неустойчивостям жидкого кристалла, а именно при некотором пороговом значении амплитуды сдвига – к стационарному наклону молекул жидкого кристалла.

Влияние внешних воздействий (акустических, электрических, магнитных, температурных полей) на жидкие кристаллы сопровождается различными эффектами и структурными превращениями в широком спектральном диапазоне $10^{-1} \leq \omega \leq 10^8$ Гц. Многочисленные визуальные наблюдения показали, что существуют три стадии изменения структуры ориентированного образца: однородная, пространственно-периодическая и неоднородная деформации.

Сопоставление особенностей различных акустооптических эффектов в жидких кристаллах в присутствии градиента температуры, электрического или магнитного полей и без них, дает основание заключить, что в основе эффектов, вызванных периодической сдвиговой деформацией лежит один и тот же физический механизм.

В имеющихся научных работах в основном отражены экспериментальные данные и теоретические разработки для высокочастотного диапазона ($1 \text{ МГц} < \omega < 100 \text{ МГц}$). Низкочастотная область ($20 \text{ Гц} < \omega < 20 \text{ кГц}$) внешних воздействий исследована довольно слабо. Таким образом, актуальным является исследование неустойчивостей, которые наблюдаются при воздействии на жидкий кристалл низкочастотного периодического сдвига и их практическое использование.

Объектом исследования в данной работе был выбран жидкий кристалл нематического типа n - метоксибензилиден - бутиланилин (МББА) с температурным интервалом существования мезофазы 18 - 42 °С. Основным методом изучения был метод интерферометрии двулучепреломления на базе поляризационного микроскопа. Ячейка представляет собой двойной сэндвич (рис. 2) – это две массивные стеклянные пластины, между которыми помещалась третья стеклянная пластинка из покровного стекла толщиной меньше расстояния между массивными пластина-

ми. Пластика из покровного стекла могла свободно совершать колебания в своей (горизонтальной) плоскости. Для создания гомеотропной ориентации молекул ЖК на подложки напылялся металлический хром.

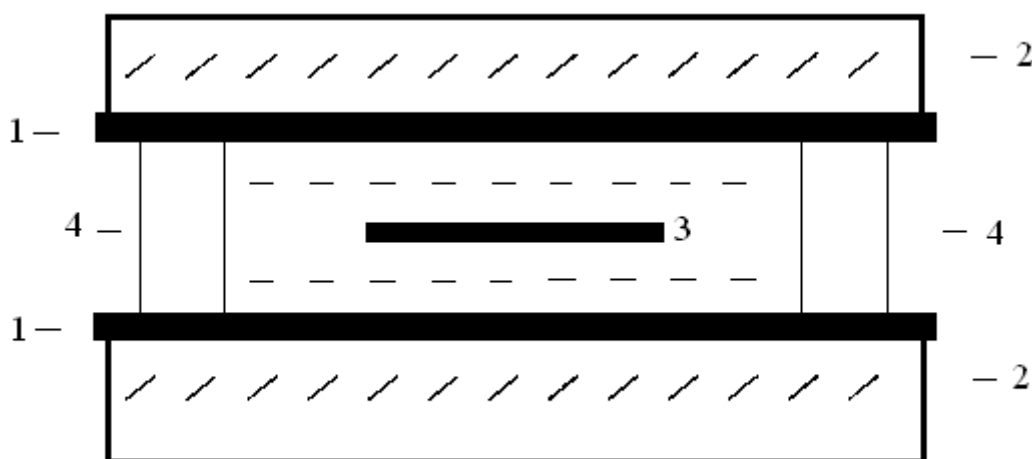


Рис. 2. Вид сбоку ячейки, используемой при сдвиге:

1 – проводящее покрытие из хрома;
2 – предметное стекло; 3 – подвижная пластина; 4 – прокладка

Для регистрации и первичной обработки изучаемых сигналов была собрана экспериментальная установка, основным элементом регистрирующей части, которой являлся поляризационно-оптический микроскоп *Amplival - Pol U* и спектрофотометрическая приставка СФН - 10. Для создания акустического контакта мембрана вибратора соединялась при помощи волновода. Измерения амплитуды колебаний тонкой подложки ячейки проводились индуктивным способом.

Согласно экспериментальной методике приготовления образцов и введения акустической волны в образец, мы имеем двухслойную систему ЖК пленок толщиной по h_c . Воздействие акустической волны на такую систему приводит к появлению двулучепреломления. Причем поляризатор и анализатор скрещены и составляют 45° с направлением сдвига. Помимо постоянной компоненты интенсивности I_c регистрируется переменный во времени сигнал $I(t)$, содержащий спектр гармоник по частоте возбуждения ω .

