

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

А. Н. Ларионов, В. В. Чернышёв, Н. Н. Ларионова

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 13.03.2009 г.

Аннотация. Показана перспективность акустического метода определения анизотропных диссипативных коэффициентов нематических жидких кристаллов при воздействии гидростатического давления. Выполнен анализ особенностей температурной зависимости коэффициентов объёмной и сдвиговой вязкости нематических жидких кристаллов, частотной зависимости коэффициентов объёмной вязкости.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, гидродинамика, директор, объёмная вязкость, сдвиговая вязкость, частота ультразвука, коэффициент поглощения ультразвука, время релаксации.

Abstract. The perspective of the acoustic spectroscopy method for determination of the viscosity coefficients of nematic liquid crystals is shown. The analysis of temperature, pressure and frequency dependence of the viscosity coefficients has been carried out.

Keywords: nematic liquid crystal, hydrodynamic, director, bulk viscosity, shear viscosity, frequency of ultrasound, attenuation of ultrasound, the time of relaxation.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем физики жидкокристаллического состояния вещества является построение временной шкалы молекулярно-кинетических процессов, присущих мезофазе, а также установление связей между кинетическими коэффициентами континуальных феноменологических теорий и параметрами, характеризующими межмолекулярное взаимодействие и особенности теплового движения в жидких кристаллах. Относительная сложность микроскопической теории жидких кристаллов явилась одной из причин широкого распространения макроскопических континуальных теорий мезофазы. Гидродинамическое описание наряду с медленным по сравнению с молекулярным масштабом пространственным изменением переменных, как и континуальные теории упругости, предполагает также относительно медленное изменение их во времени [1]. Универсальность макроскопического подхода позволила в ряде случаев использовать аналогию с системами, хорошо изученными теоретически. Существует несколько подходов к описанию динамических свойств одноосных нематических жидких кристаллов (НЖК). В ряде случаев при

гидродинамических расчетах используется вариант теории, разработанный Лесли [2] и Эриксоном [3], в которой предполагается, что динамические свойства НЖК могут быть описаны полем скоростей $\vec{v}(\vec{r})$, характеризующим течение жидкости и единичным вектором (директором \vec{n}), описывающим локальную ориентацию молекул.

Учитывая, что уравнения динамики НЖК в длинноволновом пределе должны быть получены на основе строгих гидродинамических и термодинамических выводов, а предложенные теорией Лесли—Эриксона уравнения для директора не являются строгими, Форстер с соавторами [4, 5] использовали для характеристики НЖК тензорный параметр порядка и выразили диссипативную часть тензора напряжений в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^{(D)} = & -2v_2 A_{ij} - 2(v_3 - v_2) \times \\ & \times [A_{ik} n_k n_j + A_{jk} n_i n_k] - (v_4 - v_2) \times \\ & \times \delta_{ij} A_{kk} - 2(v_1 + v_2 - 2v_3) n_i n_j n_k n_\ell - \\ & - (v_5 + v_4 - v_2) (\delta_{ij} n_k n_j A_{k\ell} + n_i n_j A_{kk}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь v_1 и v_2 — коэффициенты сдвиговой вязкости НЖК, v_4 и v_5 — коэффициенты объёмной вязкости, v_3 — комбинация коэффициентов объёмной и сдвиговой вязкости НЖК, являющиеся функциями термодинамических пара-

метров состояния, $A_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ — тензор скоростей деформации. Данная работа посвящена изучению влияния термодинамических параметров состояния на анизотропные диссипативные коэффициенты НЖК. Поскольку определение коэффициентов вязкости НЖК при воздействии гидростатического давления методами традиционной вискозиметрии связано с существенными трудностями, а в ряде случаев невозможно, перспективным представляется применение методов акустической вискозиметрии [6, 7] для исследования влияния термодинамических параметров состояния на диссипативные коэффициенты НЖК.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МАТЕРИАЛЫ

Коэффициент поглощения ультразвука измеряют, главным образом, импульсно-фазовыми методами фиксированного и переменного расстояния [8]. Используемый в настоящей работе метод фиксированного расстояния измерения акустических параметров [6] позволяет избежать изменения доменной структуры изучаемого вещества, а использование двухканальной измерительной камеры [7] даёт возможность одновременно определять плотность вещества, а также скорость и коэффициент поглощения ультразвука при высоких давлениях. Относительная погрешность измерения величины α / f^2 (α — коэффициент поглощения ультразвука частотой f) не превышает 2 %.

