

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ И ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

©2015 А. Н. Ларионов<sup>1</sup>, Д. Л. Богданов<sup>2</sup>, Н. Н. Ларионова<sup>3</sup>, А. И. Ефремов<sup>1</sup>,  
К. А. Тощенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1,  
394006 Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный областной университет, ул. Радио, 10-а,  
107005 Москва, Россия

<sup>3</sup>Воронежский государственный аграрный университет, ул. Мичурина, 1,  
394087 Воронеж, Россия  
e-mail: larionovan@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.04.2015 г.

**Аннотация.** Исследовано влияние давления и температуры на диссипативные коэффициенты и диэлектрическую релаксацию в смесях нематических жидких кристаллов. Впервые изучено влияние давления на диссипативный коэффициент  $\nu_3$  нематической фазы. Установлено, что возрастание коэффициента  $\nu_3$  при повышении температуры обусловлено взаимодействием волн сжатия, сдвига и ориентации.

**Ключевые слова:** диэлектрическая релаксация, время ориентационной релаксации, нематическая фаза, коэффициенты вязкости.

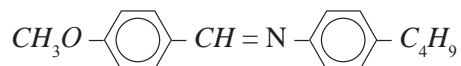
### ВВЕДЕНИЕ

Высокая чувствительность нематических жидких кристаллов (НЖК) к воздействию внешних электрических и магнитных полей обуславливает перспективность их применения в устройствах отображения информации, различного рода датчиках, запоминающих и других технических устройствах [1÷3]. Для повышения быстродействия и оптимизации параметров жидкокристаллических устройств необходимо исследование влияния химического состава и молекулярной структуры жидких кристаллов (ЖК) на неравновесные свойства нематической фазы. Феноменологическая теория упругости НЖК Озина—Франка удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами, полученными при исследовании образцов, линейные размеры которых соизмеримы или меньше магнитной длины когерентности, то есть в тонких слоях ЖК [4, 5]. Расхождение теории с результатами эксперимента по ряду фундаментальных свойств, особенно неравновесных свойств нематической фазы, проявляется для образцов, линейные размеры которых превышают 1 мм. Ис-

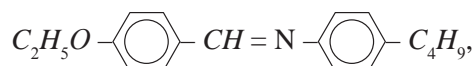
следование зависимости неравновесных свойств ЖК от степени ориентационной упорядоченности сдерживается, в определённой степени, отсутствием достаточно обширного экспериментального материала, посвящённого изучению релаксационных процессов в больших объёмах НЖК, то есть в условиях значительной величины отношения линейных размеров образца к магнитной длине когерентности. В этом плане перспективным представляется применение акустического метода исследований, поскольку наряду с возможностью изучения динамики ориентационных процессов в больших объёмах вещества, этот метод позволяет получать полезную информацию для установления связей между акустическими и молекулярно-кинетическими параметрами, характеризующими ориентационную релаксацию в ЖК, являющимися функциями температуры и давления [6]. Целью данной работы является изучение кинетики молекулярных процессов при изменении температуры и давления и установление связи диссипативных коэффициентов и параметров, характеризующих диэлектрическую релаксацию в нематической фазе.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследована эвтектическая смесь (ЖК-404) п-н-метоксибензилиден-п-бутиланилина (МББА)



и п-н-этоксibenзилиден-п-бутиланилина (ЭББА)



а также смесь ЖК-440, содержащая 1 часть п-н-бутил — п-гептаноилоксиазоксибензола (БГОАБ, ЖК-439) и 2 части п-н-бутил-п-метоксиазоксибензола (БМОАБ, ЖК-434).

Изучение смесей НЖК обусловлено тем, что присущее им расширение температурного интервала нематической фазы относительно компонентов смеси обеспечивает возможность исследования динамики ориентационных процессов в области состояний, не подверженных влиянию предпере-

ходных явлений. Это открывает перспективу оценки воздействия гетерофазных флуктуаций на кинетические свойства мезофазы. Повышение давления сопровождается увеличением температуры фазового перехода НЖК — изотропная жидкость ( $T_c$ ). В исследованном диапазоне давлений  $10^5 \div 6 \cdot 10^7$  Па зависимость  $T_c(P)$  является линейной:

$$T_c(P) = T_{c0} + k \cdot P, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, равный  $2.47 \cdot 10^{-7}$  К·Па<sup>-1</sup> для ЖК-404 и  $3.28 \cdot 10^{-7}$  К·Па<sup>-1</sup> для ЖК-440,  $T_{c0}$  — температура фазового перехода НЖК — изотропная жидкость при атмосферном давлении, равная 325.2 К (ЖК-404) и 345.7 К (ЖК-440).

