

УДК 537.226.1:537.226.3

Д. Н. Чаусов

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ЦИАНОФЕНИЛПИРИДИНОВ

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

В диапазоне частот $10 \div 10^8$ Гц проведены диэлектрические исследования нематической жидkokристаллической смеси ЖК-1630А в интервале температур $(-10 \div 90$ °С). На основании модели релаксационной поляризации Дебая численно аппроксимированы диэлектрические спектры температурной зависимости времени ориентационной релаксации τ при параллельной ориентации директора молекул относительно переменного электрического поля. Определена энергия активации релаксационного процесса вращения молекул вокруг их короткой оси в температурном интервале $(-10 \div 15$ °С), в котором наблюдается дисперсия продольной компоненты диэлектрической проницаемости и рассчитана энергия межмолекулярного взаимодействия, которую преодолевают полярные молекулы при их вращении в мезофазе. Вычислены значения коэффициента молекулярного трения и вращательной диффузии различными методами. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с имеющимися теоретическими моделями.

Ключевые слова: диэлектрическая спектроскопия, коэффициент молекулярного трения, коэффициент вращательной диффузии.

DOI: 10.18083/LCApl.2018.3.45

D. N. Chausov

DIELECTRIC RELAXATION IN LIQUID CRYSTALLINE MIXTURE BASED ON CYANOPHENYLPYRIDINES

Moscow Regional State University (MRSU),
10a Radio St., Moscow, 105005, Russia. E-mail: d.chausov@yandex.ru

Dielectric properties of nematic liquid crystal mixture ZhK-1630A were investigated in the frequency range of $10 \div 10^8$ Hz and temperature range of $-10 \div 90$ °C. On the basis of the Debye's relaxation polarization model, dielectric spectra of the temperature dependence of the orientational relaxation time τ were numerically approximated at the parallel orientation of the molecular director relatively to the alternating electric field. The activation energy of the relaxation process of the rotation of molecules around their short axis was measured in the temperature interval of $-10 \div 15$ °C in which a dispersion of the longitudinal component of the dielectric constant takes place. The energy of potential barrier for polar molecules rotation in the mesophase was calculated. The values of the molecular friction coefficient and rotational diffusion coefficient were obtained by different methods. The experimental data obtained are in satisfactory agreement with the existing theoretical models.

Key words: dielectric spectroscopy, molecular friction coefficient, rotational diffusion coefficient.

Введение

Диэлектрическая спектроскопия нематических жидких кристаллов (НЖК) позволяет не только получать важные диэлектрические характеристики, такие как проводимость, характерные времена релаксации, диэлектрическая проницаемость и ее анизотропия, но и изучать процессы молекулярной динамики НЖК [1–3]. В частности, вращательная динамика молекул НЖК обуславливает дисперсию диэлектрической проницаемости и смену ее знака в определенных нематических растворах [4–7].

Настоящая работа посвящена измерению и анализу диэлектрических спектров и релаксационных процессов в нематической жидкокристаллической смеси в широком диапазоне температур. В качестве объекта исследования выбрана жидкокристаллическая смесь ЖК-1630А (НИОПИК, Россия) с широким температурным интервалом существования нематической мезофазы (от 200 К до 350 К), что позволяет проводить исследования вдали от предпереходных процессов.

Смесь ЖК-1630А состоит на основе *цианофенилпиридинов* и, в отличие от смесей на основе *цианобифенилов* [8, 9] и сложных эфиров, обладает лучшими мультиплексными характеристиками (1:64) [10]. На высокий уровень мультиплексирования влияет отношение констант упругости K_3/K_1 и отношение $\Delta\epsilon/\epsilon_{\perp}$. На рис. 1

представлена структурная формула *цианофенилпиридинов*, входящих в состав ЖК-1630А.

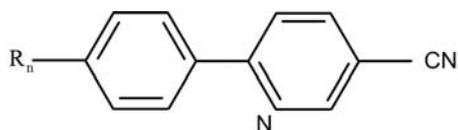


Рис. 1. Структурная формула цианофенилпиридина

Fig. 1. Structural formula of cyanophenyl pyridine

Целью работы является исследование влияния диполь–дипольных корреляций молекул на время релаксации, коэффициенты молекулярного трения и вращательную диффузию молекул смеси ЖК-1630А.

