

## УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ УСТРОЙСТВ С ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Андрей Игоревич Ефремов

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Импульсным методом фиксированного расстояния исследовано влияние температуры на коэффициент вращательной вязкости и время ориентационной релаксации жидких кристаллов на частоте  $3,0$  МГц. Исследования выполнены во вращающемся магнитном поле. Индукция ориентирующего магнитного поля  $0,12 \pm 0,29$  Тл превышает значение насыщения. Применение конического магнитного поля позволяет расширить диапазон угловых скоростей вращения магнитного поля, в котором реализуется синхронный режим движения директора и вектора магнитной индукции. Это повышает точность определения времени ориентационной релаксации и коэффициента вращательной вязкости. Исследован индикаторный жидкий кристалл ЖК-440 с температурой фазового перехода в изотропную фазу, равной  $345,7$  К. В рамках гидродинамической теории получено уравнение движения директора в нематической фазе. Установлено, что повышение температуры сопровождается уменьшением коэффициента вращательной вязкости. Характер температурной зависимости коэффициента вращательной вязкости описывается законом Аррениуса с энергией активации, не зависящей от температуры, равной  $31,9$  кДж/моль. Температурная зависимость коэффициента вращательной вязкости интерпретируется в рамках теории свободного объёма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультразвук, вращательная вязкость, коническое магнитное поле, гидродинамика.

## ULTRASONIC INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE OPERATION SPEED OF DEVICES WITH A LIQUID CRYSTAL WORKING BODY

Andrey I. Efremov

Voronezh State Agrarian University after Emperor Peter the Great

The author used the pulse method of fixed space to study the influence of temperature on the rotational viscosity coefficient and the time of orientational relaxation of liquid crystals at the frequency of  $3.0$  MHz. The research was performed in the rotating magnetic field. The density of the aligning magnetic field of  $0.12 \pm 0.29$  T exceeds the saturation value. The application of a conic magnetic field allows expanding the range of rates of angular rotation of the magnetic field, in which the synchronous motion of the director and vector of magnetic induction is realized. This increases the precision of determining the time of orientational relaxation and rotational viscosity coefficient. The authors have studied the LC-440 liquid crystal indicator with the temperature of transition to the isotropic phase equal to  $345.7$  K. Within the framework of the hydrodynamic theory the authors have obtained the equation of motion of the director in the nematic phase. It was determined that an increase in temperature is associated with a decrease in the rotational viscosity coefficient. The character of temperature dependence of the rotational viscosity coefficient is described by the Arrhenius law with the energy of activation being independent from temperature and equal to  $31.9$  kJ/mol. The temperature dependence of the rotational viscosity coefficient is explained within the framework of the free volume theory.

KEY WORDS: ultrasound, rotational viscosity, conic magnetic field, hydrodynamics.

### Введение

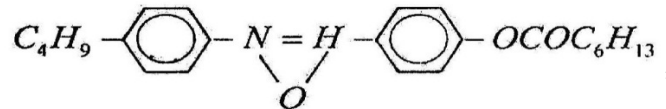
Высокая чувствительность нематических жидких кристаллов (НЖК) к воздействию электрических и магнитных полей, а также низкие значения напряжений, необходимых для изменения их ориентационной структуры, обуславливают перспективность использования жидкокристаллических устройств [10]. Возможность применения жидких кристаллов (ЖК) в качестве рабочего тела электрооптических матриц устройств отображения информации, элементов памяти, различного рода датчиков, плавно регулируемых линий задержки высокочастотных сигналов и других технических устройств вызывает необходимость их комплексного исследования. Одним из основных параметров пе-

речисленных устройств является их быстродействие, связанное с временем ориентационной релаксации  $\tau_0$ , которое определяется продолжительностью изменения ориентации длинных осей молекул ЖК под действием внешних полей. Перспективным представляется применение акустического метода определения времени ориентационной релаксации [6], поскольку наряду с возможностью проведения исследований в больших объемах НЖК этот метод позволяет получать полезную информацию о молекулярно-кинетических параметрах образца, являющихся функцией термодинамических параметров состояния.

