

УДК 532.783:534.6

Э. В. Геворкян¹, А. Н. Ларионов², А. И. Ефремов², Н. Н. Ларионова³

АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ В КОНИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

¹Московский государственный областной университет, ул. Радио, 10-а, 107005 Москва, Россия

²Воронежский государственный аграрный университет, ул. Мичурина, 1, 394087 Воронеж, Россия

³Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия

E-mail: gevev@rambler.ru

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований кинетики ориентационных процессов в ЖК-440 (смесь (1:2) *n*-*n*-бутил-*n*-гептаноилоксиазоксибензола (БГОАБ) и *n*-*n*-бутил-*n*-метоксиазоксибензола (БМОАБ)) и в БББА (*n*-*n*-бутоксibenзилиден-*n*-бутиланилин) в конических магнитных полях. Предложена методика формирования конического магнитного поля. Установлен характер влияния угла β между вектором индукции и осью вращения магнитного поля на фазовую зависимость коэффициента поглощения ультразвука. Уменьшение угла β вызывает уменьшение фазового сдвига между директором и вектором магнитной индукции, анизотропии коэффициента поглощения ультразвука и расширяет частотный диапазон синхронного режима движения директора. При угле β , меньшем 56° , фазовый сдвиг между директором и вектором индукции не превышает 45° и асинхронный режим не наблюдается. Выполнен анализ движения директора в коническом магнитном поле. Показано соответствие решения уравнений гидродинамики в коническом магнитном поле полученным экспериментальным результатам. Данный метод, в отличие от классического метода вращающегося поля, применим и для больших значений коэффициентов вязкости, в нематиках вблизи перехода в смектическую или кристаллическую фазы, а также в смектиках С.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, анизотропия, коэффициент поглощения ультразвука, коническое магнитное поле, фазовый сдвиг.

DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.6

E. V. Gevorkyan¹, A. N. Larionov², A. I. Efremov², N. N. Larionova³

ACOUSTIC INVESTIGATIONS OF DYNAMICS OF ORIENTATIONAL PROCESSES IN NEMATIC LIQUID CRYSTALS IN CONICAL MAGNETIC FIELDS

¹Moscow State Regional University, 10-a Radio St., Moscow, 107005, Russia

²Voronezh State Agrarian University, 1 Michurin St., Voronezh, 394087, Russia

³Voronezh State University, 1 University Squire, Voronezh, 394006, Russia

E-mail: gevev@rambler.ru

The results of experimental and theoretical studies on kinetics of orientational processes in the mixture of *p*-*n*-butyl-*p*-heptanoyloxyazoxybenzene (BHOAB) and *p*-*n*-butyl-*p*-methoxyazobenzene (BMOAB) (with 1:2 component ratio) and in *p*-*n*-butoxybenzylidene-*p*-butylaniline (BBBA) in conical magnetic fields are presented. The method of forming a conical magnetic field is proposed. The influence character of the angle β between the induction vector and the axis of the magnetic field rotation on the phase dependence of the ultrasound absorption coefficient was found. The decrease of the angle β causes both the reduction of the phase shift between the director and the magnetic induction vector, and the anisotropy of the ultrasound absorption coefficient. It also widens the frequency range of the synchronous mode of the director movement. When the angle β value is smaller than 56° , the phase shift between the director and the induction vector does not exceed 45° and the asynchronous mode cannot be observed. The analysis of the director motion in the conical magnetic field was carried out. The com-

pliance of the solution of hydrodynamics equations in the conical magnetic field with the experimental results was shown. Unlike the classical method of rotated field, this method can be applied to liquid crystals study in cases of high viscosity coefficients: for nematics near phase transitions into smectic or crystal phase and also for smectic C.

Key words: liquid crystals, anisotropy, ultrasound absorption coefficient, the conical magnetic field, phase shift.

Введение

Высокая чувствительность акустических параметров нематических жидких кристаллов (НЖК) к изменению их ориентационной структуры обуславливает перспективность применения акустического метода для изучения кинетики ориентационных процессов в анизотропных жидкостях, подверженных воздействию внешних полей [1, 2]. Эффективность метода акустической спектроскопии обусловлена также возможностью изменения в широком диапазоне параметра $\omega \cdot \tau_m$, где $\omega = 2\pi f$, f – частота ультразвука, τ_m – время релаксации m -го релаксационного процесса. Изучение временной шкалы процессов, свойственных жидким кристаллам (ЖК), определяет конкретную область частотно-временных характеристик для их практического применения. Наличие связи между параметрами угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука и диссипативными коэффициентами НЖК дает возможность использовать результаты акустических исследований в меняющихся магнитных полях для изучения влияния температуры на диссипативные коэффициенты НЖК. Решение уравнений, описывающих движение директора нематической фазы в периодически меняющихся магнитных полях, позволяет использовать результаты экспериментальных исследований динамики ориентационных процессов для анализа адекватности выводов гидродинамики [3, 4]. Во вращающемся магнитном поле наблюдаются два режима движения директора в зависимости от индукции и угловой скорости вращения магнитного поля и термодинамических параметров состояния. В низкотемпературном интервале нематической фазы синхронный режим реализуется в узком диапазоне угловых скоростей вращения магнитного поля, что ограничивает точность измерения параметров релаксационных процессов и коэффициентов вязкости. Новые возможности открывает применение в качестве ориентирующего магнитного поля, вектор индукции которого движется по поверхности конуса с регулируемым углом при его вершине. Настоящая работа посвящена исследованию ре-