Для интенсивности оптического сигнала, согласно закона Малюса, получим:

$$I = I_0 \left\{ \left[\sin^2 C \langle \sin^2 \theta_c \rangle + C \left[2 \langle \sin \theta_c \theta_t \rangle + \langle \theta_t^2 \rangle \right] \sin 2C \cdot \langle \sin^2 \theta \rangle + \right. \right. \\ \left. \left. C^2 \left[2 \langle \sin \theta_c \theta_t \rangle + \langle \theta_t^2 \rangle \right]^2 \cos^2 C \langle \sin^2 \theta_c \rangle \right] \right\}, \quad (3)$$

где $\langle \sin^2 \theta_c \rangle = A$; $2 \langle \sin \theta_c \theta_t \rangle + \langle \theta_t^2 \rangle = B$; $\frac{\pi db}{\lambda} = C$. Постоянная и переменная со-

ставляющие оптического сигнала:

$$I_c = I_0 \left\{ \sin^2 C \langle \sin^2 \theta_c \rangle + C \frac{\theta_0^2}{2} \sin 2C \cdot \langle \sin^2 \theta_c \rangle + \right. \\ \left. + 2C^2 \langle \sin \theta_c \theta_0 \rangle^2 \cos^2 C \cdot \langle \sin^2 \theta_c \rangle + \frac{3}{8} C^2 (\theta_0^2)^2 \cos^2 C \langle \sin^2 \theta_c \rangle \right\}; \quad (4)$$

$$I_{1\omega} = I_0 \left\{ 2C \langle \sin \theta_c \theta_0 \rangle \sin 2C \cdot \langle \sin^2 \theta_c \rangle + \right. \\ \left. + 3C^2 \langle \sin \theta_c \theta_0 \rangle (\theta_0^2) \cdot \cos 2C \cdot \langle \sin^2 \theta_c \rangle \right\} \sin \omega t; \quad (5)$$

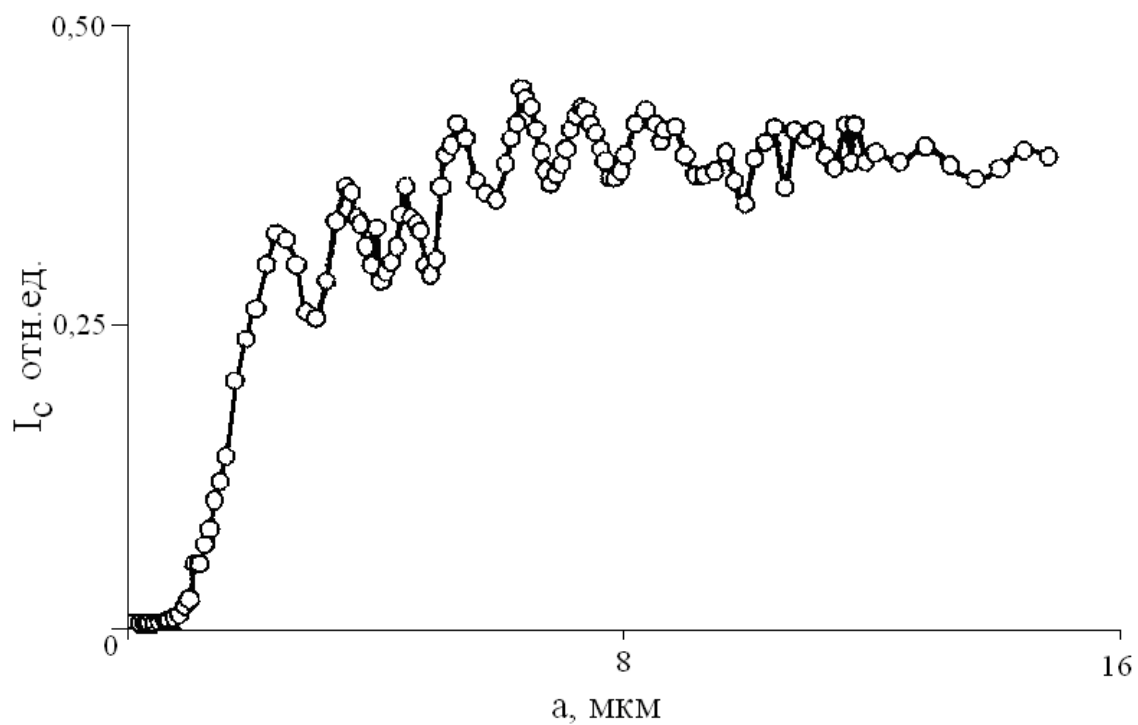
$$I_{2\omega} = I_0 \left\{ -C \frac{\theta_0^2}{2} \sin 2C \langle \sin^2 \theta_c \rangle - 2C^2 \langle \sin \theta_c \theta_0 \rangle^2 \cdot \cos^2 C \langle \sin^2 \theta_c \rangle - \right. \\ \left. - \frac{(\theta_0^2)^2}{2} C^2 \cos^2 C \langle \sin^2 \theta_c \rangle \right\} \cos 2\omega t. \quad (6)$$