В качестве объектов исследования использовано соединение п-н-метоксибензилиден-п-бутиланилин (МБА), наиболее детально изученное другими методами, а также смеси нематических жидких кристаллов:

1) эвтектическая смесь, содержащая 2 части МБА и 1 часть п-н-этоксibenзилиден-п-бутиланилина (ЖК-404),

2) смесь ЖК-440, содержащая:

1 часть п-н-бутил-п-гептаноилоксиазоксибензола (БГОАБ, ЖК-439),

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

3) смесь (Н-96), содержащая следующие компоненты:

а) п-н-бутил-п-гексилоксиазоксибензол,

б) п-н-бутил-п-метоксиазоксибензол (БМОАБ, ЖК-434),

в) н-бутил-п-(н-гексилоксифеноксикарбонил)-фенилкарбонат (Н-22),

г) н-бутил-п-(н-этоксифеноксикарбонил)-фенилкарбонат (Н-23).

Температуры фазовых переходов исследованных веществ измерены акустическим методом [6, 7]. В исследованном диапазоне давлений (10^5 – $6 \cdot 10^7$ Па) температуры фазовых переходов НЖК — изотропная жидкость (ИЖ) и НЖК — твердая фаза возрастают при повышении давления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существующий в нематической фазе максимум анизотропии коэффициента поглощения ультразвука низкой частоты вблизи температуры просветления уменьшается при повышении частоты ультразвука и исчезает в высокочастотном пределе [9, 10]. Отсутствие аномального увеличения коэффициента поглощения ультразвука высокой частоты является характерной особенностью акустических свойств нематической фазы в области фазового перехода НЖК-ИЖ и определяется параметром $\omega \cdot \tau_m$ (здесь τ_m — время релаксации m -го процесса). При частоте ультразвука выше 400 МГц, когда время релаксации сдвиговой вязкости меньше периода волны, выполняется неравенство $\omega \cdot \tau_m \gg 1$, и частотная зависимость коэффициента поглощения должна отсутствовать. Справедливость данного заключения подтверждается экспериментальными исследованиями температурной зависимости параметра $\Delta\alpha / f^2$ ($\Delta\alpha = \alpha^{\parallel} - \alpha^{\perp}$, α^{\parallel} и α^{\perp} — коэффициент поглощения ультразвука соответственно при взаимно параллельной и перпендикулярной ориентации директора и волнового вектора), выполненными в смеси ЖК-404 на частоте ультразвука 610 МГц [11] и на частоте 560 МГц [12]. Согласно выводам гидродинамики [4] при $\omega \cdot \tau_m \gg 1$ НЖК можно рассматривать как квазинесжимаемую среду. Требование несжимаемости ($\rho = const$), то есть равенства нулю тензора сдвига A_{kk} уравнения (1), определяет не только отсутствие объемных кинетических коэффициентов диссипативной части тензора напряжений, но также их связь с коэффициентами сдвиговой вязкости. Авторами работы [4] сделан вывод о том, что на высокой частоте $v_2 = v_4$ и $v_3 = 0$, то есть НЖК рассматривается как квазинесжимаемая среда, в которой диссипация энергии оп-

ределяется сдвиговой вязкостью. Предложенная модель позволяет рассчитать анизотропные коэффициенты сдвиговой вязкости НЖК по результатам высокочастотных измерений. Подстановка в уравнение зависимости поглощения ультразвука от угла θ между волновым вектором и директором [13]

$$\alpha(\theta) / f^2 = a \cdot \cos^2 \theta + b \cdot \cos^4 \theta + d \quad (2)$$