Измерительная камера (рис. 1), выполненная из диамагнитной нержавеющей стали марки 10X17H13M2T, выдерживает давление до  $2 \cdot 10^8$  Па. Абсолютная погрешность измерения давления не превышает  $0.5 \cdot 10^5$  Па. Регулировка температуры оболочки 5 термостата (рис. 1) осуществлялась

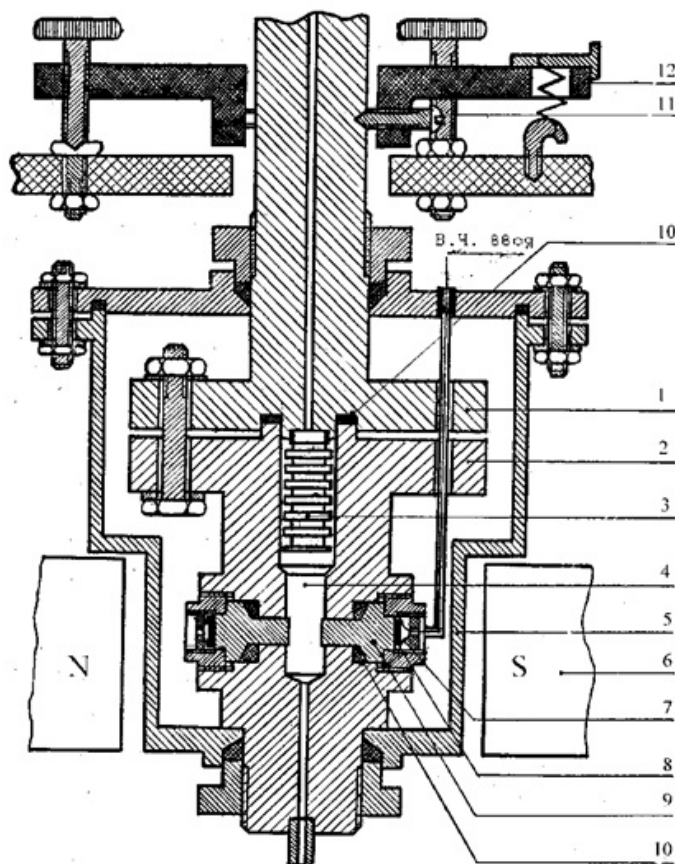


Рис. 1. Эскиз камеры высокого давления:

1, 2 — корпус автоклава; 3 — сильфон; 4 — полость для исследуемого вещества; 5 — оболочка термостата; 6 — магнит; 7 — пружина; 8 — пьезокристалл; 9 — акустическая линия задержки; 10 — уплотнения; 11 — регулировочные винты; 12 — столик для юстировки

потенциометром КВП-1-520. Температура второго нагревательного элемента, расположенного на корпусе 2 автоклава, плавно изменялась с помощью специально сконструированного терморегулятора. Применение двухконтурной системы термостатирования позволило снизить нестабильность температуры исследуемого вещества до  $\pm 0.01$  К. Исследования выполнены импульсно-фазовым методом фиксированного расстояния [7] на частоте ультразвука  $f=2.67\div 8.3$  МГц. В основе использования акустического метода в целях вискозиметрии лежат исследования анизотропии коэффициента поглощения ультразвука при изменении взаимной ориентации (угла  $\psi$ ) между волновым вектором  $\vec{q}$  и вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . В квазистатическом режиме при медленном повороте вектора  $\vec{B}$  относительно волнового вектора  $\vec{q}$  магнитное поле однозначно определяет ориентацию (угол  $\theta$ ) локальной оптической оси (директора  $\vec{n}$ ) жидкого кристалла относительно  $\vec{q}$  ( $\theta \equiv \psi$ ). При этом наблюдается изменение коэффициента поглощения ультразвука  $\alpha(\theta)$ . Относительная погрешность определения отношения  $\Delta\alpha/f^2$  составляет 2%. Здесь  $\Delta\alpha = \alpha^{\parallel} - \alpha^{\perp}$  — анизотропия коэффициента поглощения ультразвука,  $\alpha^{\parallel}$  и  $\alpha^{\perp}$  — коэффициент поглощения ультразвука соответственно при параллельной и нормальной взаимной ориентации директора НЖК и волнового вектора.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Установленное экспериментально влияние ориентационной динамики на акустические свойства жидких кристаллов [8, 9] открывает возможные пути трактовки дисперсионной зависимости диэлектрической проницаемости и диэлектриче-

ских потерь. В частности при равенстве периода ультразвуковой волны, времени диэлектрической релаксации ( $\tau_3$ ) и времени ориентационной релаксации ( $\tau_0$ ) наблюдается «спектр» аномального поведения вязко-упругих свойств НЖК и анизотропии свойств [10].