Возмущение слабо затухает по толщине ячейки и захватывает весь слой ЖК в этом диапазоне частот.

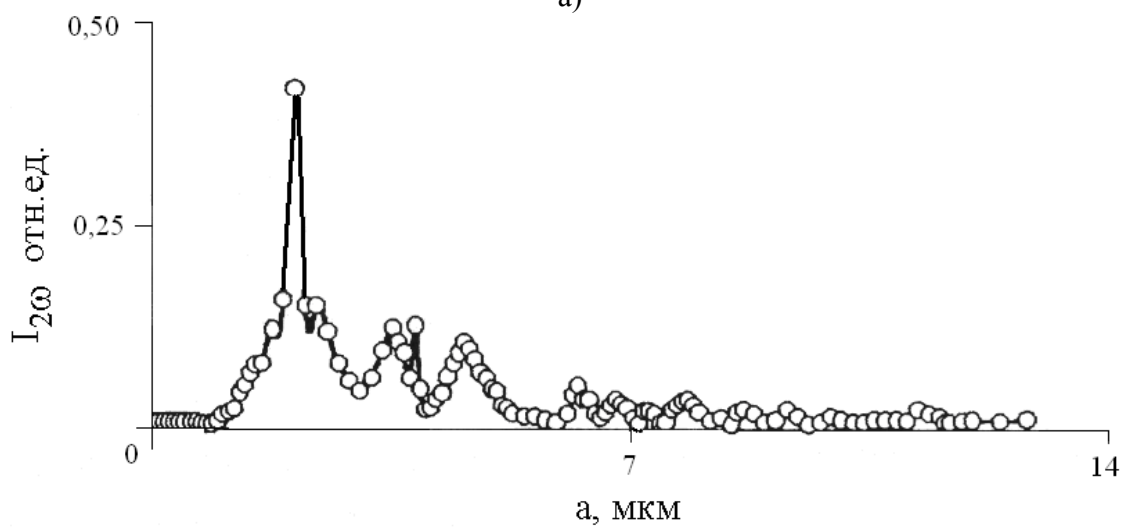
Согласно формуле (5) сигнал, регистрируемый на частоте возбуждения ω , наблюдается только тогда, когда появляется стационарный наклон директора θ_c относительно нормали к поверхности, т.е. при нарушении симметрии ЖК - системы относительно нормали к слою. Появление переменного сигнала на частоте возмущения фактически позволяет определить величину амплитуды порога a_n акустической волны в НЖК, приводящей к образованию стационарного угла наклона директора в том или ином направлении отклонения вибрирующей пластины.

Из экспериментальных данных поведения переменной составляющей оптического сигнала $I_c(a)$ и второй гармоники $I_{2\omega}(a)$ (рис. 3) вычислялись амплитудные зависимости среднего квадрата синуса постоянной компоненты угла наклона директора $\langle \sin^2 \theta_c \rangle(a)$ и переменной его части $\langle \theta_0^2 \rangle(a)$ (рис. 4). Из них следует, что функция $\langle \sin^2 \theta_c \rangle(a)$ монотонно возрастает, стремясь к максимальному значению – к 1, а $\langle \theta_0^2 \rangle(a)$ достигает максимума при некотором значении амплитуды a , дальше начинает спадать (рис. 4б). Это связано с тем, что возрастание стационарного угла наклона директора приводит к уменьшению динамической восприимчивости ЖК - слоя.