выражений коэффициентов a и b для двух предельных ориентаций волнового вектора и директора ($\theta = 0^0$ и $\theta = 90^0$) дает возможность рассчитать анизотропные коэффициенты сдвиговой вязкости, используя результаты измерений коэффициента поглощения ультразвука высокой частоты $\alpha_{\text{вч}}(\theta = 0^0) = \alpha_{\text{вч}}^{\parallel}$ и $\alpha_{\text{вч}}(\theta = 90^0) = \alpha_{\text{вч}}^{\perp}$:

$$v_1 = \frac{(\alpha^{\parallel} / f^2)_{\text{вч}} \cdot \rho \cdot c_0^3}{4 \cdot \pi^2}, \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{(\alpha^{\perp} / f^2)_{\text{вч}} \cdot \rho \cdot c_0^3}{4 \cdot \pi^2}. \quad (4)$$

Совпадение результатов расчета коэффициентов сдвиговой вязкости на частоте 610 МГц [11] и 560 МГц [12] подтверждает вывод об отсутствии частотной зависимости коэффициентов v_1 и v_2 на высокой частоте ультразвука (табл.1). Из гидродинамики несжимаемых

НЖК следует, что $v_2 = \eta_3$ (η_3 — коэффициент сдвиговой вязкости Месовича [14], когда директор перпендикулярен потоку и градиенту скорости). Сравнение значений v_2 и коэффициента η_3 (табл.1, 2 и 3), определенного по результатам исследований течения ЖК-404 в прямоугольном капилляре [15], указывает на их совпадение, как по порядку величины, так и по характеру температурной зависимости.

Отсутствие молекулярной теории жидкого состояния обусловило многообразие подходов для микроскопического описания зависимости вязкости жидкости от термодинамических параметров состояния [16, 17]. Теория Френкеля [17], в которой предполагается, что молекула жидкости, совершая колебания около фиксированного положения равновесия в течение «времени фиксированной оседлости», переходит в соседнее положение временной оседлости, приводит к следующему выражению температурной зависимости коэффициента вязкости простой жидкости:

$$\eta(T) = C \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (5)$$

где E — энергия активации молекулы, $C = \frac{kT\tau_0}{\pi r\sigma^2}$, τ_0 и r — соответственно период колебаний и радиус молекулы, σ — межчас-

Таблица 1

ЖК-404

$v_i \cdot 10^2, \eta \cdot 10^2,$ Па·с	$f, \text{ МГц}$	$\Delta T_c, \text{ К}$					
		30	25	20	15	10	5
v_1	560	2,9	2,6	2,4	2,1	1,9	1,5
v_1	610	3,0	2,7	2,3	2,0	1,8	1,5
v_2	560	2,5	2,3	2,1	1,8	1,6	1,4
v_2	610	2,5	2,3	2,1	1,7	1,5	1,3
η_3	—	4,6	4,0	3,3	2,5	2,0	1,7

Таблица 2

МББА, $f = 620 \text{ МГц}$

$\Delta T_c, \text{ К}$	20	17	14	10	7	4	1
$v_2 \cdot 10^2, \text{ Па·с}$	2,3	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3
$\eta_3 \cdot 10^2, \text{ Па·с}$	4,2	3,4	3,0	2,6	2,2	2,0	1,9

Таблица 3

ЖК-440, $f = 620 \text{ МГц}$

$\Delta T_c, \text{ К}$	30	25	20	15	10	5	2
$v_2 \cdot 10^2, \text{ Па·с}$	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9
$\eta_3 \cdot 10^2, \text{ Па·с}$	2,0	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9

Таблица 4

Параметры уравнения (6)

НЖК	МББА	ЖК-404	ЖК-440	Н-96
$Q_1 \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,76	1,62	8,56	2,74
$Q_2 \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$	1,77	4,95	6,05	2,71
$E_1, \text{ кДж/моль}$	25,8	24,3	27,0	23,5
$E_2, \text{ кДж/моль}$	23,3	21,1	21,0	23,0