Комплексная диэлектрическая проницаемость в области релаксации в приближении Дебая описывается уравнением:

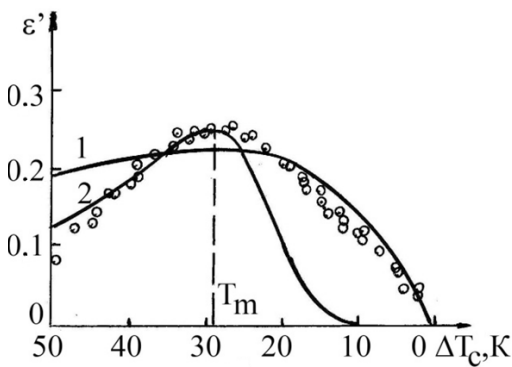
$$\epsilon' - j \cdot \epsilon'' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{\omega 0} - \epsilon_{\infty}}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_3}, \tag{2}$$

где  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  — соответственно действительная и мнимая составляющая диэлектрической проницаемости ЖК,  $\epsilon_{\omega 0}$  — статическая диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_{\infty}$  — диэлектрическая проницаемость в области высоких частот [11].

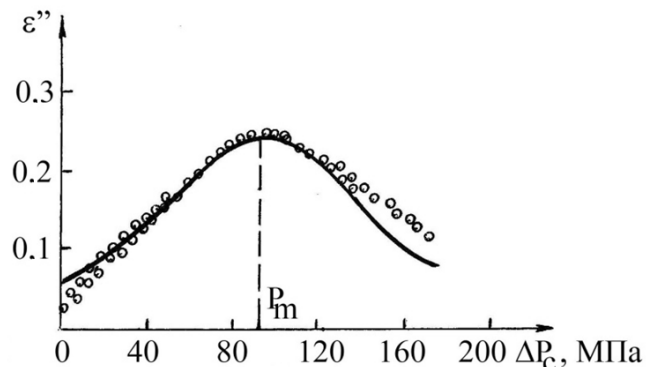
По результатам экспериментальных исследований диэлектрической релаксации [10, 12], получена зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от температуры и давления (рис. 2). Сплошные кривые 1 и 2 на рис. 2а получены согласно следующим дисперсионным соотношениям соответственно:

$$\epsilon''(\Delta T_C) = C \cdot \frac{\Delta T_m / \Delta T_C}{1 + (\Delta T_m / \Delta T_C)^2}, \tag{3}$$

$$\epsilon''(\Delta T_C) = C_1 \cdot \frac{\exp \left[ C_2 \cdot \left( \frac{1}{\Delta T_C} - \frac{1}{\Delta T_m} \right) \right]}{1 + \left\{ \exp \left[ C_2 \cdot \left( \frac{1}{\Delta T_C} - \frac{1}{\Delta T_m} \right) \right] \right\}^2}. \tag{4}$$



а)



б)

**Рис. 2.** Зависимость мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости в ЖК-404 на частоте 3.1 МГц:

а) от температуры 1 — согласно соотношению (3); 2 — согласно соотношению (4); б) от давления

Здесь  $\Delta T_m = T_c - T_m$ ,  $C$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  — константы.

Зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от давления (сплошная линия на рис. 2б) определяется выражением [12]:

$$\varepsilon''(\Delta P_c) = C_3 \cdot \frac{\exp[C_4 \cdot (\Delta P_c - \Delta P_m)]}{1 + \{\exp[C_4 \cdot (\Delta P_c - \Delta P_m)]\}^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta P_m = P_m - P_c$ ,  $P_c$  — давление, соответствующее фазовому переходу НЖК — изотропная жидкость при данной температуре,  $C_4$  — константа.