лаксационных свойств нематической фазы в конических магнитных полях акустическим методом.

Эксперимент

Исследования выполнены импульсным методом фиксированного расстояния, основанным на измерении амплитуды и фазы ультразвукового импульса после прохождения через исследуемое вещество [1, 5]. Данный метод обеспечивает возможность непрерывной фиксации коэффициента поглощения ультразвука в образце, ориентированном коническим магнитным полем.

Коническое магнитное поле может быть получено в результате суммирования статического магнитного поля $\vec{H}_3 = H_3 \cdot \vec{e}_3$, направленного вдоль оси 3 (рис. 1) и перпендикулярного ему «кругового» магнитного поля

$$\vec{H}_n = H \cdot [\cos(\omega_H \cdot t) \cdot \vec{e}_1 + \sin(\omega_H \cdot t) \cdot \vec{e}_2], \quad (1)$$

вращающегося с постоянной угловой скоростью ω_H . Результирующее магнитное поле $\vec{H} = \vec{H}_n + \vec{H}_3$ движется по конической поверхности [4].

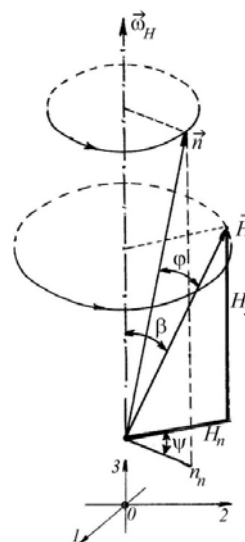


Рис. 1. Векторная диаграмма

Fig. 1. Vector diagram

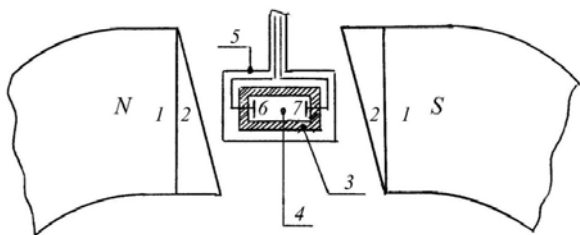


Рис. 2. Общий вид измерительной установки

Fig. 2. Layout of the measuring equipment

Экспериментально коническое магнитное поле получено использованием совместно с постоянным магнитом 1 полюсных наконечников 2 (рис. 2). Вектор индукции направлен перпендикулярно поверхностям полюсных наконечников. Акустическая камера 3 изготовлена из диамагнитной нержавеющей стали марки 10X17H13M2T, не искажающей внешнее магнитное поле. Формирование и фиксация акустических импульсов частотой 3,0 МГц осуществлялись пьезоэлементами 6 и 7. Термостат 5 совместно с разработанной электронной схемой обеспечивают стабильность температуры исследуемого образца (4) $\pm 0,01$ К.

Измерения выполнялись при угловых скоростях ω_H вращения магнитного поля индукцией 0,12–0,29 Тл в диапазоне от 0,03 до 1,03 рад/с. Набор полюсных наконечников позволял изменять угол β между вектором индукции и осью вращения магнитного поля от 90° до 30° .

Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига ϕ между вектором индукции магнитного поля и директором равна $\pm 0,2^\circ$. Относительная погрешность определения характеристической частоты ω_0 не превышает 2,8 %. Относительная погрешность определения параметра $\Delta\alpha/f^2$ в синхронном режиме составляет 2,0 %, а в асинхронном режиме не превышает 2,8 %. Здесь $\Delta\alpha = \alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}$ – анизотропия коэффициента поглощения ультразвука, α_{\parallel} и α_{\perp} – коэффициент поглощения ультразвука соответственно при взаимно параллельной и перпендикулярной ориентациях директора и волнового вектора.