Эксперимент

На рисунке 2 приведены данные дифференциальной сканирующей калориметрии жидкокристаллических смесей ЖК-1630А. Исследования проводились на дифференциальном сканирующем калориметре *Mettler Toledo DSC 3* с возможностью измерений в температурном диапазоне от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перед измерениями образец проходил стадии нагрева до изотропной фазы и плавного охлаждения до комнатной температуры. Скорость изменения температуры равна $0,167\text{ K/s}$. На основе полученных данных была определена температура фазового перехода из нематической в изотропную фазу $T_{N-IS} = 82,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

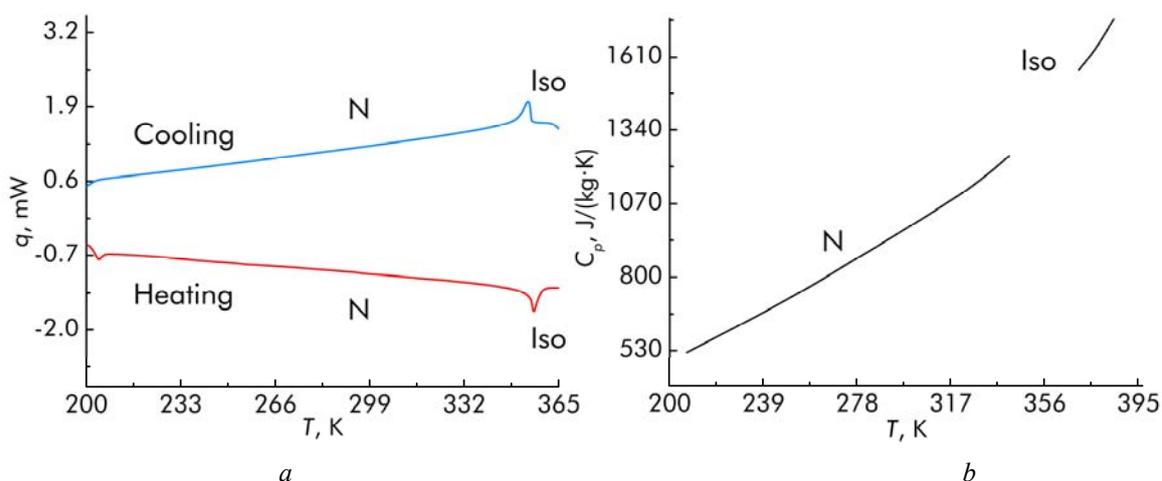


Рис. 2. Кривые плавления и охлаждения (a) и зависимость удельной теплоемкости от температуры (b) смеси ЖК-1630А

Fig. 2. Melting and cooling curves (a) and the dependence of specific heat capacity against temperature (b) mixture of Zhk-1630A

По данным рисунка 2, а была рассчитана удельная теплоемкость и построена температурная зависимость. Расчет удельной теплоемкости C_p (рис. 2, б) производился на основе классического определения:

$$C_p = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} = \frac{1}{m} \frac{\frac{dQ}{dt}}{\frac{dT}{dt}} = \frac{1}{m} \frac{q}{\frac{dT}{dt}}, \quad (1)$$

где Q – теплота, T – температура, m – масса образца, q – тепловой поток.

Измерения диэлектрических спектров проводились в широком диапазоне частот f ($10 \div 10^8$ Hz) и температур ($-10 \div 90$ °C). Максимальные приборные погрешности определения

$$\delta(\varepsilon')_m = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon'}{\varepsilon' \partial f} \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\varepsilon' \partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\varepsilon' \partial B} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\varepsilon' \partial \varphi} \Delta \varphi\right)^2},$$

$$\delta(\varepsilon'')_m = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon''}{\varepsilon'' \partial f} \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon''}{\varepsilon'' \partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon''}{\varepsilon'' \partial B} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon''}{\varepsilon'' \partial \varphi} \Delta \varphi\right)^2},$$

где Δf , ΔT , ΔB , $\Delta \varphi$ – абсолютные ошибки измерения частоты *тест*-сигнала, температуры образца, индукции магнитного поля и угла между направлением электрического поля и внешнего магнитного поля соответственно.

Полные относительные погрешности определения компонент диэлектрической проницаемости определяются следующими выражениями:

$$\delta \varepsilon' = \sqrt{(\delta(\varepsilon')_m)^2 + (\delta(\varepsilon')_d)^2} \approx 5 \%,$$

$$\delta \varepsilon'' = \sqrt{(\delta(\varepsilon'')_m)^2 + (\delta(\varepsilon'')_d)^2} \approx 3 \%.$$

На рисунке 3 представлена температурная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости, измеренной при различных частотах электрического поля. Продольная ε'_{\parallel} и поперечная ε'_{\perp} составляющие соответствуют параллельной и перпендикулярной ориентациям длинных осей молекул относительно направления электрического поля. Из рис. 3 следует, при понижении температуры в нематической мезофазе мы попадаем в область переходных частот, при которых анизотропия диэлектрической проницаемости меняет знак.