Результаты акустических исследований позволяют оценить время ориентационной релаксации, поскольку анизотропия акустических свойств НЖК имеет релаксационную природу с механизмом, обусловленным динамикой ориентационной структуры (релаксацией директора) [13]. Согласно континуальной теории Франка-Озина [13] время ре-

лаксации директора изменяется в широких пределах (от микросекунд до часов) и существенно зависит от толщины ( $d$ ) монокристаллических образцов:

$$\tau_n = \frac{\gamma_1 \cdot d^2}{\pi^2 \cdot K_{22}}, \quad (6)$$

где  $\gamma_1$  — коэффициент вращательной вязкости,  $K_{22}$  — модуль упругости кручения Франка. В пределе малых значений  $d \approx 10^{-9}$  м и  $\gamma_1 \approx 0.02$  Па·с при  $\Delta T_c = 2$  К величина  $\tau_n$  составляет приблизительно  $10^{-9}$  с, то есть порядок времени акустической и низкочастотной диэлектрической релаксации.

Соотношение (2) может быть использовано для расчёта времени низкочастотной диэлектрической релаксации (табл. 1):

$$\tau_\omega = \frac{\varepsilon''}{\omega \cdot (\varepsilon' - \varepsilon_\infty)} \quad (7)$$

Таблица 1.  $\tau_\omega \cdot 10^8$  с, ЖК-404

$P, \text{ МПа}$ \ / \ $\Delta T_c, \text{ К}$	2	5	10	15	20	25
0.1	13	16	19	40	74	127
60	16	20	32	56	78	119

Сопоставление результатов, полученных методом акустической и радиоэлектрической спектроскопии приводит к следующему выражению времени релаксации:

$$\tau_{op} = \frac{v_3}{C_{33} - C_{11}}, \quad (8)$$

значение которого в исследованных веществах имеет порядок  $10^{-9}$  с.

Расчет значений коэффициента вязкости  $v_3$  при атмосферном давлении, выполненный по результатам исследований диэлектрической релаксации ( $v_{3\omega}$ ) и полученных акустическим методом ( $v_{3A}$ ) показал согласие результатов по порядку величины (табл. 2).

Таблица 2. Значения ( $v_{3\omega}/v_{3A}$ ) в ЖК-404 при давлении  $P=10^5$  Па

$\Delta T_c, \text{ К}$	26.7	22.1	18.0	14.8	11.2	7.4	6.0	5.1	3.6
$(v_{3\omega}/v_{3A})$	4.5	3.6	3.2	2.1	1.4	2.1	2.8	2.8	2.8

Таким образом, расхождение значений коэффициента вязкости  $v_3$ , рассчитанных из акустических измерений и по результатам радиоэлектрической спектроскопии невелико вдали от фазовых переходов и возрастает по мере приближения к  $T_c$ , а также в низкотемпературной области нематической фазы. Качественное согласие полученных результатов позволило оценить характер зависимости коэффициента  $v_3$  от давления. Повышение давления приводит к смещению изотерм  $v_3(P)$

в область больших значений. Влияние давления на величину коэффициента  $v_3$  возрастает по мере приближения к температуре  $T_c$ : при  $\Delta T_c = 28.0$  К воздействие давления на  $v_3$  характеризуется коэффициентом  $(\partial v_3 / \partial P) = 0.8 \cdot 10^{-9}$  с, при  $\Delta T_c = 10.0$  К —  $(\partial v_3 / \partial P) = 10^{-9}$  с и при  $\Delta T_c = 2.0$  К —  $(\partial v_3 / \partial P) = 1.2 \cdot 10^{-9}$  с (для ЖК-404).

В соответствии с молекулярно-статистической теорией Майера и Заупе [14] ориентационное движение молекул или молекулярных комплексов под



действием меняющегося внешнего поля связано с необходимостью преодоления потенциального барьера [15]:

$$E = D(\theta)_{\max} - D(\theta)_{\min} = \frac{3}{2} \cdot \frac{A}{m \cdot V_N^2} = \varepsilon \cdot S, \quad (9)$$

