

УДК 532.62

Г. И. Максимочкин, С. В. Пасечник, Н. В. Усольцева*, В. В. Быкова*,
Г. А. Тимофеев*

**НИЗКОЧАСТОТНЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СВОЙСТВА И ВЯЗКОУПРУГОСТЬ
ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В ОБРАЗЦАХ
МАЛОГО ОБЪЕМА**

**LOW-FREQUENCY ULTRASONIC PROPERTIES AND VISCOELASTICITY
OF LIQUID CRYSTALS AT THE PHASE TRANSITIONS IN SMALL-VOLUME
SAMPLES**

Московский государственный университет приборостроения и информатики,
107996 Москва, Россия, ул. Стромынка, 20. E-mail: maksgi2@mail.ru

*Ивановский государственный университет, НИИ Наноматериалов,
153025 Иваново, Россия, ул. Ермака, 39. E-mail: usol@ivanovo.ac.ru

Исследованы резонаторным методом скорость распространения и коэффициент поглощения ультразвука на частотах 0,68 – 1,63 МГц в жидких кристаллах (ЖК): 4-н-амилфениловый эфир, 4'-н-алкилокси(гексилокси-, гептилокси-, октилокси- нонилокси-)–фенилциклогексан-2-карбоновой кислоты, в области фазовых переходов, в образцах объемом 0,06 – 0,15 см³. Анализируются аномалии вязкоупругих свойств ЖК при фазовых переходах на основе абсолютных и относительных измерений скорости и коэффициента поглощения низкочастотного ультразвука. Обсуждаемый акустический метод представляется перспективным для экспресс-анализа вязкоупругих свойств мезогенных соединений в образцах малого объема.

The velocity of propagation and the coefficient of absorption of ultrasound in some liquid crystals (LCs): the esters of alkyloxyphenylcyclohexanecarboxylic acid, in the vicinity of the phase transitions has been studied in samples with the volume of 0.06 – 0.15 cm³ by using an acoustic resonance technique at frequencies in the range from 0.68 to 1.63 MHz. The analysis of the results of absolute and relative acoustic measurements provides information on the critical anomalies of the viscoelastic properties of LCs in the phase transition regions. The discussed acoustic method offers good prospects for the rapid investigation of the viscoelastic properties of small volumes of mesogenic compounds.

Ультразвуковой метод является удобным средством для получения информации о вязкоупругих свойствах жидких кристаллов (ЖК) при изменяемых термодинамических параметрах состояния [1, 2]. Интересные результаты были получены при исследовании фазовых переходов, где наблюдаются аномалии скорости распространения (c) и коэффициента поглощения (α) ультразвуковых волн, а также связанных с акустическими параметрами вязкоупругих свойств [3]. Данные аномалии во многих жидких кристаллах наиболее четко выражены в области частот ниже 1 МГц [4, 5]. До настоящего времени такие измерения выполнялись в акустических резонаторах с объемом порядка 5 см³, что существенно затрудняет применение ультразвукового метода для ис-

следования дорогих и вновь синтезируемых мезогенных соединений. В данной работе рассмотрены теоретические аспекты ультразвуковых исследований вязкоупругих свойств ЖК, методика низкочастотных ультразвуковых измерений в образцах малого объема, и примеры ультразвукового исследования вязкоупругих свойств при фазовых переходах ряда мезогенных соединений в образцах объемом $0,06 - 0,15 \text{ см}^3$. Главная цель работы выяснить: 1) возможность абсолютных и относительных измерений c и α при фазовых переходах в образцах ЖК указанного малого (для ультразвуковых исследований) объема и выяснить соответствие получаемых результатов известным свойствам жидких кристаллов в образцах большего объема. Уменьшение размеров образцов может приводить к искажению вязкоупругих свойств ЖК из-за влияния поверхностных взаимодействий, а также к дифракционным искажениям результатов акустических измерений.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования в данной работе выбран ряд сложных эфиров, синтезированных в Проблемной лаборатории жидких кристаллов Ивановского государственного университета: 4-*n*-амилфениловый эфир 4'-*n*-алкилокси(гексилокси-, гептилокси-, октилокси-, нонилокси-)фенилциклогексан-2-карбоновой кислоты. Соединения получены по реакции этерификации хлорангидридов: 4-алкилоксифенилциклогексан-2-карбоновой кислоты с *n*-амилфенолом [6], 6 – 9-й гомологи, I – IV, соответственно, рис. 1.