компонент диэлектрической проницаемости можно рассчитать следующим образом:

$$\delta(\varepsilon')_d = \frac{\Delta C + \Delta C_p}{C - C_p} + \delta C_0,$$

$$\delta(\varepsilon'')_d = \delta G + \delta f + \delta C_0,$$

где C_0 – емкость пустого конденсатора, C_p – паразитная емкость конденсатора, G – проводимость.

Помимо приборной погрешности существуют также погрешности, вызванные ошибками определения частоты *тест*-сигнала, температуры образца, индукции магнитного поля и угла между направлением электрического поля конденсатора и внешнего магнитного поля. Такого рода ошибки следует находить следующим образом [11]:

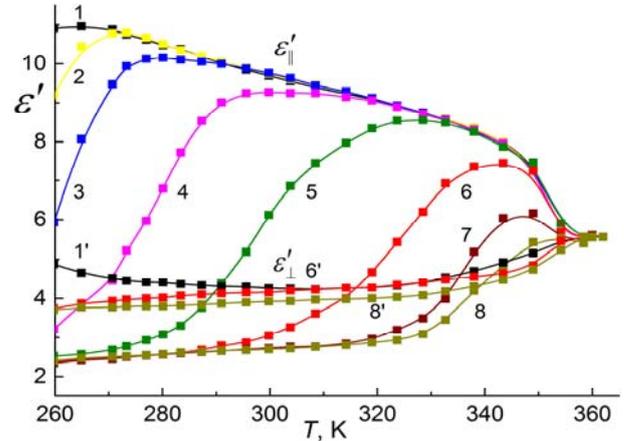


Рис. 3. Температурная зависимость действительных компонент продольной 1 – 20, 2 – $2 \cdot 10^4$, 3 – $7,5 \cdot 10^4$, 4 – $4 \cdot 10^5$, 5 – $2 \cdot 10^6$, 6 – 10^7 , 7 – $3 \cdot 10^7$, 8 – $4 \cdot 10^7$ (Hz) и поперечной 1' – 20, 6' – 10^7 , 8' – $4 \cdot 10^7$ (Hz) диэлектрической проницаемости при разных частотах электрического поля

Fig. 3. Temperature dependence of the real components of the longitudinal 1 – 20, 2 – $2 \cdot 10^4$, 3 – $7,5 \cdot 10^4$, 4 – $4 \cdot 10^5$, 5 – $2 \cdot 10^6$, 6 – 10^7 , 7 – $3 \cdot 10^7$, 8 – $4 \cdot 10^7$ (Hz) and transverse 1' – 20, 6' – 10^7 , 8' – $4 \cdot 10^7$ (Hz) dielectric constant at different frequencies of the electric field

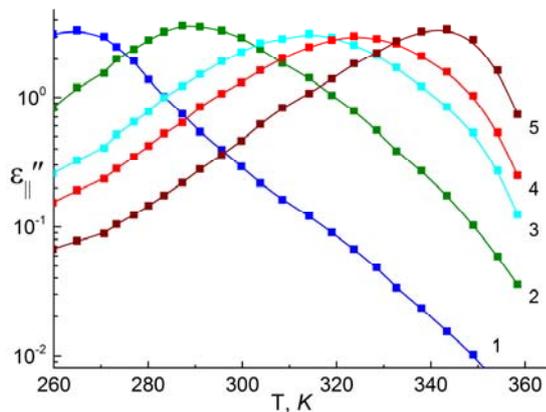


Рис. 4. Температурная зависимость мнимой компоненты продольной диэлектрической проницаемости при разных частотах электрического поля: 1 – $7,5 \cdot 10^4$, 2 – 10^6 , 3 – $5 \cdot 10^6$, 4 – 10^7 , 5 – $3 \cdot 10^7$ (Hz)

Fig. 4. Temperature dependence of the imaginary component of the longitudinal dielectric permittivity at different frequencies of the electric field: 1 – $7,5 \cdot 10^4$, 2 – 10^6 , 3 – $5 \cdot 10^6$, 4 – 10^7 , 5 – $3 \cdot 10^7$ (Hz)

Расчет мнимой части ϵ'' диэлектрической проницаемости производился из значений тангенса угла потерь и действительной части диэлектрической проницаемости на основании следующего выражения [12]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon'}, \quad (2)$$

где σ – удельная ионная проводимость, ϵ_0 – электрическая постоянная.