Поскольку замена вращающегося магнитного поля коническим приводит к расширению диапазона угловых скоростей вращения магнитного поля, в котором реализуется синхронный режим, применение конического магнитного поля целесообразно для исследования ориентационной релак-

сации в нематической фазе ЖК, обладающих смектической фазой и характеризующихся большими значениями времени ориентационной релаксации. Большие значения коэффициентов вязкости НЖК в окрестности температуры фазового перехода в смектическую фазу обусловили выбор для исследования *n*-*n*-бутоксibenзилиден-*n*-бутилана-лина (БББА), обладающего как нематической, так и смектической А-фазой. Температура фазового перехода НЖК – смектический «А» жидкий кристалл в БББА $T_{NA} = 313,3$ К, температура фазового перехода НЖК – изотропная жидкость (ИЖ) $T_C = 344,9$ К. Исследована также смесь ЖК-440, содержащая 1 часть *n*-*n*-бутил-*n*-гептаноилокси-азоксибензола (БГАОБ) и 2 части *n*-*n*-бутил-*n*-метоксиазоксибензола (БМАОБ). Температура фазового перехода НЖК – (ИЖ) $T_C = 345,7$ К.

Результаты и обсуждения

В нематическом жидком кристалле, помещенном во вращающееся магнитное поле, коэффициент поглощения ультразвука периодически изменяется с периодом $T = \pi/\omega_H$. Наличие вращательной вязкости в нематической фазе приводит к тому, что даже при малых угловых скоростях вращения магнитного поля, индукция которого превышает значение насыщения, директор вращается с заметным фазовым отставанием относительно вектора напряженности поля [3, 5]. В нематической фазе жидких кристаллов, обладающих смектической фазой, отставание больше и наблюдается даже при температурах, близких к температуре просветления.

В магнитном поле, вектор индукции которого движется по конической поверхности, фазовый сдвиг ψ между проекциями вектора индукции и директора на плоскость, перпендикулярную оси вращения, зависит от угла β , от $B_n = B \cdot \sin\beta$ и угловой скорости вращения магнитного поля. Он уменьшается с уменьшением угла 2β при вершине конуса и неизменном значении проекции B_n вектора магнитной индукции на плоскость вращения (рис. 3).

Зависимость анизотропии коэффициента поглощения ультразвука от температуры в нематической фазе в статическом магнитном поле или в синхронном режиме при $\omega_H \rightarrow 0$ характеризуется наличием максимумов в области фазовых переходов (рис. 4).

Значение угла β не оказывает влияния на характер температурной зависимости параметра $\Delta\alpha/f^2$, однако изменение угла β от 90° до 30° приводит к уменьшению анизотропии коэффициента поглощения ультразвука. Во всем температурном интервале нематической фазы зависимость анизотропии

коэффициента поглощения ультразвука на квадрат частоты от угла θ между волновым вектором и директором описывается уравнением [6]

$$\frac{\Delta\alpha(\theta)}{f^2} = a \cdot \cos^2\theta + b \cdot \cos^4\theta + d. \quad (2)$$

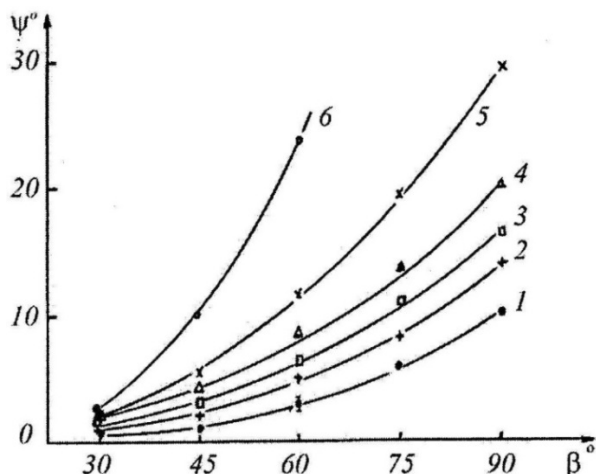


Рис. 3. Зависимость ψ от β в БББА при $T = 221,0$ К, $\omega_H = 0,06$ рад/с и значениях B_n (Тл): 1 – 0,12; 2 – 0,15; 3 – 0,18; 4 – 0,21; 5 – 0,24; 6 – 0,24

Fig. 3. Dependence $\psi(\beta)$ in BBBA at $T = 221.0$ K, $\omega_H = 0.06$ rad/s and the values of B_n (T): 1 – 0.12; 2 – 0.15; 3 – 0.18; 4 – 0.21; 5 – 0.24; 6 – 0.24

Параметры a , b и d угловой зависимости (2) анизотропии коэффициента поглощения ультразвука являются комбинациями коэффициентов сдвиговой и объемной вязкостей. В нематической фазе исследованных веществ параметр a резко возрастает по мере приближения к температуре фазового перехода НЖК – ИЖ при всех исследованных значениях угла β . В нематической фазе