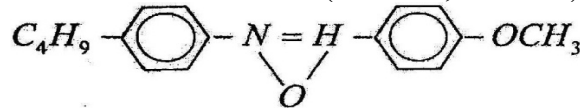
Таким образом, целью данной работы является ультразвуковое исследование влияния температуры на кинетику ориентационных процессов в НЖК в меняющихся магнитных полях.

**Методика эксперимента**

Исследован индикаторный жидкий кристалл ЖК-440, представляющий собой смесь, содержащую 1 часть п-н-бутил-п-гептаноилоксиазоксибензола (БГОАБ, ЖК-439)



и 2 части п-н-бутил-п-метоксиазоксибензола (БМОАБ, ЖК-434)



Выбор в качестве объекта исследований смеси ЖК-440 обусловлен её широким температурным интервалом нематической фазы с температурой фазового перехода НЖК – изотропная жидкость (ИЖ)  $T_C = 345,7 K$ , превышающей комнатную температуру. Измерения выполнены импульсным методом фиксированного расстояния на частоте ультразвука  $f = 3,0 МГц$  [6]. Образец ориентировался магнитным полем индукцией  $0,12 \pm 0,29 Тл$ , превышающей значение насыщения. Это обеспечивало однородную ориентацию образца. Измерение времени ориентационной релаксации и вращательной вязкости  $\gamma_1$ , связанной со временем ориентационной релаксации соотношением [11]

$$\frac{2 \cdot \pi}{\tau_0} = \frac{\Delta\chi \cdot H^2}{2 \cdot \gamma_1}, \tag{1}$$

где  $H$  – напряжённость магнитного поля;

$\Delta\chi = \chi^{\parallel} - \chi^{\perp}$  – анизотропия магнитной восприимчивости НЖК,

$\chi^{\parallel}$  и  $\chi^{\perp}$  – магнитная восприимчивость НЖК соответственно в направлении директора и перпендикулярно директору.

Для измерения коэффициента вращательной вязкости и времени ориентационной релаксации образец помещался во вращающееся магнитное поле, вектор результирующей индукции которого составлял с осью вращения угол  $\beta$ . При  $\beta = 90^\circ$  магнитное поле является круговым. При  $\beta < 90^\circ$  вектор индукции движется по конической поверхности, и меняющееся магнитное поле будем называть коническим. Коническое магнитное поле получено благодаря использованию полюсных наконечников совместно с постоянным магнитом [5]. Применение конического магнитного поля позволило расширить диапазон угловых скоростей  $\omega_H$  вращения постоянного магнита, в котором реализован синхронный режим движения директора и вектора индукции.

В синхронном режиме фазовая характеристика коэффициента поглощения  $\Delta\alpha(\omega_H t)$  ультразвука представляет собой синусоиду (рис. 1), анализ которой позволяет определить фазовый сдвиг  $\varphi$  между директором НЖК и вектором магнитной индукции [3, 9]. Здесь  $\Delta\alpha = \alpha^{\parallel} - \alpha^{\perp}$  – анизотропия коэффициента поглощения ультразвука,  $\alpha^{\parallel}$  и  $\alpha^{\perp}$  – коэффициент поглощения ультразвука в направлении, соответственно параллельном и перпендикулярном директору НЖК.