По существу, вопрос об определении типа такого ориентационного перехода в поле сдвиговой волны сводится к изучению частотной зависимости величины порога a_n образования стационарного угла наклона директора. Если $a_n(\omega) = \text{const}$, то можно говорить об акустическом аналоге перехода Фредерикса [2]. На рис. 5а представлена эта зависимость. Подобное поведение подтверждается данными работы [3]. Наблюдавшаяся картина поведения гомеотропного слоя НЖК при периодическом низкочастотном сдвиге была предсказаны в теоретических работах [4, 5].



а)



б)

Рис. 3. Амплитудные зависимости:
а) постоянной компоненты I_c , б) второй I_{2f} гармоник оптического сигнала

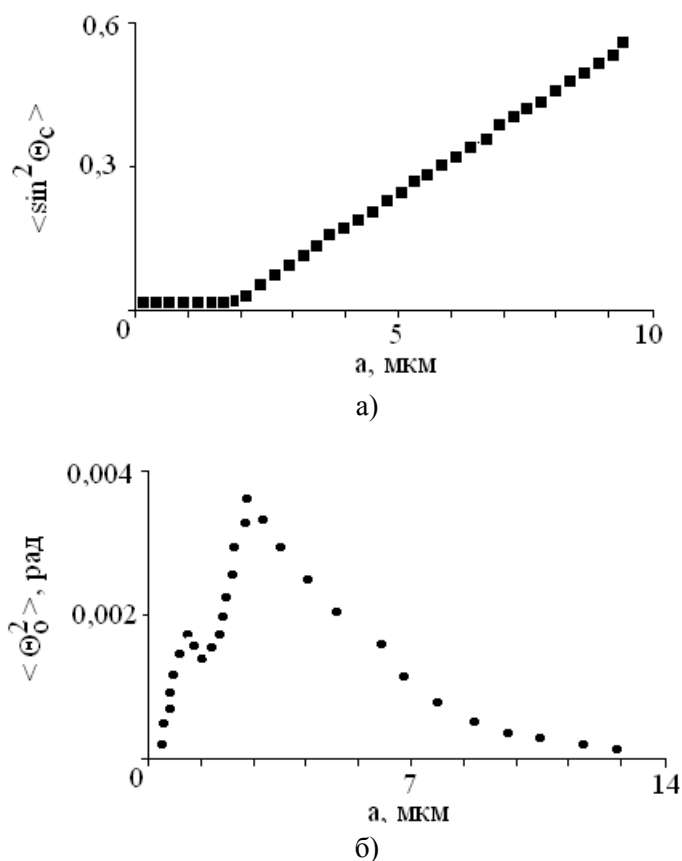


Рис. 4. Амплитудные зависимости:

- а) среднего квадрата синуса стационарного угла наклона $\langle \sin^2 \theta_c \rangle$;
 б) переменной части $\langle \theta_0^2 \rangle$ угла наклона директора

Ориентационная неустойчивость этого типа приводит к постоянным во времени изменениям ориентации молекул. В случае, когда длина вязкой волны значительно больше толщины слоя, порог возникновения неустойчивости пропорционален толщине ЖК - слоя и не зависит от частоты деформации (рис. 5а). Нами определялись зависимости порога a_n от температуры и толщины слоя ЖК. Было обнаружено, что порог образования стационарного угла наклона директора в исследуемом диапазоне температур $18 < T < 45$ °С (рис. 5б) и толщин $20 < h_c < 125$ мкм остается величиной постоянной ($a_n \approx 0,8$ мкм).