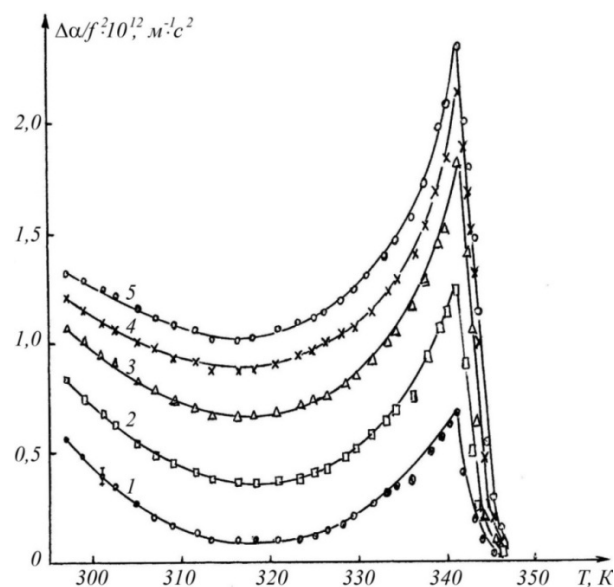


Рис. 4. Температурная зависимость $\Delta\alpha/f^2$ в ЖК-440 при $\omega_H \rightarrow 0$ и значениях угла β : 1 – 30° ; 2 – 45° ; 3 – 60° ; 4 – 75° ; 5 – 90°

Fig. 4. Temperature dependence $\Delta\alpha/f^2$ in LC-440 at $\omega_H \rightarrow 0$ and the values of the angle β : 1 – 30° ; 2 – 45° ; 3 – 60° ; 4 – 75° ; 5 – 90°

ЖК-440 параметр a положителен во всем температурном интервале. В нематической фазе БББА параметр a меняет знак в окрестности температуры фазового перехода НЖК – СЖК А. Значение параметра a угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука возрастает при изменении угла β от 30° до 90° (рис. 5).

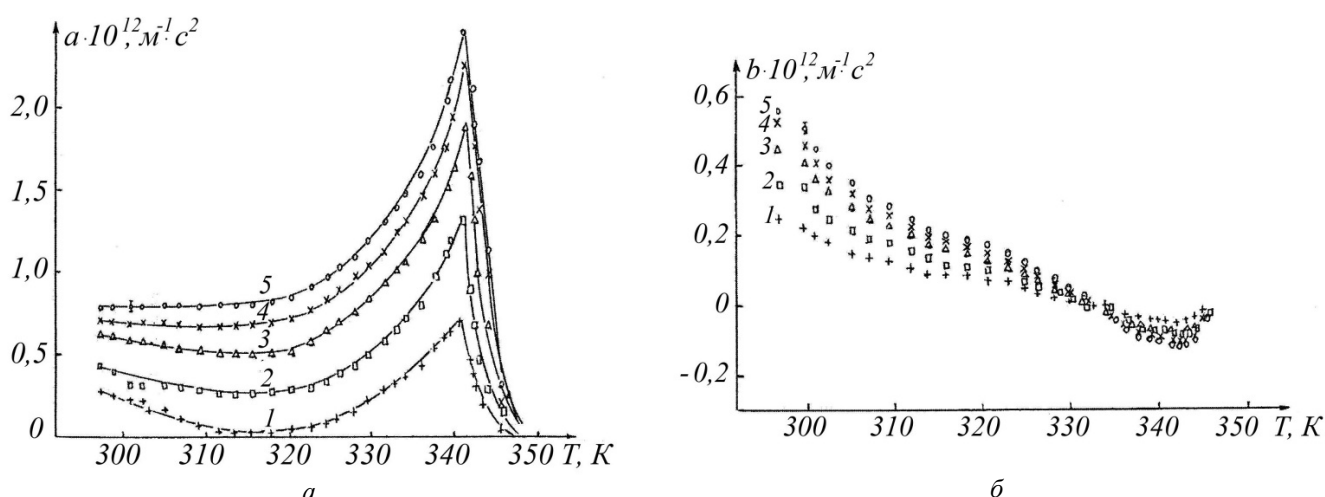


Рис. 5. Температурная зависимость параметров a (а) и b (б) угловой зависимости $\Delta\alpha/f^2$ в ЖК-440 при значениях угла β : 1 – 30°; 2 – 45°; 3 – 60°; 4 – 75°; 5 – 90°

Fig. 5. Temperature dependence of parameters a (a) and b (b) of the angular dependence $\Delta\alpha/f^2$ in LC-440 at the values of the angle β : 1 – 30°; 2 – 45°; 3 – 60°; 4 – 75°; 5 – 90°

В ЖК-440 повышение температуры сопровождается монотонным уменьшением параметра b угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука во всем температурном интервале нематической фазы, причем в окрестности фазового перехода НЖК – изотропная жидкость данный параметр меняет знак при всех значениях угла β (рис. 5, б). В нематической фазе БББА параметр b принимает экстремальные значения в области фазовых переходов в изотропную жидкость и в смектическую фазу. При $\beta < 45^\circ$ экстремумы параметра b слабо выражены и вдали от температур фазовых переходов данный параметр имеет значение, близкое к нулю. В окрестности фазового перехода НЖК – изотропная жидкость параметр b меняет знак.