где  $D(\theta)$  — потенциал среднего поля теории Майера и Заупе [15],  $V_N$  — объем, приходящийся на молекулу нематика или молекулярный комплекс,  $m$  — координационное число,  $\theta$  — угол между длинной осью молекулы и директором,  $A$  — молекулярный параметр, зависящий от анизотропии поляризуемости молекул НЖК,  $\varepsilon$  — подгоночный параметр. Из уравнения (8) следует, что энергия активации прямо пропорциональна параметру порядка, то есть зависит от температуры, в то время, как в изотропных жидкостях величина  $E$  не зависит от температуры. Молекулярно-статистическая теория ориентационной релаксации [16], связывает движение молекул или молекулярных комплексов с вращательными скачками вокруг оси, перпендикулярной преимущественной ориентации между двумя равновесными состояниями, разделенными углом в  $\pi$  радиан. Если НЖК находится в равновесии при некоторой температуре  $T$ , то частота таких перескоков  $\nu_0(T)$  связана с коэффициентом вращательной вязкости соотношением:

$$\gamma_1 = \frac{k \cdot T}{\pi^2 \cdot V_i^2 \cdot \nu_0(T)}, \quad (10)$$

где  $V_i$  — объем молекулы НЖК, экстраполированный из изотропной фазы,

$$\nu_0(T) \sim \exp\left(\frac{\varepsilon \cdot S}{k \cdot T}\right). \quad (11)$$

Частота  $\nu_0$  обратно пропорциональна времени диэлектрической релаксации.

Диссипативный коэффициент  $\nu_3$  может быть рассчитан из системы уравнений гидродинамики Форстера для нематической фазы [17]:

$$\nu_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( \nu_1 + \nu_2 - \frac{b \cdot \rho \cdot c_0^3}{4 \cdot \pi^2} \right), \quad (12)$$

где  $\nu_1$  и  $\nu_2$  — коэффициенты сдвиговой вязкости,  $c_0$  — скорость ультразвука,  $b$  — коэффициент уравнения зависимости коэффициента поглощения ультразвука от угла ориентации директора относительно волнового вектора.

Температурная зависимость коэффициента  $\nu_3$  имеет сложный характер (рис. 3) и в исследованных веществах  $\nu_3$  возрастает при повышении температуры (табл. 3). Увеличение коэффициента  $\nu_3$  при повышении температуры является следствием взаимодействия волн сжатия, сдвига и ориентации, поскольку частота сдвиговых деформаций (2.67...8.3 МГц) при  $T \rightarrow T_c$  становится соизмеримой с частотой ориентационной релаксации:

$$f_0 = \frac{\Delta\chi \cdot H^2}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_1}. \quad (13)$$

Таблица 3. Значения коэффициента  $\nu_3 \cdot 10^2$ , Па·с

НЖК \ $\Delta T_c$ , K	2	4	7	10	12	15	20	25
МББА	4.20	3.60	3.00	2.56	2.30	1.95	1.42	—
ЖК-440	1.58	1.54	1.48	1.43	1.39	1.34	1.28	1.24
Н-96	1.90	1.30	1.01	0.82	0.73	0.62	0.47	0.36

Выполненные исследования позволяют оценить скорость ориентационной волны ( $c_{OP}$ ) в предположении, что дисперсия модуля ориентационной упругости ( $K_{OP}$ ) определяется анизотропией  $C_{33} - C_{11}$ . Тогда из соотношения:

$$c_{OP} = \sqrt{\frac{K_{OP}}{\rho}} \quad (14)$$

следует значение скорости ориентационной волны в ЖК, равное 33 м/с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования диэлектрической релаксации в НЖК показали, что верхняя граница спектра ориентационной релаксации находится в диапазоне 1—10 МГц, то есть при стремлении коэффициента вращательной вязкости к нулю в окрестности  $T_c f \rightarrow f_0$ , а уменьшение коэффициента вязкости  $\nu_3$  при понижении температуры есть следствие частотной зависимости:

$$\nu_3 = \nu_3^m \cdot \frac{f_0}{f}. \quad (15)$$

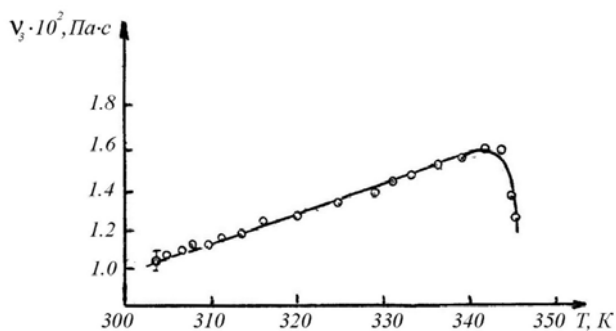


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента вязкости  $v_3$  в ЖК-440 на частоте 2.67 МГц при давлении  $10^5$  Па