тичное расстояние. Однако, значение величины C , рассчитанное теоретически, не согласуется с результатами измерения вязкости [16, 17]. Предложенная Эйрингом теория «абсолютных скоростей и реакции» для микроскопического описания сдвиговой вязкости неньютоновской жидкости приводит к выражению, аналогичному формуле (5), но с иным выражением множителя C [18]. Микроскопическая теория, основанная на одночастичном уравнении Фоккера — Планка, не учитывает короткодействующих ориентационных корреляций, имеющих первостепенное значение в процессе передачи импульса, что приводит к расхождению результатов расчета с экспериментальными данными [7, 11]. Поэтому при использовании подобных моделей параметры, входящие в уравнение, описывающее зависимость $\eta(T)$, необходимо рассчитывать, исходя из экспериментальных результатов.

Температурная зависимость коэффициентов сдвиговой вязкости ν_1 и ν_2 имеет активационный характер [7] (рис. 1):

$$\nu_i(T) = Q_i \cdot e^{\frac{E_i}{RT}}, \quad (6)$$

где $i = 1, 2$; E_i — энергия активации, Q_i — постоянный множитель (табл. 4).

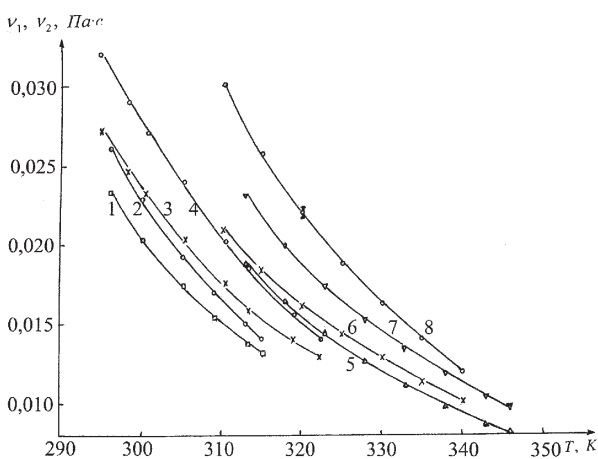


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициентов сдвиговой вязкости ν_1 (2, 4, 7, 8) и ν_2 (1, 3, 5, 6) в МББА (1, 2), ЖК-404 (3, 4), Н-96 (5, 7) и ЖК-440 (6, 8)

Диссипативный коэффициент ν_3 может быть рассчитан из гидродинамики Форстера [4, 5]:

$$\nu_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\nu_1 + \nu_2 - \frac{b \cdot \rho \cdot c_0^3}{4 \cdot \pi^2} \right). \quad (7)$$

Температурная зависимость коэффициента ν_3 имеет сложный характер и в исследованных веществах ν_3 возрастает при повышении температуры (табл. 5). Увеличение коэффициента ν_3 при повышении температуры является следствием взаимодействия волн сжатия, сдвига и ориентации, поскольку частота сдвиговых деформаций (2,8...8,3 МГц) при $T \rightarrow T_C$ становится соизмеримой с частотой ориентационной

релаксации $f_0 = \frac{\Delta\chi H^2}{4\pi\gamma_1}$. Исследования диэлектрической релаксации в НЖК показали [11], 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 $f_0 \rightarrow f$ [19], а уменьшение ν_3 при понижении температуры есть следствие частотной зависимости $\nu_3(f) = \nu_3^m \frac{f_0}{f}$ [11]. Таким образом, тем-

пературная зависимость ν_3 отражает взаимодействие сдвига и ориентации при периодических объёмных деформациях, когда время ориентационной релаксации становится соизмеримым с периодом акустических волн.

В рамках гидродинамической теории НЖК [4, 5] с помощью соотношений угловой зависимости коэффициента поглощения ультразвука и значений коэффициентов сдвиговой вязкости