Фазовая характеристика $\Delta\alpha(\omega_H \cdot t)/f^2$ коэффициента поглощения ультразвука во вращающемся магнитном поле зависит от температуры образца, а также параметров магнитного поля. Увеличение

угловой скорости вращения магнитного поля сопровождается изменением характера движения директора при достижении критического значения ω_K . Угловая скорость ω_K , при которой изменяется режим движения директора, зависит от температуры и параметров магнитного поля. Повышение температуры вызывает увеличение значения ω_K , причем с увеличением угла β влияние температуры на угловую скорость, при которой происходит смена режимов, возрастает. При вращении магнитного поля с угловой скоростью, превышающей ω_K , движение директора имеет сложный характер, что отражается на виде фазовой характеристики. Изменение угла β от 90° до 30° также оказывает влияние на характер движения директора и, следовательно, на вид фазовой характеристики коэффициента поглощения ультразвука (рис. 6). Увеличение угла β сопровождается уменьшением угловой скорости, при которой происходит изменение режима движения директор.

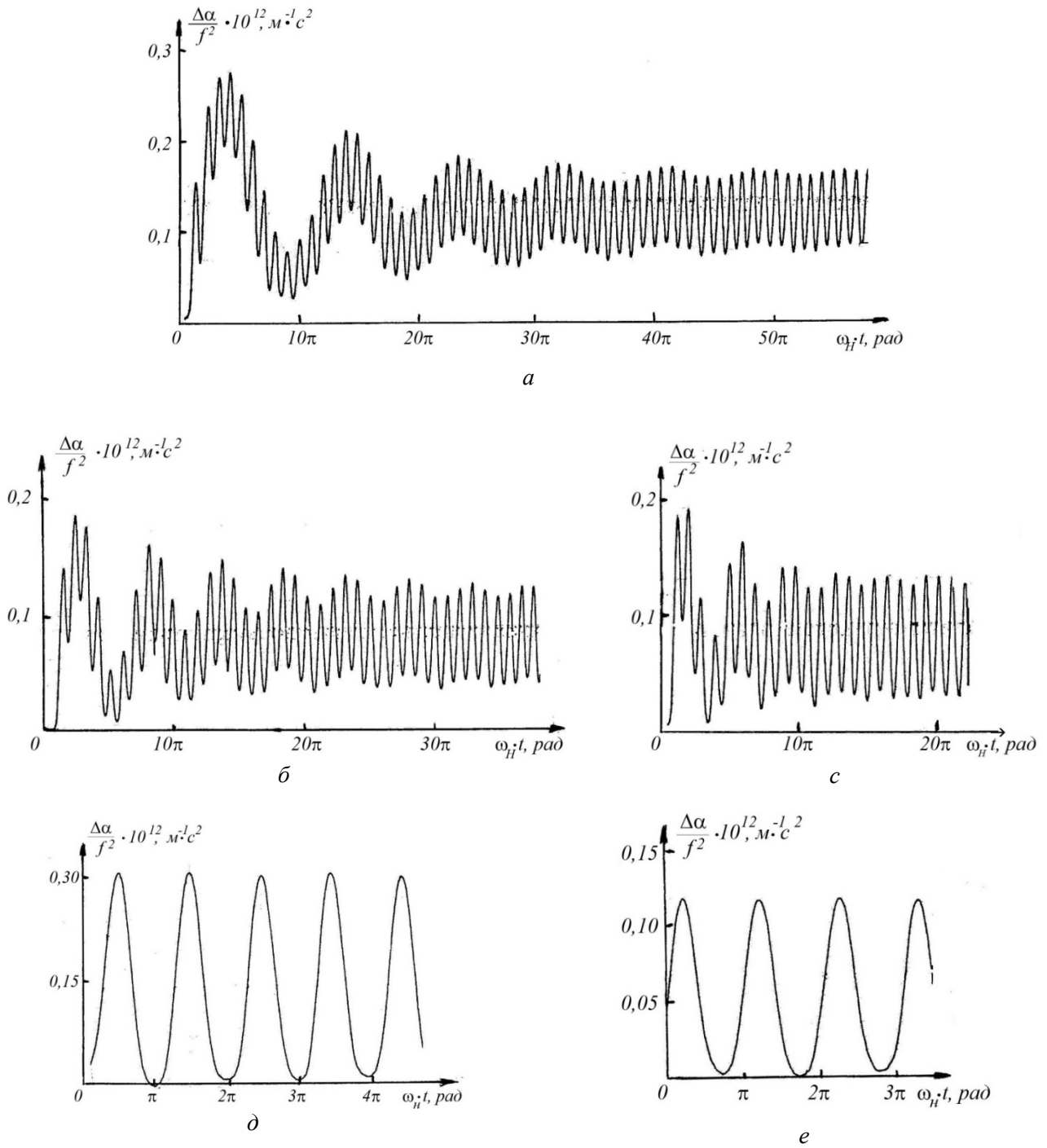


Рис. 6. Фазовая характеристика $\Delta\alpha/f^2$ в БББА при $T = 325,0$ К, индукции $B = 0,21$ Тл, $\omega_H = 0,36$ рад/с; значениях угла β : а – 90° ; б – 75° ; с – 60° ; д – 45° ; е – 30°