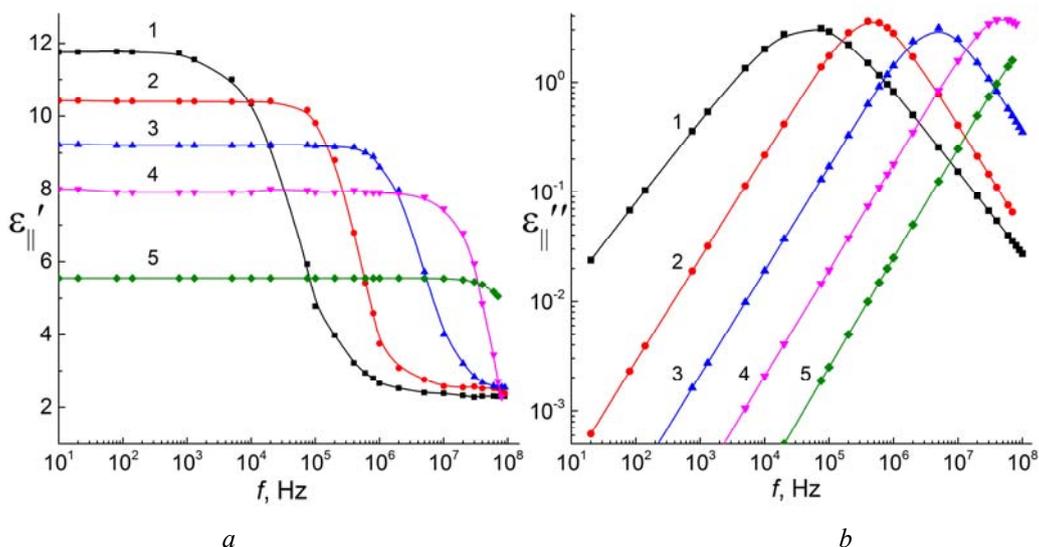


Рис. 5. Частотная зависимость действительной (a) и мнимой (b) частей диэлектрической проницаемости от температуры: 1 – 263 K, 2 – 283 K, 3 – 317 K, 4 – 346 K, 5 – 362 K при угле ориентации директора $\theta = 0^\circ$

Fig. 5. Frequency dependence of real (a) and imaginary (b) parts of dielectric permittivity on temperature: 1 – 263 K, 2 – 283 K, 3 – 317 K, 4 – 346 K, 5 – 362 K at director orientation angle $\theta = 0^\circ$

В области низких температур наблюдаются максимумы мнимой части диэлектрической проницаемости (рис. 4), которые характеризуют время релаксации, связанное с вращением вокруг короткой оси молекул ЖК. Заметим, что данный процесс не вносит существенного вклада при перпендикулярной ориентации директора относительно электрического поля (в том же температурном интервале дисперсия не наблюдается). Частотную дисперсию диэлектрической проницаемости, а также релаксационные процессы, обуславливающие ее, можно подробно описать известным уравнением Дебая [13] для $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ – комплекснозначной компоненты тензора диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\delta\epsilon}{1 + i\omega\tau}, \quad (3)$$

где $\delta\epsilon = \epsilon_S - \epsilon_\infty$ – диэлектрическая сила, ϵ_∞ – диэлектрическая проницаемость в области высоких частот, ϵ_S – диэлектрическая проницаемость в области низких частот (статическая диэлектрическая проницаемость), τ – время релаксации, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота электрического поля.

Используя методы численной оптимизации, можно найти такие значения неизвестных параметров ϵ_∞ , ϵ_S , τ , σ , при которых наблюдается минимум среднеквадратичного отклонения экспериментальных данных от полученных с помощью уравнения Дебая (3).

Из рисунка 5, *a* следует, что при повышении температуры диэлектрические спектры смещаются в сторону высоких частот. В области низких температур наблюдается дисперсия действительной части диэлектрической проницаемости. Из рис. 5, *b* можно установить, что максимум ϵ''_{\max} мнимой части диэлектрической проницаемости аналогично смещается в сторону высоких частот.