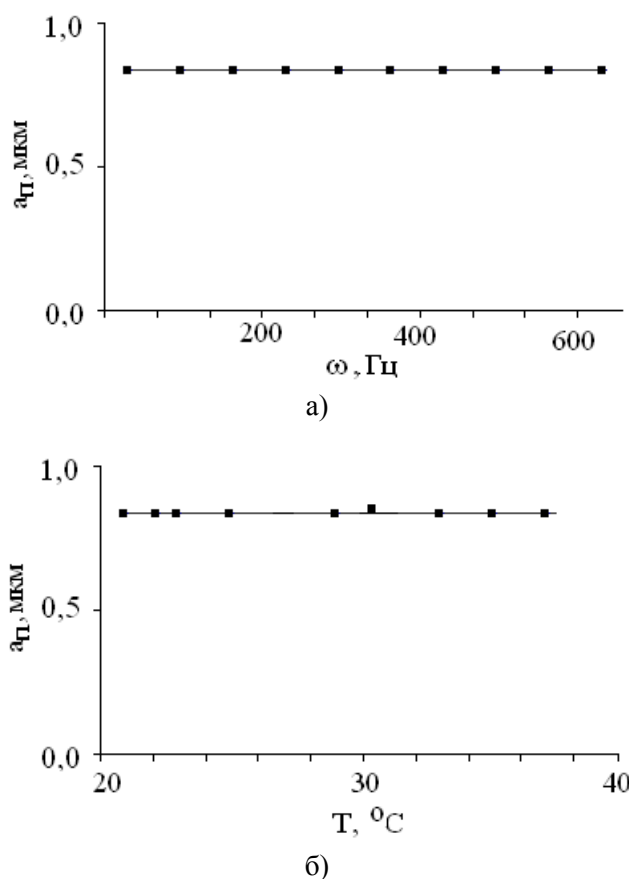


Рис. 5. Зависимости порога образования стационарного угла наклона директора a_n от частоты воздействия

В данной работе экспериментально исследовано распространение поперечной вибрационной вязкоупругой волны в НЖК под действием низкочастотного периодического сдвига, которое приводит к ориентационной неустойчивости нематических жидких кристаллов. Обнаружен эффект образования стационарного угла наклона директора в гомеотропно ориентированных слоях нематических жидких кристаллов. Показана независимость критической амплитуды ориентационного перехода от частоты сдвига, толщины кристаллов, температуры. Результаты представленных исследований могут быть использованы при разработке оптических датчиков для диагностики механической устойчивости нефтяных трубопроводов.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
2. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 377 с.
3. Белова Г.Н., Ремизова Е.И. Особенности акустооптического воздействия в гомеотропно ориентированном слое НЖК при его периодической сдвиговой деформации // Акустический журнал. 1985. Т. 31. Вып. 3. С. 289 - 299.
4. Чабан И.А. Виброгидродинамическая неустойчивость ЖК при низких частотах // Акустический журнал. 1985. Т. 31. Вып. 1. С. 132 - 134.
5. Чабан И.А. Виброгидродинамическая неустойчивость ЖК // Акустический журнал. 1978. Т. 24. Вып. 2. С. 260 - 270.

OPTICAL VIBRATION SENSORS BASED ON LIQUID CRYSTAL WITH HOMEOTROPIC ORIENTATION OF MOLECULES

O.A. Denisova

*Ufa State Academy of Economics and Service, Ufa, Russia
e-mail: denisovaolga@bk.ru*

A.N. Chuvyrov

Bashkir State University, Ufa, Russia

Abstract. *By birefringence method was investigated the distribution of the transverse vibration of viscoelastic waves in a thin homeotropic layers of nematic liquid crystals under the action of a periodic low-frequency shift (frequency of exposure of ~ 100 Hz). It was found that when the threshold amplitude observed orientational instability of liquid crystal molecules, as expressed in the effect of education of the stationary angle of liquid crystal molecules. Results from this study can be used to develop optical sensors for the diagnosis of mechanical instabilities of oil and gas pipelines.*

Keywords: *nematic liquid crystal, the orientational instability, homeotropic orientation of the molecules*

References

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika, Tom VI. Gidrodinamika* (Course of Theoretical Physics. Vol VI. Fluid Mechanics). Moscow: Nauka, 1986. 736 p.
2. De Zhen P. *Fizika zhidkikh kristallov* (The physics of liquid crystals). Moscow: Mir, 1977. 377 p. (Translated from Pierre-Gilles de Gennes. *The Physics of Liquid Crystals*, Oxford University Press, 1974).
3. Belova G.N., Remizova E.I. Osobennosti akustoopticheskogo vozdeistviya v gomeotropno orientirovannom sloe NZhK pri ego periodicheskoi sdvigovoi deformatsii (Features of acousto-optic effects in homeotropically oriented nematic liquid crystal layer with its periodic shear deformation), *Akusticheskii zhurnal*, 1985, Vol. 31, Issue 3, pp. 289 - 299.
4. Chaban I.A. Vibrohidrodinamicheskaya neustoichivost' ZhK pri nizkikh chasotakh (Vibro-hydrodynamic instability of the liquid crystals at low frequencies), *Akusticheskii zhurnal*, 1985, Vol. 31, Issue 1, pp. 132 - 134.
5. Chaban I.A. Vibrohidrodinamicheskaya neustoichivost' ZhK (Vibro-hydrodynamic instability of the liquid crystals), *Akusticheskii zhurnal*, 1978, Vol. 24, Issue 2, pp. 260 - 270.