Fig. 6. Phase characteristic of $\Delta\alpha/f^2$ in BBBA at $T = 325.0$ K, induction $B = 0.21$ T, $\omega_H = 0.36$ rad/s; the values of the angle β : а – 90° ; б – 75° ; с – 60° ; д – 45° ; е – 30°

В отсутствие гидродинамических потоков в акустической камере, линейные размеры которой значительно превышают магнитную длину когерентности, уравнение движения директора можно записать в виде [3, 4]

$$\gamma_1 \cdot \frac{d\vec{n}}{dt} + \Delta\chi \cdot (\vec{n} \cdot \vec{H})^2 \cdot \vec{n} - \Delta\chi \cdot (\vec{n} \cdot \vec{H}) \cdot \vec{H} = 0, \quad (3)$$

Здесь γ_1 – коэффициент вращательной вязкости, \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля, $\Delta\chi = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ – анизотропия магнитной восприимчивости, χ_{\parallel} и χ_{\perp} – магнитная восприимчивость соответственно в направлении и перпендикулярно директору. Решение уравнения (3) с учетом соотношения (1) позволяет установить зависимость $\vec{n}(t)$ и $\alpha(t)$. Из выражения (3) следует система уравнений [3, 4]

$$\frac{dn_3}{dt} + \frac{\Delta\chi}{\gamma_1} \cdot (H_n \cdot n_0 \cdot \cos\psi + H_3 \cdot n_3) \times \\ \times (H_n \cdot n_3 \cdot \cos\psi - H_3 \cdot n_0) \cdot n_0 = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d\psi}{dt} - \omega_H + \frac{\Delta\chi}{\gamma_1} \cdot \sin\psi \cdot (H_n \cdot \cos\psi + H_3 \cdot \frac{n_3}{n_0}) = 0. \quad (5)$$

Здесь $n_0 = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$, $H_n = \sqrt{H_1^2 + H_2^2}$.

В синхронном режиме директор описывает в пространстве конус с углом при вершине меньшим, чем вектор напряженности магнитного поля

$$\frac{n_3}{n_0} = \frac{H_3}{H_n \cdot \cos\psi}. \quad (6)$$

Здесь угол ψ определяется соотношением

$$\frac{\omega_H}{\omega_0} = \left(\frac{H_n}{H}\right)^2 \cdot \sin 2\psi + \left(\frac{H_3}{H}\right)^2 \cdot 2\operatorname{tg}\psi, \quad (7)$$

где $\omega_0 = \Delta\chi H^2 / 2\gamma_1$ – критическая частота вращающегося поля.

В коническом магнитном поле, вращающемся с угловой скоростью ω_H , меньшей ω_K , по завершении переходного процесса длительностью τ_C (после начала вращения магнитного поля) директор вращается с такой же угловой скоростью синхронно с магнитным полем с постоянным фазовым сдвигом относительно вектора напряженности, равным ψ . Продолжительность процесса установления стационарного движения

$$\tau_C = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\omega_K^2 - \omega_H^2}} \quad (8)$$

зависит от температуры и параметров магнитного поля [4, 5]. В таблице приведены значения фазового сдвига, рассчитанные с помощью уравнений гидродинамики, в течение первых 10 с после начала вращения магнитного поля, в последнем столбце – стационарное значение ψ , определенное экспериментально.

Таблица. Значения фазового сдвига в БББА при $T = 339,0$ К в магнитном поле $B = 0,29$ Тл

Table. Values of the phase shift in BBBA at $T = 339.0$ K in magnetic field $B = 0.29$ T

$\beta^\circ \backslash t, c$	0,5	1	5	5	10	Экспериментальное значение
90	4,4	7,7	12,0	14,5	15,9	16,7
75	4,4	7,6	11,6	13,8	15,0	15,7
60	4,2	7,0	10,3	11,7	12,4	12,8
45	3,9	6,0	7,8	8,3	8,5	8,5
30	3,0	3,9	4,2	4,2	4,2	4,2