Угловая дисперсия действительной части диэлектрической проницаемости показана на рис. 6, *a*. Частота релаксации определяется по максимуму мнимой части диэлектрической проницаемости. Из рис. 6, *b* следует, что частота релаксации не зависит от ориентации директора. Отметим, что проведенные численные аппроксимации, согласно уравнению Дебая, дают хорошее совпадение с экспериментальными данными при всех углах ориентации.

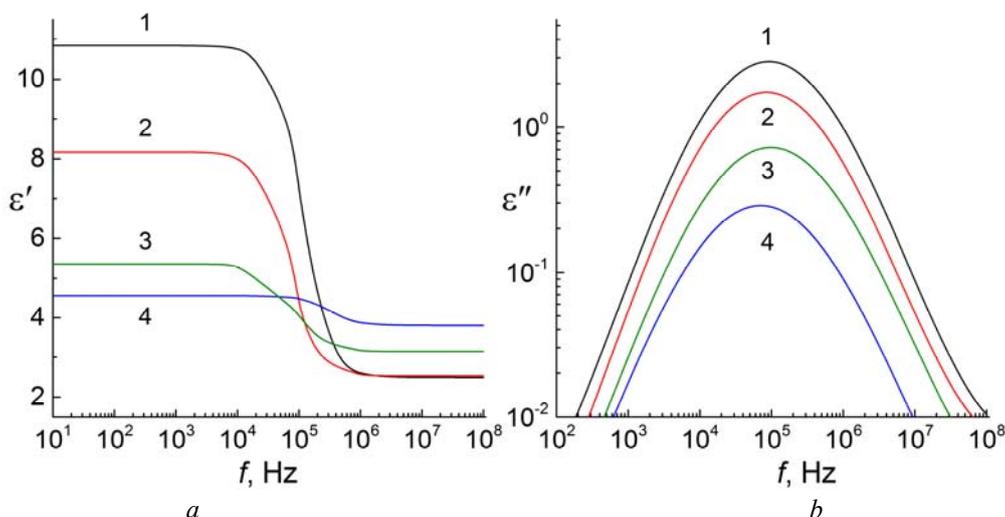


Рис. 6. Частотная зависимость действительной (*a*) и мнимой (*b*) частей диэлектрической проницаемости при ориентации директора: 1 – $\theta = 0^\circ$, 2 – $\theta = 30^\circ$, 3 – $\theta = 60^\circ$, 4 – $\theta = 90^\circ$ для температуры 268 К

Fig. 6. Frequency dependence is valid (*a*) and imaginary (*b*) parts of the dielectric constant when the orientation of the director 1 – $\theta = 0^\circ$, 2 – $\theta = 30^\circ$, 3 – $\theta = 60^\circ$, 4 – $\theta = 90^\circ$ for temperature 268 K

Результаты и их обсуждение

На рисунке 7 представлены диаграммы Коул – Коула при различных значениях температуры и углов ориентации директора исследуемой смеси. Очевидна сильная угловая дисперсия в области как низких, так и высоких температур, что показывает влияние вращения молекул как вдоль продольной, так и поперечной осей молекул.

Из полученных данных построены температурные зависимости времени релаксации, связанного с вращением вокруг короткой оси молекул ЖК (рис. 8, *a*). Значение энергии активации, определенное по углу наклона логарифмической прямой $\ln[\tau(1/T)]$ (рис. 8, *b*), равно $E_{\parallel} = (57 \pm 5) \cdot 10^3$ J/mol. Энергия активации данного релаксационного процесса в мезофазе является постоянной во всем

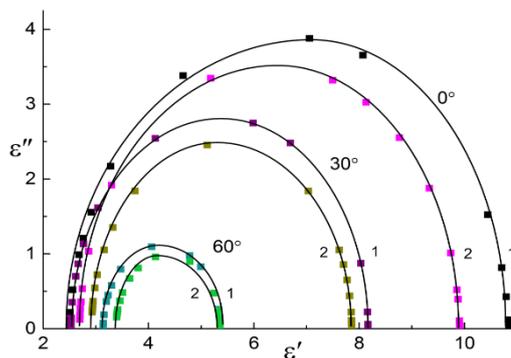


Рис. 7. Диаграмма Коул–Коула для разных значений температуры: 1 – 268 К, 2 – 317 К и углов ориентации директора смеси ЖК-1630А

Fig. 7. Cole–Cole diagram for different temperature values of: 1 – 268 K; 2 – 317 K and orientation angles of the ZhK-1630A compound director