Таблица 5

Значения коэффициента $\nu_3 \cdot 10^2, \text{ Па}\cdot\text{с}$

НЖК \ $\Delta T_C, \text{ К}$	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

v_1 и v_2 , а также коэффициента поглощения ультразвука высокой частоты (560 МГц и 620 МГц) и низкой частоты (500 кГц — 8,3 МГц), измеренного в случае параллельной и взаимно-перпендикулярной ориентации директора и волнового вектора, рассчитаны коэффициенты объемной вязкости:

$$v_4 = \frac{\rho c_0^3}{2\pi^2} \left[\left(\frac{\alpha^\perp}{f^2} \right)_{\text{нч}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^\perp}{f^2} \right)_{\text{вч}} \right], \quad (8)$$

$$v_5 = \frac{\rho c_0^3}{2\pi^2} \left[\left(\frac{\alpha^\parallel}{f^2} \right)_{\text{нч}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^\parallel}{f^2} \right)_{\text{вч}} \right] + \frac{v_4}{2} - \frac{v_2}{2}. \quad (9)$$

Коэффициенты объемной вязкости v_4 и v_5 обусловлены фазовыми сдвигами между объемом, температурой и давлением при периодических объемных деформациях в ультразвуковой волне. Таким образом, коэффициенты v_4 и v_5 являются следствием существования молекулярных релаксационных процессов с конечными временами установления равновесия. Поскольку эти времена составляют 10^{-4} – 10^{-10} с, в диапазоне частот ультразвука 500 кГц — 8,3 МГц коэффициенты v_4 и v_5 должны быть частотно-зависимыми. В исследованных веществах в диапазоне частот 500 кГц — 8,3 МГц $v_5 > v_4$, причем повышение частоты ультразвука приводит к уменьшению коэффициентов объемной вязкости (табл. 6, рис. 2).

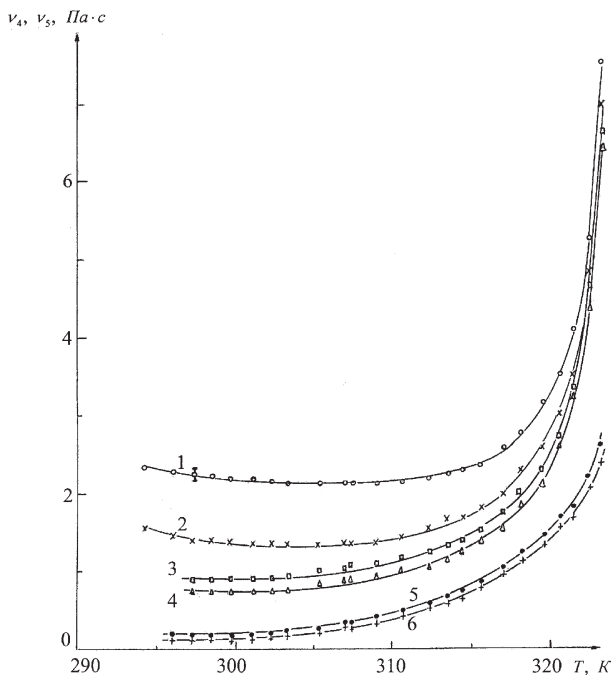


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов объемной вязкости v_4 (2, 4, 6) и v_5 (1, 3, 5) ЖК-404 при давлении 10^5 Па и частоте ультразвука: 1 и 2 — 500 кГц; 3 и 4 — 2,8 МГц; 5 и 6 — 8,3 МГц

В области фазового перехода НЖК-ИЖ по мере приближения к температуре T_c наблюдается резкое увеличение коэффициентов объемной вязкости (рис. 2, 3). В образцах с относительно небольшим температурным интервалом существования нематической фазы, например в МББА, коэффициенты v_4 и v_5 увеличиваются при повышении температуры во всем температурном интервале нематической фазы. Однако в смесях жидких кристаллов (Н-96, ЖК-404, ЖК-440) в низкотемпературном интервале нематической фазы коэффициенты вязкости v_4 и v_5 не зависят от температуры, а в ряде случаев уменьшаются при повышении температуры. Резкое увеличение коэффициентов объемной вязкости при повышении температуры в окрестности температуры фазового перехода НЖК-ИЖ возможно связано с тем, что в нематической фазе вблизи T_c флуктуации параметра порядка могут вносить вклад в критическую часть коэффициента поглощения ультразвука вследствие увеличения времени релаксации.