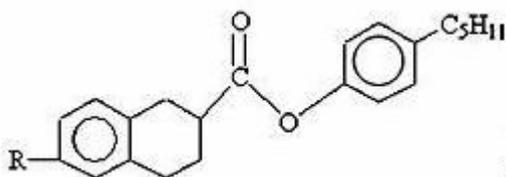


Рис. 1. Структурные формулы исследуемых соединений:

I: $R = -OC_6H_{13}$, II: $R = -OC_7H_{15}$,
 III: $R = -OC_8H_{17}$, IV: $R = -OC_9H_{19}$

По данным термической поляризационной микроскопии [7] при нагревании образцов соединений I – IV наблюдается полиморфизм следующего вида: в соединении I – Cr 313 К N 333 К Sm 328 К I; II – Cr 309 К Sm 335 К N 339 К I; III – Cr 318 К Sm 340 К N 341 К I и IV – Cr 324 К Sm 339 К I, (Cr, Sm, N, I – соответственно: кристаллическая, смектическая, нематическая и изотропная фазы). В цикле нагрев – охлаждение в указанных соединениях, как и во многих других ЖК, могут наблюдаться гистерезисные явления, особенно при переходах Cr – Sm, Sm – N. Эти вопросы мы исключаем из рассмотрения в данной работе, используя данные лишь для одного режима – нагревания со скоростью около 0,4 К/мин.

Введение в акустику жидких кристаллов

Жидкие кристаллы относятся к частично упорядоченным конденсированным средам, демонстрирующим сложное реологическое поведение. Простейшим примером таких сред являются нематические жидкие кристаллы (НЖК), отличающиеся от изотропной жидкости наличием дополнительной ориентационной степени свободы, задаваемой в гидродинамическом приближении единичным вектором – директором n , ко-

торый характеризует преимущественное направление длинных молекулярных осей. Если в изотропной жидкости система гидродинамических уравнений может быть построена на основе законов сохранения массы, импульса и энергии, то в НЖК к ним добавляется закон сохранения момента импульса, отражающий возможное вращение директора. Гидродинамическая теория нематических жидких кристаллов была развита в ряде работ. Их суть изложена достаточно подробно в обзорах и книгах по физике жидких кристаллов [8 – 10], поэтому избегая громоздких формул и выкладок, мы остановимся на особенностях и следствиях гидродинамического описания, существенных для решения поставленной задачи. Отметим, что система гидродинамических уравнений является существенно нелинейной и допускает аналитические решения лишь в ограниченном числе частных случаев. Кроме того, данная система отражает фундаментальное свойство нематических жидких кристаллов, а именно связь поворотов длинных молекулярных осей с поступательным движением центров масс. За счет одноосной симметрии, соответствующей нематическому типу упорядочения, диссипативная часть тензора напряжений включает набор 9 материальных коэффициентов с размерностью вязкости (из них 6 коэффициентов Лесли α_i , соответствующих несжимаемой среде и три коэффициента μ_i , описывающих диссипативные процессы, связанные с изменением удельного объема). Для сравнения, в изотропных жидкостях аналогами являются всего 2 коэффициента (сдвиговой и объемной вязкости). Решение линеаризованной системы гидродинамических уравнений сжимаемого НЖК приводит к зависимости коэффициента поглощения α продольной ультразвуковой волны (частотой f) от угла θ между волновым вектором и директором вида:

$$\alpha / f^2(\theta) = \alpha / f^2(\theta = \pi/2) + a_\alpha \cos^2 \theta + b_\alpha \cos^4 \theta, \quad (1)$$

$$\text{где} \quad \alpha / f^2(\theta = \pi/2) = (2\pi^2 / \rho c^3)(\mu_1 + \alpha_4), \quad (2)$$

$$a_\alpha = (2\pi^2 / \rho c^3)(\mu_2 + \mu_3 + \alpha_5 + \alpha_3 - \gamma_1 \lambda^2), \quad (3)$$

$$b_\alpha = (2\pi^2 / \rho c^3)(\alpha_1 + \gamma_1 \lambda^2), \quad (4)$$

$$\lambda = \gamma_1 / \gamma_2, \quad \gamma_1 = \alpha_3 - \alpha_2, \quad \gamma_2 = \alpha_3 + \alpha_2, \quad (5)$$