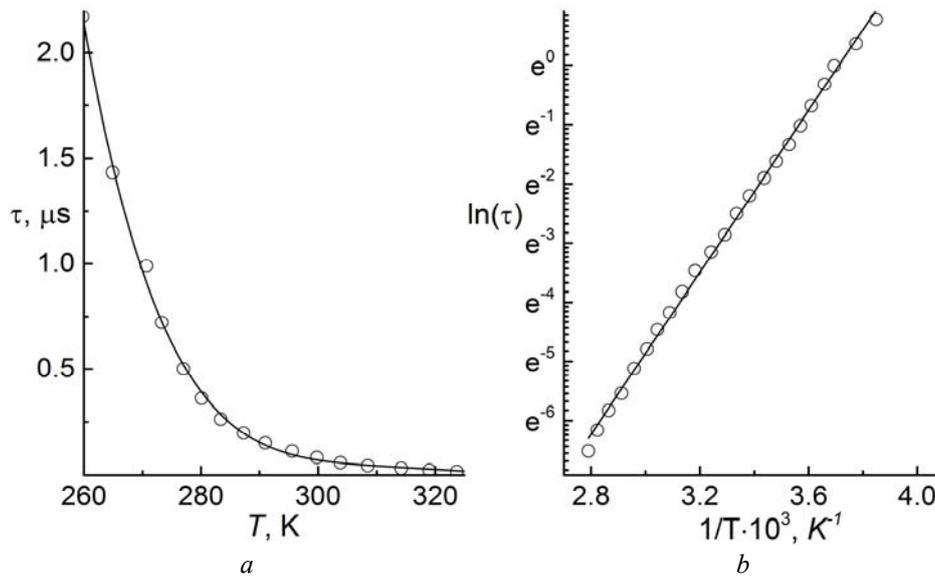


Рис. 8. Температурная зависимость времени релаксации $\tau(T)$ (a) и $\ln[\tau(1/T)]$ (b)

Fig. 8. Temperature dependence of the relaxation time $\tau(T)$ (a) and $\ln[\tau(1/T)]$ (b)

исследуемом температурном интервале мезофазы, что соответствует данным для других НЖК-смесей [14–17]. Существует несколько подходов для расчета коэффициента молекулярного трения ζ . Приведем некоторые выражения для расчета коэффициента молекулярного трения, полученные разными методами [17–20]:

$$\zeta = 2kT\tau_D, \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\gamma_1}{3nf_1(S)} = \frac{\gamma_1 \left[q + (2+S)S^2 \left(1 + \frac{bq}{6} \right) + 6S^2 - 1.5bS^4 \right]}{3nS^2 \left(1 + \frac{bq}{6} \right)}, \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{2(1+2\gamma)}{9\gamma} (1+p) \left[1 - \frac{5}{p^2+6} \right] d^4 \sqrt{\pi k T m} n \exp \frac{E}{kT}, \quad (6)$$

$$\zeta = 8\pi\gamma_1 L^3 f(p) \approx \frac{16\pi\gamma_1 L^3}{6 \ln \left[1 + \sqrt{p^2 - 1} \right] - 3}, \quad (7)$$

где τ_D – характерное время релаксации молекул, k – постоянная Больцмана, T – температура системы молекул, γ_1 – коэффициент вращательной вязкости, S – параметр порядка, $p = L/d$ – параметр отношения длин длинной и короткой осей молекулы,

n – концентрация молекул, m – молекулярная масса, E – потенциальный барьер, который требуется преодолеть при переориентации кластера молекул по теории Майера – Заупе.

Зависимость функции $f_1(S)$ от параметра порядка S несколько слабее первой степени, причем в исследуемом температурном интервале можно принять $f_1(S) \sim 0,21$. Параметры γ и p зависят от формы молекул и их взаимного расположения. Величина $(1+2\gamma)/\gamma$ практически не зависит от p и S и для оценки коэффициента молекулярного трения можно брать значение $(1+2\gamma)/\gamma = 3,25$ [19]. Среднее значение параметра p для исследуемой смеси следует взять равным 4, $d \sim 0,4$ нм, а $n \sim 3,76 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$. Однако коэффициент молекулярного трения, в свою очередь, также связан с вращательной диффузией D соотношением [21]

$$\zeta = \frac{kT}{D}. \quad (8)$$

С использованием выражений (4)–(8) рассчитаны значения коэффициентов молекулярного трения и соответствующие им значения вращательной диффузии при температуре $T = 299$ К. Полученные данные представлены в таблице.