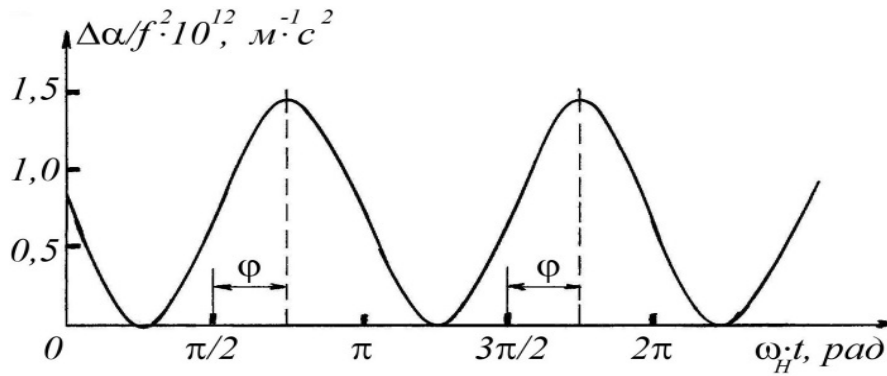


Рис. 1. Зависимость  $\Delta\alpha/f^2$  от  $\omega_H \cdot t$  при  $f = 3,0$  МГц;  $T = 335,0$  К;  $\omega_H = 0,12$  рад/с;  $\beta = 90^\circ$ ,  $B = 0,29$  Тл

Время ориентационной релаксации связано с фазовым сдвигом уравнением [8]

$$\tau_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin 2\varphi}{\omega_H} \quad (2)$$

Относительная погрешность определения времени ориентационной релаксации и коэффициента вращательной вязкости не превышает 3%.

### Результаты и обсуждение

Анализ уравнений гидродинамики (1) и (2) НЖК приводит к выводу о линейном характере зависимости  $\sin 2\varphi$  от угловой скорости вращения магнитного поля. Данный вывод подтверждён экспериментально (рис. 2).

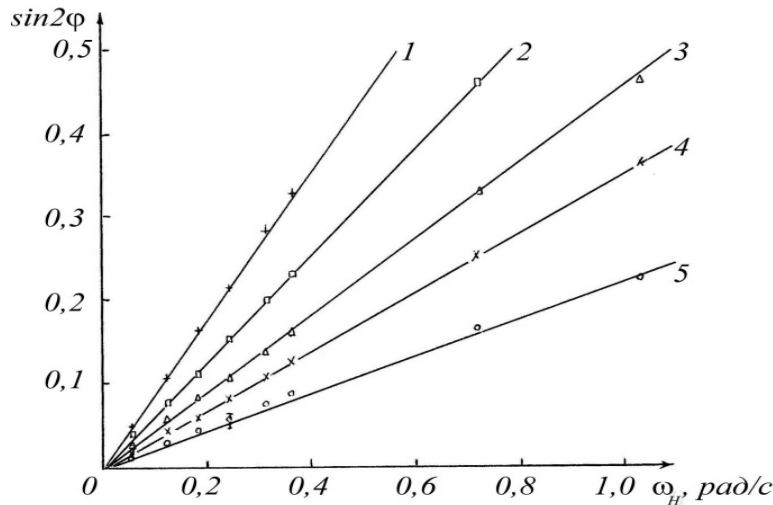


Рис. 2. Зависимость  $\sin 2\varphi$  от  $\omega_H$  при  $T = 322,7$  К,  $\beta = 30^\circ$  в магнитном поле индукцией: 1 – 0,15 Тл; 2 – 0,18 Тл; 3 – 0,21 Тл; 4 – 0,24 Тл; 5 – 0,29 Тл

Подстановка решения уравнения движения директора НЖК в синхронном режиме в уравнение угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука [4, 7]

$$\frac{\alpha}{f^2} = d + a - \cos^2 \theta + b \cdot \cos^4 \theta, \quad (3)$$

позволяет получить уравнение временной зависимости коэффициента поглощения ультразвука [5]

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

Здесь  $\theta$  – угол между волновым вектором и директором,  $u = \operatorname{tg} \varphi$ ,  $a$ ,  $b$  и  $d$  – параметры угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука, являющиеся функциями коэффициентов объёмной и сдвиговой вязкости  $\alpha_i$  (коэффициентов Лесли [12]) НЖК.