ρ – плотность среды, c – скорость ультразвука, которая в гидродинамическом приближении является величиной, не зависящей от ориентации жидкого кристалла и связанной с адиабатической сжимаемостью среды известным соотношением.

Выполненные к настоящему времени экспериментальные исследования анизотропного распространения ультразвука в монокристаллах НЖК [1, 2] подтвердили вид угловой зависимости коэффициента ультразвука, задаваемый соотношением (1) и изотропный характер скорости ультразвука в области низких частот. В тоже время, остается дискуссионным вопрос о влиянии процессов акустической релаксации на коэффициент поглощения и скорость распространения ультразвука. Формально это влияние можно учесть в рамках обобщенной гидродинамики путем введения комплексного модуля упругости [11]. Мнимая часть данного модуля определяет релаксационные вклады в коэффициент поглощения ультразвука, а действительная – в скорость ультразвука. В терминах приведенных выше выражений это означает, что коэффициенты объемной вязкости зависят от частоты ультразвука. Для единичного релаксационного процесса с временем релаксации τ эта зависимость имеет вид:

$$\mu_I = \mu_i^0 (1 + \omega\tau)^{-1}. \quad (6)$$

В данном приближении скорость ультразвука также становится анизотропной величиной, определяемой соотношением вида:

$$[c(\theta) - c(\theta = \pi/2)] / c(\theta = \pi/2) = a_c \cos^2 \theta + b_c \cos^4 \theta . \quad (7)$$

При этом коэффициенты a_c и b_c стремятся к 0 в пределе низких частот. Представленные выводы получили и более строгое микроскопическое обоснование [12]. Существование анизотропии скорости ультразвука было подтверждено прямыми экспериментами [13]. При этом данная величина является относительно небольшой и не превышает 10^{-3} при частоте $f = 3$ МГц.

Динамические процессы, вносящие релаксационные вклады в вязкоупругие параметры НЖК можно разделить на «нормальные», связанные с конформационными превращениями в концевых молекулярных цепях и «критические», обусловленные релаксацией параметра порядка или развитых флуктуаций параметра порядка в области нематико-изотропного перехода. Критические вклады в вязкоупругие параметры были проанализированы в рамках общей теории критических явлений в изотропном приближении [14], анизотропные вклады от релаксации нематического параметра порядка были рассчитаны и на основе микроскопических моделей [12]. Общим результатом такого рассмотрения является вывод о сильной температурной зависимости критических вкладов, связанной с критическим замедлением релаксационных процессов в области нематико-изотропного перехода. Выполненные экспериментальные исследования распространения ультразвука в области данного перехода [4, 15] находятся в качественном соответствии с выводами теории, при этом низкочастотные асимптотики акустических параметров описываются предсказанными теорией критическими показателями.

Таким образом, ультразвуковые исследования ориентированных образцов нематических жидких кристаллов способны дать информацию об объемном модуле упругости, анизотропных вязкостных параметрах жидких кристаллов и природе критических процессов в области нематико-изотропного перехода. Это подразумевает проведение исследований в широкой области частот при изменяющейся температуре и ориентации жидких кристаллов, так как вязкоупругие характеристики проявляют сильную зависимость от указанных параметров. Такого рода исследования были проведены для мономерных объемных образцов нематиков, ориентированных магнитными полями. Расширение ультразвуковых исследований на случай жидкокристаллических систем с сильными пространственными ограничениями способно дать принципиально новую информацию о вязкоупругих свойствах и фазовых переходах в жидких кристаллах. Из систем такого рода, пригодных для ультразвуковых исследований, следует выделить слоистые системы (чередование твердых пластин с жидкокристаллическими слоями) и жидкокристаллические эмульсии (капли жидкого кристалла микронных и субмикронных размеров в изотропной жидкости). Слоистые системы удобны с точки зрения создания заданной ориентации ЖК путем соответствующей обработки поверхностей твердого тела. Кроме того, в тонких слоях жидких кристаллов удобно изменять ориентацию с помощью электрических полей. В общем случае комбинация ориентирующего действия полей и поверхностей приводит к пространственно неоднородному распределению директора в пределах жидкокристаллического слоя. Теория таких деформированных структур развита достаточно хорошо в связи с использованием последних в жидкокристаллических дисплеях. В тоже время, распространение упругих волн в слоистой среде указанного типа практически не исследовано. В данной статье мы ограничиваемся ис-