$v_1 \cdot 10^2, v_2 \cdot 10^2, v_3 \cdot 10^2,$
 $v_4, v_5, \text{ Па} \cdot \text{с}$

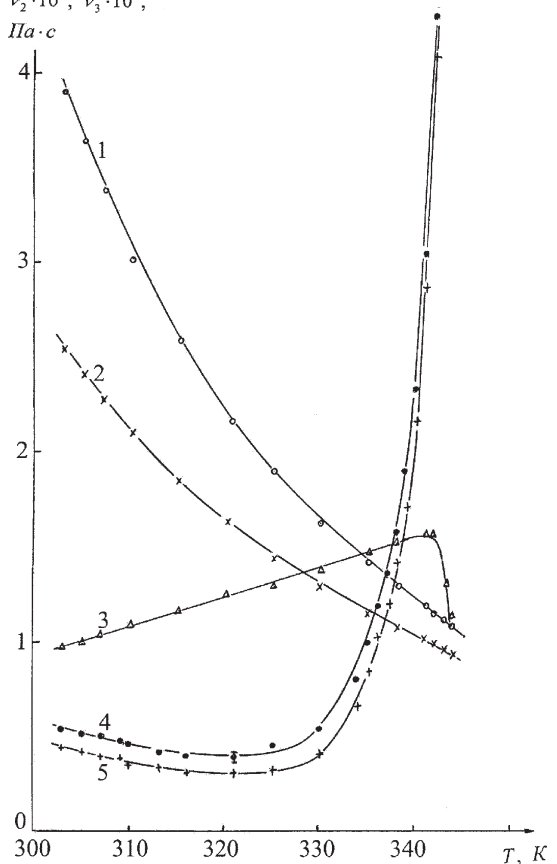


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициентов вязкости 1 — v_1 , 2 — v_2 , 3 — v_3 , 4 — v_4 , 5 — v_5 ЖК-440 на частоте 2,67 МГц при давлении 10^5 Па

Таблица 6

Коэффициенты объемной вязкости ЖК-404 при давлении 10^5 Па

v_i	$f, \text{ МГц}$	T, K				
		298,3	305,2	308,8	314,2	321,1
$v_4, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,5	1,40	1,35	1,40	1,68	3,50
	2,8	0,74	0,82	0,94	1,21	3,20
	4,4	0,62	0,70	0,71	0,92	2,96
	6,2	0,42	0,45	0,58	0,85	2,88
	8,3	0,18	0,31	0,39	0,61	1,75
$v_5, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,5	2,21	2,12	2,11	2,26	5,22
	2,8	0,90	1,00	1,11	1,38	4,54
	4,4	0,78	0,77	0,78	0,98	4,28
	6,2	0,53	0,54	0,72	0,95	4,08
	8,3	0,19	0,32	0,41	0,70	2,04

Если представить коэффициенты объемной вязкости в виде суммы регулярной составляющей ($v_{\text{РЕГ}}$) и критической составляющей ($v_{\text{К}}$):

$$v_{4,5}(T) = v_{4,5 \text{ РЕГ}} + v_{4,5 \text{ К}}, \quad (10)$$

то регулярная составляющая коэффициентов v_4 и v_5 в Н-96 на частоте 2,9 МГц и в ЖК-404 на частотах 2,8 МГц; 4,43 МГц; 6,2 МГц; 8,3 МГц не зависит от температуры (табл.7). В ЖК-440 на частоте 2,67 МГц и в ЖК-404 на частоте 500 кГц регулярная составляющая коэффициента объемной вязкости уменьшается по экспоненциальному закону:

$$v_{i \text{ РЕГ}} = v_{i0} \cdot \exp(E / RT). \quad (11)$$

Значения энергий активации E_i и множителя v_{i0} приведены в табл. 8.