Таким образом, анализ влияния температуры на угловую зависимость коэффициента поглощения ультразвука позволил установить характер температурной зависимости коэффициентов Лесли. Подстановка уравнений температурной зависимости диссипативных коэффициентов Лесли  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , полученных разложением тензора вязких напряжений по параметру порядка, который предполагается малым, с учётом слагаемых до второй степени параметра порядка включительно, в формулу  $\gamma_1 = \alpha_3 - \alpha_2$  позволяет установить характер зависимости коэффициента вязкости от параметра ориентационной упорядоченности  $S$  [1]

$$\gamma_1 = \frac{\alpha \cdot p \cdot S^2}{\frac{1}{3} \cdot (S + 2) - 2 \cdot S^*} \quad (5)$$

Здесь  $S^* = 2/15 + 2 \cdot S/21$ . Однако коэффициент вращательной вязкости проявляет большую зависимость от температуры, чем это предсказывает уравнение (5) (рис. 3).

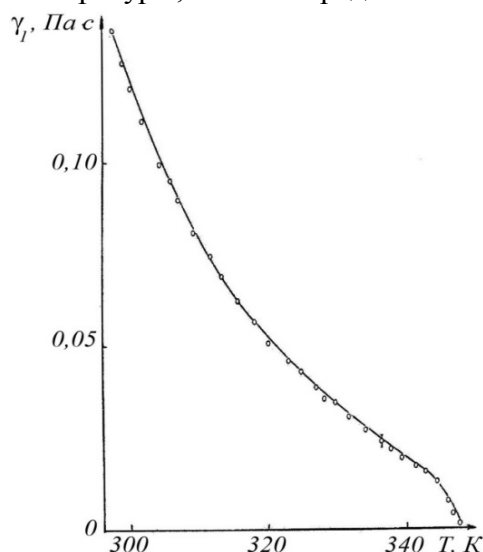


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента вращательной вязкости

Полученная экспериментально температурная зависимость коэффициента вращательной вязкости не согласуется с предположением о том, что влияние температуры на коэффициент  $\gamma_1$  обусловлена зависимостью от температуры параметра порядка.

Для объяснения температурной зависимости вращательной вязкости необходимо учитывать, что ориентационное движение молекул или молекулярных комплексов вокруг короткой оси связано с необходимостью преодоления потенциального барьера

$$E = D(\theta)_{max} - D(\theta)_{min} = \frac{3}{2} \cdot \frac{A}{m - V_N^2} = \varepsilon \cdot S, \quad (6)$$

где  $D(\theta)$  – потенциал среднего поля теории Майера - Заупе [5, 7];

$V_N$  – объём молекулы или молекулярного комплекса;

$m$  – координационное число;

$\theta$  – угол между длинной осью и директором;

$A$  – молекулярный параметр, связанный с анизотропией поляризуемости молекулы.

Применение теории свободного объёма приводит к выводу о том, что температурная зависимость коэффициента вращательной вязкости НЖК имеет экспоненциальный характер [2], за исключением области фазового перехода НЖК – ИЖ (рис. 3)

$$\gamma_1(T) = c \cdot S^2 \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon \cdot S}{k \cdot T}\right) \quad (7)$$

Здесь  $k$  – постоянная Больцмана. Сплошная линия на рис. 3, полученная на основании уравнения (7), в пределах погрешности эксперимента согласуется с экспериментальными результатами (точками на рис. 3). Таким образом, температурная зависимость коэффициента вращательной вязкости обусловлена зависимостью от температуры пара-

метра порядка и имеет экспоненциальный характер с энергией активации, равной  $31,9 \text{ кДж/моль}$ , не зависящей от температуры.