Таблица. Сравнение коэффициентов молекулярного трения и вращательной диффузии, полученные с помощью [17–20] для $T = 299$ КTable. Comparison of both molecular friction and rotational diffusion coefficients obtained by using data of [17–20] at $T = 299$ K

1	2	3	4	5
Показатель	Значения, полученные из работ			
	[17] согласно формулам (4) и (8)	[18] согласно формулам (5) и (8)	[19] согласно формулам (6) и (8)	[20] согласно формулам (7) и (8)
$\zeta \cdot 10^{27}, \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	0,68	0,12	0,00048	2,34
$D \cdot 10^{-6}, \text{s}^{-1}$	6,09	34,27	6080	1,74

Значения коэффициентов молекулярного трения, определенные по диэлектрической релаксации и по вращательной вязкости с использованием функции Перрена, имеют одинаковый порядок величины $10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$. Примерно на порядок меньше значения ζ , определенные по вращательной вязкости согласно формуле (5), приведенной в [21].

Для вращательной диффузии D рассчитанные по разным формулам значения находятся в диапазоне $2 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1} - 6 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$. Для веществ, исследованных в [21], величина D при комнатной температуре находится в диапазоне $8 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1} - 7 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$.

Оценка количества молекул в кластере согласно [21] дает значение 5–7, что согласуется и с данными рентгенографии.

$$\frac{\zeta^{\gamma}}{\zeta_{mol}} = \frac{(d_{\perp}^4)^{cl}}{(d_{\perp}^4)^{mol}} \approx 17. \quad (9)$$

Оценка отношений коэффициентов молекулярного трения в столбцах 3 и 4 таблицы по процедуре, описанной в [21], дает количество молекул в кластере смеси ЖК-1630А равное 17.

Выводы

С помощью диэлектрической спектроскопии в работе подробно исследован релаксационный процесс вращения молекул ЖК вокруг их короткой оси смеси ЖК-1630А. Показано, что данный процесс не вносит вклада при перпендикулярной ориентации молекул ЖК относительно электрического поля. Исследования показали, что внутримолекулярные движения в ЖК оказывают влияние на дисперсию диэлектрической проницаемости, которая в рамках исследуемого частотного диапазона определяется преимущественно враще-

нием молекул вокруг короткой оси. Установлено, что в ЖК-1630А при понижении температуры происходит изменение знака диэлектрической анизотропии с положительного на отрицательный, а причиной изменения знака анизотропии являются диполь–дипольные корреляции молекул.

Рассчитано значение времени релаксации и определена величина энергии активации нематической фазы. Значение энергии активации является постоянной в пределах исследуемого диапазона, что хорошо согласуется с другими нематическими жидкокристаллическими смесями. Установлено количественное соответствие экспериментальных данных и результатов численных расчетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 18-07-00727А, № 17-47-500757р_а и гранта Президента Российской Федерации МК-3120.2018.9.

Список литературы / References

- Jadzyn J., Czerkas S., Czechowski G., Burczyk A. On the molecular interpretation of the static dielectric properties of nematic liquid crystals. *Liquid Crystals*, 1999, **26** (3), 437–442. DOI: 10.1080/026782999205218.
- Zaki Ewiss M. A., Nabil G., Stoll B., Herminghaus S. Molecular dynamics and alignment studies of silica-filled 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB) liquid crystal. *Liquid Crystals*, 2003, **30** (10), 1241–1250. DOI: 10.1080/02678290310001602003.
- Harding S. E. The intrinsic viscosity of biological macromolecules. Progress in measurement, interpretation and application to structure in dilute solution. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 1997, **68** (2–3), 207–262. DOI: 10.1016/S0079-6107(97)00027-8.