Критическая составляющая коэффициентов v_4 и v_5 резко возрастает при уменьшении $\Delta T_C = T_C - T < 5 \text{ K}$:

Таблица 7

Регулярная составляющая коэффициентов объемной вязкости

НЖК	ЖК-404				Н-96
$f, \text{ МГц}$	2,8	4,43	6,2	8,3	2,9
$v_{4 \text{ РЕГ}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,74	0,60	0,42	0,18	0,29
$v_{5 \text{ РЕГ}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,90	0,77	0,53	0,19	0,39

Таблица 8

Коэффициенты уравнения (11)

НЖК	ЖК-404	ЖК-440
$f, \text{ МГц}$	0,5	2,67
$E_4, \text{ кДж/моль}$	8,3	20,4
$E_5, \text{ кДж/моль}$	7,6	16,0
$v_{40}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,048	$1,37 \cdot 10^{-4}$
$v_{50}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,103	$9,3 \cdot 10^{-4}$

$$v_{i \text{ К}}(T) = Q_i \cdot \left(\frac{\Delta T_C}{T} \right)^{-X}. \quad (12)$$

Причем в диапазоне частот 500 кГц — 6,2 МГц критическая составляющая объемной вязкости не зависит от частоты (рис. 4). Таким образом, зависимость коэффициентов объемной вязкости от частоты обусловлена частотной зависимостью регулярной составляющей. Значения коэффициента Q_i и критического показателя X приведены в табл.9.

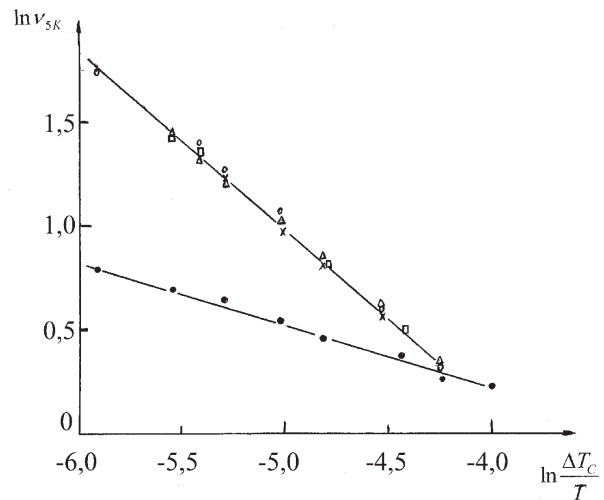


Рис. 4. Температурная зависимость критической составляющей коэффициента v_5 ЖК-404 на частоте ультразвука: \circ — 500 кГц; Δ — 2,8 МГц; \times — 4,43 МГц; \square — 6,2 МГц; \bullet — 8,3 МГц

Таблица 9

Коэффициенты уравнения (12)

НЖК	ЖК-404		ЖК-440	Н-96
$f, \text{ МГц}$	0,5—6,2	8,3	2,67	2,9
X_4	0,85	0,34	1,55	0,83
X_5	0,87	0,31	1,54	0,83
$Q_4, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,041	0,305	0,035	0,51
$Q_5, \text{ Па}\cdot\text{с}$	0,034	0,357	0,038	0,052