### Заключение

Ультразвуковые исследования динамики ориентационных процессов в НЖК во вращающемся магнитном поле являются эффективным методом изучения температурной зависимости коэффициента вращательной вязкости. Применение конического магнитного поля позволяет расширить диапазон угловых скоростей вращения магнитного поля, в котором реализуется синхронный режим, что позволяет существенно увеличить массив данных, необходимых для расчёта коэффициента вращательной вязкости и времени ориентационной релаксации. Повышение температуры сопровождается уменьшением времени ориентационной релаксации в соответствии с законом Аррениуса с энергией активации в ЖК-440, равной  $31,9 \text{ кДж/моль}$ , не зависящей от температуры. Характер температурной зависимости коэффициента вращательной вязкости и времени ориентационной релаксации интерпретируется в рамках теории свободного объёма.

### Библиографический список

1. Богданов Д.Л. Релаксационные свойства жидкокристаллических растворов п-алкоксибензиден-п-н-бутиланилинов в статическом магнитном поле / Д.Л. Богданов, А.С. Лагунов, А.Н. Ларионов // Журнал физической химии. – 1988. – Т. LXII, № 3. – С. 726-734.
2. Вязкость нематических жидких кристаллов / А.Н. Ларионов [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика, математика. – 2001. – Вып. 1. – С. 46-50.
3. Диэлектрическая релаксация и вязкоупругие свойства нематических жидких кристаллов / А.Н. Ларионов, Д.Л. Богданов, Н.Н. Ларионова, А.И. Ефремов, К.А. Тощенко // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2015. – Т. 17, № 3. – С. 364-370.
4. Ефремов А.И. Ультразвуковые исследования динамики ориентационных процессов в нематических жидких кристаллах в коническом магнитном поле / А.И. Ефремов // Наука и образование в XXI веке : сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, январь 2016 г. – Тамбов : Изд-во «ТРОО Бизнес-Наука-Общество», 2016. – С. 45-46.
5. Исследование динамики ориентационных процессов в нематических жидких кристаллах в периодически меняющихся магнитных полях / А.Н. Ларионов, Э.В. Геворкян, Н.Н. Ларионова, А.И. Ефремов, В.Е. Копьтин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика, математика. – 2015. – № 3. – С. 27-38.
6. Лагунов А.С. Влияние давления на акустические свойства жидких кристаллов в ротационных магнитных полях / А.С. Лагунов, А.Н. Ларионов // Акустический журнал. – 1984. – Т. XXX, вып. 3. – С. 344-351.
7. Лагунов А.С. Ориентационная релаксация в растворе нематических жидких кристаллов / А.С. Лагунов, А.Н. Ларионов // Журнал физической химии. – 1986. – Т. LX, № 9. – С. 2206-2211.
8. Ларионов А.Н. Влияние  $P$ ,  $V$ ,  $T$  – термодинамических параметров состояния на динамику ориентационных процессов в нематических жидких кристаллах / А.Н. Ларионов, Н.Н. Ларионова, А.И. Ефремов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 22-28.
9. Ларионов А.Н. Вращательная вязкость нематической фазы в области фазового перехода нематический – смектический – А жидкий кристалл / А.Н. Ларионов, А.И. Ефремов, Н.В. Балабаев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика, математика. – 2014. – № 3. – С. 29-40.
10. Ларионов А.Н. Жидкие кристаллы и их применение : монография / А.Н. Ларионов. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – 160 с.
11. Etude acoustique de cristaux liquides sous champ magnetique pour differentes temperatures et pressions / A.N. Larionov [et al.] // Journal de Physique (Fr). – 1984. – Vol. 45, No 3. – P. 441-449.
12. Leslie F.M. Viscosimetry of nematic liquid crystals / F.M. Leslie // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1981. – Vol. 63. - P.111-128.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

#### Принадлежность к организации

Андрей Игоревич Ефремов – аспирант кафедры математики и физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-72-33, E-mail: faeton912009@rambler.ru.

Дата поступления в редакцию 16.01.2017

Дата принятия к печати 26.02.2017

### AUTHOR CREDENTIALS

#### Affiliations

Andrey I. Efremov – Post-graduate Student, the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 253-72-33, E-mail: faeton912009@rambler.ru.

Date of receipt 16.01.2017

Date of admittance 26.02.2017