4. Dabrowski R., Celinski M., Chojnowska O., Kula P., Dziaduszek J., Urban S. Compounds with low relaxation frequency and dual frequency mixtures useful for active matrix addressing. *Liquid Crystals*, 2013, **40** (10), 1339–1353. DOI: 10.1080/02678292.2013.813085.
5. Mrukiewicz M., Perkowski P., Garbat K. Dielectric behaviour of binary dual-frequency nematics with low crossover frequencies. *Liquid Crystals*, 2015, **42** (7), 1036–1042. DOI: 10.1080/02678292.2015.1020893.
6. Коншина Е. А., Федоров М. А., Рыбникова А. Е., Амосова Л. П., Иванова Н. Л., Исаев М. В., Костомаров Д. С. Динамика твист-эффекта в двухчастотном нематическом жидком кристалле // *Журнал технической физики*. 2009. Т. 79, № 4. С. 111–116. [Konshina E.A., Fedorov M.A., Rybnikova A.E., Amosova L.P., Ivanov N.L., Isaev M.V., Kostomarov D. S. Dynamics of twist effect in a two-frequency nematic liquid crystal. *Journal of technical physics*, 2009, **79** (4), 111–116 (in Russ.)].
7. Czub J., Urban S., Geppi M., Marini A., Dabrowski R. Dielectric properties of threering fluorinated compounds. *Liquid Crystals*, 2008, **35** (5), 527–531. DOI: 10.1080/02678290801989983.
8. Chausov D.N., Kurilov A.D., Belyaev V.V., Kumar S. Parameters of LC molecules' movement measured by dielectric spectroscopy in wide temperature range. *Opto-Electronics Review*, 2018, **26** (1), 44–49. DOI: 10.1016/j.opelre.2017.12.001.
9. Чаусов Д. Н., Курилов А. Д., Константинов М. С., Беляев В. В., Богданов Д. Л. Анизотропия диэлектрической проницаемости смеси ЖК-1282 // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 2. С. 35–43. [Chausov D.N., Kurilov A.D., Konstantinov M.S., Belyaev V.V., Bogdanov D.L. Anisotropy of the dielectric permittivity of the mixture ZhK-1282. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (2), 35–43. (in Russ.)].
10. Гребенкин М. Ф., Иващенко А. В. Жидкокристаллические материалы. М. : Химия, 1989. 288 с. [Greibenkin M.F., Ivaschenko A.V. Liquid crystalline materials. M. : Chemistry, 1989, 288 p. (in Russ.)].
11. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л. : Энергоатомиздат, 1991. 304 с. [Novitsky P.V., Zograf I.A. Estimation of errors of measurement results. L. : Energoatomizdat, 1991, 304 p. (in Russ.)].
12. Fano W.G., Trainotti V. Dielectric Properties of Soils. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Ontario, Canada, 2001. Abstract book. P. 75–78.
13. Debye P. The Chemical Catalog Company. Inc., New York, 1929. Section 18. P. 89–95.
14. Mrukiewicz M., Perkowski P., Garbat K. Dielectric properties of compounds creating dual-frequency nematic liquid crystals. *Acta Phys Pol A.*, 2013, **124**, 940–945. DOI: 10.12693/APhysPolA.124.940.
15. Perkowski P., Mrukiewicz M., Laska M., Garbat K., Piecek W., Dabrowski R. Dielectric behavior of dual-frequency nematic at extra low temperatures. *Phase Transitions: A Multinational Journal*, 2013, **86** (2–3), 113–122. DOI: 10.1080/01411594.2012.715302.
16. Urban S., Kula P., Spadlo A., Geppi M., Marini A. Dielectric properties of selected laterally fluoro-substituted 4,4"-dialkyl, dialkoxy and alkyl-alkoxy [1:1';4':1"] terphenyls. *Liquid Crystals*, 2010, **37** (10), 1321–1330. DOI: 10.1080/02678292.2010.505665.
17. Ratna B.R., Shashidhar R. Dielectric Properties of Some Nematics of Positive Dielectric Anisotropy. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1978, **45** (1–2), 185–192. DOI: 10.1080/00268947808084996.
18. Немцов В. Б. Молекулярно-статистические вычисления коэффициентов вязкости НЖК // *Теоретическая и прикладная механика* 1985. Т. 12. С. 111–114. [Nemtsov V.B. Molecular statistical calculations of the viscosity coefficients of NLC. *Theoretical and applied mechanics*, 1985, **12**, 111–114. (in Russ.)].
19. Беляев В. В., Немцов В. Б. Молекулярное трение и вращательная вязкость нематических жидких кристаллов // *Журнал физической химии*. 1992. Т. 66, № 10. С. 2763–2772. [Belyaev V.V., Nemtsov V.B. Molecular friction and rotational viscosity of nematic liquid crystals. *Journal of physical chemistry*, 1992, **66** (10), 2763–2772. (in Russ.)].
20. Bata L., Buka A., Molnar G. Rotary Motion of Molecules about their Short Axis by Dielectric and Splay Viscosity Measurements. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1977, **38** (1), 155–162. DOI: 10.1080/15421407708084382.
21. Belyaev V.V. Viscosity of nematic liquid crystals. Cambridge: International Science Press, 2010, 236 p.

Поступила в редакцию 21.05.2018 г.
Received 21 May 2018