Таким образом, температурная зависимость  $v_3$  отражает взаимодействие сдвига и ориентации при периодических объёмных деформациях, когда время ориентационной релаксации становится соизмеримым с периодом акустических волн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sirleto L., Coppola G., Righini G. C., Abbate G. // *Fiber and integrated optics*, 2006, vol. 25, p. 175.
2. Wolinski T. R., Czapla A., Ertman S. // *IEEE Transactions on instrumentation and measurements*, 2008, vol. 57, № 8, p. 1796.
3. Ларионов А. Н., Воищев В. С. // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 2013, т. 39, № 4(39), с. 134—138.

4. Pasechnik S. V., Larionov A. N., Balandin V. A. and Nozdrev V. F. // *Journal de Physique (Fr)*, 1984, vol. 45, № 3, p. 441.

5. Беляев В. В. *Вязкость нематических жидких кристаллов*. М.: Физматлит, 2002, 222 с.

6. Богданов Д. Л., Лагунов А. С., Пасечник С. В. // «Применение ультразвуки к исследованию вещества», сб. статей, М.: ВЗМИ, 1979, вып. 30, с. 52—62.

7. Larionov A. N., Larionova N. N., Pasechnik S. V. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, vol. 409, p. 459.

8. Herba H., Drzumala A. // *Liquid Crystals*, 1990, vol. 8, № 6, p. 819.

9. Богданов Д. Л., Лагунов А. С., Ларионов А. Н. // *Журнал физической химии*, 1982, т. LVI, № 6, с. 1494—1499.

10. Емельянов В. А., Лагунов А. С., Фирсов Г. И. // *Журнал физической химии*, 1998, т. 72, № 9, с. 1714—1717.

11. Штыков Н. М. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2002, т. 121, вып. 3, с. 739—740.

12. Емельянов В. А. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 1999, 116 с.

13. Tsvetkov V. A. *Advances in liquid crystal research and applications edited by Lajos Bata. Pergamon Press, Budapest*, 1980, p. 567.

14. ДеЖен П. *Физика жидких кристаллов*. М.: Мир, 1977, 400 с.

15. Maier W., Saupe A. // *Z. Naturforschg*, 1960, vol. 15a, № 4, p. 287.

16. Martins A. F. // *Portugaliae Physica*, 1974, vol. 9, № 1, p. 1.

17. Forster D. // *Physical Review Letters*, 1974, vol. 32, № 21, p. 1161.

## DIELECTRIC RELAXATION AND VISCOELASTIC PROPERTIES OF NEMATIC LIQUID CRUSTALS

© 2015 A. N. Larionov<sup>1</sup>, D. L. Bogdanov<sup>2</sup>, N. N. Larionova<sup>3</sup>, A. I. Efremov<sup>1</sup>, K. A. Toshchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, 394006 Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Regional University, Radio st., 10-a, 107005 Moscow, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Agrarian University, Michurin st., 1, 394087 Voronezh, Russia

e-mail: larionovan@yandex.ru

**Abstracts.** The influence of the pressure and temperature upon dielectric relaxation and coefficients of viscosity of mixtures of nematic liquid crystals has been studied. The acoustic researches were realized at the frequencies range of ultrasound 2.67—8.3 MHz. The main goal of this paper is studying the mechanism of the interdependence of dielectric and acoustic relaxation of liquid crystals. The dependence of the dielectric permeability upon P, T-state parameters has been studied. The influence of the pressure and temperature on the time of orientation relaxation has been interpreted in the framework of molecular statistical theory by Maier and Saupe. The values of the viscosity the coefficient  $v_3$  of Forster hydrodynamics has been determined for the first time. The correlation of the waves of compression, shear and orientation lead to the growth of the viscosity coefficient  $v_3$  at increase of the temperature. The values of the viscosity coefficient  $v_3$  obtained by the dielectric and acoustic spectroscopy methods are in agreement.