Значения фазового сдвига ψ , рассчитанные теоретически, совпадают с полученными экспериментально в пределах погрешности эксперимента, причем при изменении угла β от 90° до 30° время τ_C установления стационарного фазового сдвига уменьшается. Увеличение угловой скорости вращения магнитного поля приводит к возрастанию времени τ_C установления стационарного фазового сдвига. При приближении угловой скорости вра-

щения магнитного поля к угловой скорости ω_K смены режима движения директора продолжительность процесса установления стационарного резко возрастает, например, при изменении ω_H от $\omega_{H1} = 0,31$ рад/с до $\omega_{H2} = 0,72$ рад/с в ЖК-440 при $T = 315,7$ К, $\beta = 60^\circ$ и $B = 0,24$ Тл значение τ_C возрастает более чем в пять раз. В коническом магнитном поле при $\beta < 60^\circ$ асинхронный режим экспериментально не наблюдался.

Подстановка решения уравнения движения директора в синхронном режиме в формулу угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука (2) позволяет найти временную зависимость коэффициента поглощения ультразвука [3]

$$\frac{\alpha(\omega_H t)}{f^2} = d + \frac{a \cdot \cos^2(\omega_H \cdot t - \psi)}{1 + (1 + u^2) \cdot \operatorname{ctg}^2 \beta} + \frac{b \cdot \cos^4(\omega_H \cdot t - \psi)}{[1 + (1 + u^2) \cdot \operatorname{ctg}^2 \beta]^2}, \quad (9)$$

где $u = \operatorname{tg} \psi$.

Рассчитанная с помощью выражения (9) ани-

зотропия коэффициента поглощения ультразвука уменьшается при изменении угла между вектором индукции и осью вращения магнитного поля (рис. 7). Увеличение угла β приводит к смещению фазовой характеристики коэффициента поглощения ультразвука в направлении оси $\omega_H t$ (рис. 7).

Уравнение (9) фазовой характеристики коэффициента поглощения ультразвука в конечном магнитном поле в синхронном режиме, полученное в рамках гидродинамики нематической фазы [3, 4], удовлетворительно описывает зависимость акустического параметра $\Delta\alpha(\omega_H t)/f^2$.

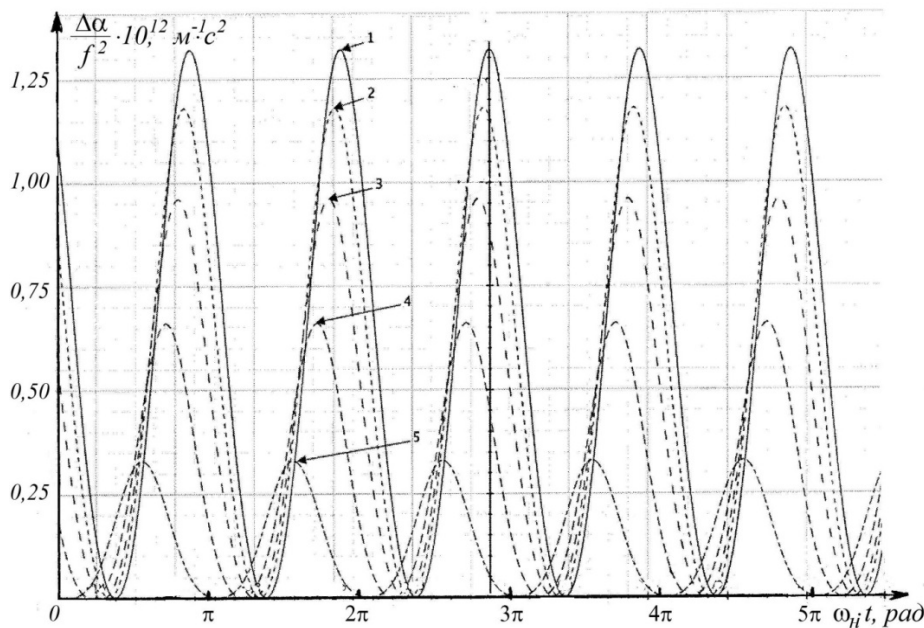


Рис. 7. Зависимость $\Delta\alpha(\omega_H t)/f^2$ от $\omega_H t$ в ЖК-440 при $T = 331,7$ К, $B = 0,21$ Тл, $\omega_H = 0,24$ рад/с и значениях угла β : 1 – 90° , 2 – 75° , 3 – 60° , 4 – 45° , 5 – 30°

Fig. 7. Dependence $\Delta\alpha(\omega_H t)/f^2$ on $\omega_H t$ in LC-440 at $T = 331.7$ K, $B = 0.21$ T, $\omega_H = 0.24$ rad/s and the values of the angle β : 1 – 90° , 2 – 75° , 3 – 60° , 4 – 45° , 5 – 30°