В области низких температур объемная вязкость на порядок превышает сдвиговую вязкость, причем при повышении температуры это различие возрастает, достигая максимума в окрестности температуры T_c , где объемная вязкость превышает сдвиговую более, чем в 300 раз в диапазоне частот 500 кГц — 6,2 МГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базаров И. П. Статистическая физика жидких кристаллов. / И. П. Базаров, Э. В. Геворкян. — М.: МГУ, 1992. — 496 с.
2. Clark M.G. A calculation of orientational relaxation in nematic liquid crystals. / M. G. Clark, F. M. Leslie. // Proc. Royal Society of London. — 1987. — V.A.361. — P. 463—485.
3. Ericksen J.L. Continuum theory of liquid crystals of nematic type. / J. L. Ericksen. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 1969. — Vol. 7, № 1—4. — P. 153—164.
4. Hydrodynamics of liquid crystals. / D. Forster [et al.] // Physical Review Letters. — 1971. — Vol. 26, № 17. — P. 1016—1019.
5. Forster D. Microscopic theory of flow alignment in nematic liquid crystals. / D. Forster // Physical Review Letters. — 1974. — Vol. 32, № 21. — P. 1161—1164.
6. Баландин В.А. Акустическая вискозиметрия нематических жидких кристаллов при изменяющихся температуре и давлении. / А. В. Баландин, А. Н. Ларионов, С. В. Пасечник // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1982. Т. 83, № 12. — С. 2121—2127.
7. Larionov A.N. Viscous properties of nematic mixture at variation of P, V, T-state parameters. / A. N. Larionov, N. N. Larionova, S. V. Pasechnik // Molecular crystals and liquid crystals. — 2004. — Vol. 409. — P. 459—466.
8. Хабибуллаев П.К. Реология жидких кристаллов. / П. К. Хабибуллаев, Э. В. Геворкян, А. С. Лагунов. — Ташкент: ФАН, 1992. — 298 с.
9. 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, № 3. — P. 441—449.
10. Ларионов А.Н. Анизотропное распространение ультразвука и вязкость нематических жидких кристаллов при вариации термодинамических параметров состояния. / А. Н. Ларионов, В. В. Чернышёв, Н. Н. Ларионова. // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика. — 2008. — № 1. — С. 39—47.
11. Ларионов А.Н. Релаксационные свойства жидкокристаллических растворов п-алкоксибензилиден-п-н-бутиланилинов в статическом магнитном поле. / А. Н. Ларионов, А. С. Лагунов, Д. Л. Богданов. // Журнал физической химии. — 1988. — Т. LXII, № 3. — С. 726—734.
12. Лагунов А.С. Магнитоакустические явления в растворах нематических жидких кристаллов. / А. С. Лагунов, В. С. Самсонов, В. А. Цветков. // Сборник докладов I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. — Ташкент: ФАН, 1976. — С. 103—109.
13. Jähmig F. Dispersion and absorption of sound in nematics. / F. Jähmig // Z. Physik. — 1973. — Vol. 258. — P. 199—208.
14. Gähwiller H. Direct determination of the five independent viscosity coefficients of nematic liquid crystals. / H. Gähwiller // Molecular crystals and liquid crystals. — 1973. — Vol. 20. — P. 301—318.
15. Tsvetkov V.A. Viscosity of nematic liquid crystal mixtures. / V. A. Tsvetkov // Advances in liquid crystal research and applications edited by Lajos Bata. Pergamon Press. Budapest. — 1980. — P. 567—572.
16. Беляев В.В. Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов. / В. В. Беляев // Успехи физических наук. — 2001. Т. 171, № 3. — С. 267—298.
17. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Собрание избранных трудов. Т. 3. / Я. И. Френкель. — М.: Изд. АН СССР, 1959. — 424 с.
18. Bennet L. Nonequilibrium molecular dynamics investigation of the presmectic behaviour of the viscosities of Gay-Berne nematic liquid crystal. / L. Bennet, S. Hess // Physical Review. E. — 1997. — Vol. 56, № 5. — P. 5561—5567.
19. Ларионов А.Н. Релаксационные свойства нематических фаз п-н-алкоксибензилиден-п-бутиланилинов. / А. Н. Ларионов, А. С. Лагунов, Д. Л. Богданов // Журнал физической химии. — 1982. — Т. LVI, № 6. — С. 1494—1499.

Ларионов Алексей Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент кафедры общей физики ВГУ, тел. 208-281, e-mail: Larionovan@yandex.ru.

Чернышёв Вадим Викторович — доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей физики ВГУ, тел. 208-281, E-mail: kof134@phys.vsu.ru.

Larionov Alexey N. — doctor of physico-mathematical science, reader of chair of general physics, physical faculty of Voronezh State University. Tel. 208-281. E-mail: Larionovan@yandex.ru

Chernyshov Vadim V. — doctor of physico-mathematical science, head of chair of general physics, physical faculty of Voronezh State University. Tel. 208-281. E-mail: kof134@phys.vsu.ru

Ларионова Нина Николаевна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики ВГУ, тел. 208-281, e-mail: Larionovan@yandex.ru.

Larionova Nina N. — candidate of physico-mathematical science, reader of chair of general physics, physical faculty of Voronezh State University. Tel. 208-281. E-mail: Larionovan@yandex.ru