**Keywords:** dielectric relaxation, orientation relaxation time, nematic phase, viscosity coefficients.

Received 27.04.2015

REFERENCES

1. Sirleto L., Coppola G., Righini G. C., Abbate G. *Fiber and integrated optics*, 2006, vol. 25, pp. 175—194. DOI:10.1080/01468030600569800
2. Wolinski T. R., Czapla A., Ertman S. *IEEE Transactions on instrumentation and measurements*, 2008, vol. 57, no. 8, pp. 1796—1802. DOI: 10.1109/TIM.2008.922077
3. Larionov A. N., Voischev V. S. *Vestnik Voronezhskogo gosudarsvennogo universiteta*, 2013, vol. 39, no. 4, pp. 134—138.
4. Pasechnik S. V., Larionov A. N., Balandin V. A. and Nozdrev V. F. *Journal de Physique (Fr)*, 1984, vol. 45, no. 3, p. 441. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/jphys:01984004503044100>
5. Beliaev V. V. *Viaskost nematiceskikh zhidkih kristallov* [The viscosity of the nematic liquid crystals]. Moscow, Fizmatlit. Publ., 2002, 222 p.
6. Bogdanov D. L., Lagunov A. S., Pasechnik S. V. *Primenenie ultraacustikik issledovaniju veschestva* [Application of ultrasonics to the study of matter]. Moscow, VZMI Publ., 1979, vol. 30, pp. 52—62.
7. Larionov A. N., Larionova N. N., Pasechnik S. V. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, vol. 409, p. 459. DOI:10.1080/15421400490434009. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15421400490434009>.
8. Herba H., Drzumala A. *Liquid Crystals*, 1990, vol. 8, no. 6, p. 819. DOI:10.1080/02678290802018352
9. Bogdanov D. L., Lagunov A. S., Larionov A. N. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry A], 1982, vol. LVI, no. 6, pp. 1494—1499.
10. Emelianov V. A., Lagunov A. S., Firsov G. I. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry A], 1998, vol. 72, no. 9, pp. 1714—1717.
11. Shtikov N. M. *Zhurnal experimentalnoj i teoreticheskoj fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2002, vol. 121, no. 3, pp. 739—740. Available at: [http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r\\_121\\_0739.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_121_0739.pdf)
12. Emelianov V. A. Diss. cand. fiz.-mat. nauk [Cand. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 1999, 116 p.
13. Tsvetkov V. A. *Advances in liquid crystal research and applications*. Ed.: Lajos Bata, Budapest, Pergamon Press Publ., 1980, 567 p.
14. de Gennes P. G. and Prost J. *The Physics of Liquid Crystals*. Moscow, Mir Publ., 1977, 400 p.
15. Maier W., Saupe A. Z. *Naturforschg*, 1960, vol. 15a, no. 4, p. 287. Available at: [http://zfn.mpg.de/data/Reihe\\_A15/ZNA-1960—15a-0287.pdf](http://zfn.mpg.de/data/Reihe_A15/ZNA-1960—15a-0287.pdf)
16. Martins A. F. *Portugaliae Physica*, 1974, vol. 9, no. 1, p. 1
17. Forster D. *Physical Review Letters*, 1974, vol. 32, no. 21, p. 1161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.32.1161>.

*Ларионов Алексей Николаевич* — д. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2530000, e-mail: Larionovan@yandex.ru

*Богданов Дмитрий Леонидович* — д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой общей физики, Московский государственный областной университет; тел.: +7(910) 2458315, e-mail: dmitry.l.bogdanov@gmail.com

*Ларионова Нина Николаевна* — к. ф.-м. н., доцент кафедры физики, Воронежский государственный аграрный университет; тел.: +7 (473) 2530000, e-mail: Larionovan@yandex.ru

*Ефремов Андрей Игоревич* — аспирант кафедры общей физики, Воронежский государственный университет; тел.: +7(950) 7506634, e-mail: araforr@gmail.com

*Тощенко Константин Алексеевич* — студент физического факультета, Воронежский государственный университет; тел.: +7(951) 8716974, e-mail: araforr@gmail.com

*Larionov Alexei N.* — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of General Physics, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2530000, e-mail: Larionovan@yandex.ru

*Bogdanov Dmitry L.* — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department of General Physics, Moscow State Regional University; ph.: +7(910) 2458315, e-mail: dmitry.l.bogdanov@gmail.com

*Larionova Nina N.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Physics, Voronezh State Agrarian University; ph.: +7 (473) 2530000, e-mail: Larionovan@yandex.ru

*Efremov Andrei I.* — post graduate Student, Department of General Physics, Voronezh State University; ph.: +7(950) 7506634, e-mail: araforr@gmail.com

*Toshchenko Konstantin A.* — Student, Physics Faculty, Voronezh State University; ph.: +7(951) 8716974, e-mail: araforr@gmail.com