Выводы

Предложена методика получения конического магнитного поля. На примере ЖК, обладающего смектической фазой, и смеси НЖК установлено влияние параметров такого поля на акустические параметры и кинетику ориентационных процессов в нематической фазе в коническом магнитном поле. Уменьшение угла β между вектором индукции магнитного поля и осью вращения приводит к уменьшению фазового сдвига ψ между проекциями директора и вектора индукции магнитного поля

на плоскость, перпендикулярную оси вращения. При угле β , меньшем 56° в магнитном поле, индукция которого превышает значение насыщения, фазовый сдвиг директора и вектора индукции не достигает 45° в использованном диапазоне угловых скоростей вращения магнитного поля во всем температурном интервале нематической фазы. Установлено соответствие решения уравнения движения директора НЖК в магнитном поле, вектор индукции которого движется по конической поверхности, результатам акустических измерений фазового сдвига ψ между проекциями директора и

вектора индукции магнитного поля на плоскость, перпендикулярную оси вращения. Экспериментально подтверждено расширение частотного диапазона синхронного режима движения директора. Данный метод, в отличие от классического метода вращающегося магнитного поля, применим и для больших значений коэффициентов вязкости: в нематиках вблизи перехода в смектическую или кристаллическую фазы, а также, очевидно, в смектиках С.

Список литературы / References

1. Хабибуллаев П. К., Геворкян Э. В., Лагунов А. С. Реология жидких кристаллов. Ташкент : ФАН, 1992. 300 с. [Habibullaev P.K., Gevorkyan E.V., Lagunov A.S. Rheology of Liquid Crystals. New York : Allerton Press, 1994, 281 p. ISBN-10: 0898640776 / ISBN-13: 978-0898640779.
2. Беляев В. В. Вязкость нематических жидких кристаллов. М. : Физматлит, 2002. 224 с. [Belyaev V.V. Viscosity of Nematic Liquid Crystals. Publisher : Cambridge International Science Publishing, 2009, 240 p. ISBN 10: 1904602088 / ISBN-13: 9781904602088.
3. Геворкян Э. В. Поведение нематических жидких кристаллов в меняющемся магнитном поле // *Изв. вузов. Физика*. 1981. Т. 24, № 4. С. 57–60. [Gevorkyan E.V. Behavior of Nematic Liquid Crystals in a Variable Magnetic Field. *Soviet Physics Journal*, 1981, **24** (4), 343–346. DOI: 10.1007/BF00898269.
4. Геворкян Э. В. К теории магнитоакустических явлений в нематических и смектических жидких кристаллах // *Применение ультразвука к исследованию вещества: межвуз. сб. статей*. М. : ВЗМИ, 1981. Вып. 32. С. 48–58. [Gevorkyan E.V. On the Theory of Magnetoacoustic Phenomena in Nematic and Smectic Liquid Crystals. *Primeneniye ul'traakustiki k issledovaniyu veshchestva*. М. : VZMI, 1981, (32), 48–58. (in Russ.)].
5. Ларионов А. Н., Геворкян Э. В., Ларионова Н. Н., Ефремов А. И. Исследование динамики ориентационных процессов в периодически меняющихся магнитных полях // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика*. 2015. № 3. С. 27–38. [Larionov A.N., Gevorkyan E.V., Larionova N.N., Efremov A.I. The Investigation of Orientation Processes Dynamics in Periodically Varying Magnetic Fields. *Vestnik Voronezhskogo gos. universiteta. Seriya Fizika. Matematika*, 2015, (3), 27–38. (in Russ.)].
6. Jähnig F. Dispersion and absorption of sound in nematics. *Z. Physik.*, 1973, **258**, 199–208.

Поступила в редакцию 11.10.2017 г.
Received 11 October 2017

Геворкян Эдвард Вигенович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Московского государственного областного университета. 107005. Москва, ул. Радио, д. 10 а.
Домашний адрес: 125222, Москва, ул. Барышиха, д.12, кв. 43. Тел.: 8-(917)-598-46-23.
E-mail: gevev@ Rambler.ru

Ларионов Алексей Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Воронежского государственного аграрного университета.
394087. Воронеж, ул. Мичурина, 1.
Домашний адрес: 394000, Воронеж, ул. Кардашова, д.1, кв.56. Тел. – 8 (473) 253-00-00.
E-mail: Larionovan@yandex.ru

Ларионова Нина Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры естественных дисциплин института международного обучения Воронежского государственного университета,
394006, Воронеж, Университетская пл., 1.
Домашний адрес: 394000, Воронеж, ул. Кардашова, д.1, кв.56. Тел. – 8 (473) 253-00-00.
E-mail: Larionovan@yandex.ru

Ефремов Андрей Игоревич, ассистент кафедры математики и физики Воронежского государственного аграрного университета.
394087. Воронеж, ул. Мичурина, 1.
Домашний адрес: г. Воронеж, ул. Ростовская, д.86, кв. 77.
Тел. - 89507506634, E-mail: araforg@gmail.com