следованием одного слоя жидкого кристалла толщиной 2 мм, расположенного между двумя плоскими поверхностями.

В этом случае влиянием поверхностных взаимодействий на ориентационную упорядоченность в объеме образца, по-видимому, можно пренебречь. В простейшем случае нематической фазы, отличающейся от изотропной жидкости наличием дальнего порядка в ориентации отдельных асимметричных молекул, коэффициент поглощения α и скорость продольного ультразвука c являются анизотропными параметрами, зависящими от угла θ между волновым вектором q и директором n , задающим направление преимущественной ориентации. В гидродинамическом приближении зависимость $\alpha(\theta)$ имеет вид [2]:

$$\frac{\alpha(\theta)}{f^2} = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} [(\mu_1 + \alpha_4) + (\mu_2 + \mu_3 + \alpha_5 + \alpha_3 - \gamma_1 \lambda^2) \cos^2 \theta + (\alpha_1 + \gamma_1 \lambda^2) \cos^4 \theta], \quad (8)$$

где f – частота ультразвука, ρ – плотность, $\lambda = \gamma_2 / \gamma_1$, $\gamma_2 = \alpha_3 + \alpha_2$, $\gamma_1 = \alpha_3 - \alpha_2$; μ_i – коэффициенты объемной вязкости, α_i – коэффициенты Лесли, имеющие размерность вязкости и входящие в гидродинамическое описание несжимаемой жидкокристаллической среды. Путем усреднения по равновероятному распределению ориентаций соотношение (1) приводится к виду:

$$\frac{\alpha}{f^2} = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} \mu^*, \quad (9)$$

где μ^* – динамическая вязкость – комбинация коэффициентов объемной вязкости и коэффициентов Лесли [16]. Величина μ^* может существенно уменьшаться с ростом частоты вследствие релаксационных процессов. Соотношение (2) мы будем использовать ниже для анализа вязкоупругих свойств жидких кристаллов на основе акустических данных. Например, в области фазового перехода «мезоген – изотроп» на низких частотах основной вклад в величину μ^* вносят коэффициенты объемной вязкости, имеющие релаксационную природу. Более детальная информация об объемной вязкости и коэффициентах Лесли может быть получена на основе акустических измерений в ориентированных образцах жидких кристаллов [1 – 5], в том числе, путем ультразвуковых измерений в многослойных жидкокристаллических системах. Таким образом, методы акустической спектроскопии позволяют получить информацию как о коэффициентах объемной вязкости, так и о коэффициентах Лесли. Кроме того, на основе акустических данных можно определить адиабатическую сжимаемость β_s и объемный модуль упругости K , величина которого может незначительно увеличиваться с ростом частоты вследствие дисперсии скорости ультразвука:

$$\beta_s = \frac{1}{\rho c^2} = \frac{1}{K}. \quad (10)$$

Еще раз отметим главную особенность акустического метода исследования, заключающуюся в зависимости от частоты основных акустических свойств и рассчитанных на их основе вязкоупругих характеристик, т. е. фактически исследуются динамические свойства объектов, проявляющиеся в поле колебаний температуры и давления ультразвуковой частоты. При условиях $\omega\tau \ll 1$ частотные зависимости слабо выраже-

ны и обеспечивается возможность исследования равновесных свойств; условия $\omega\tau \approx 1$ наиболее благоприятны для исследования неравновесных, релаксационных процессов в изучаемых объектах [1, 14].

Методы и техника низкочастотных ультразвуковых измерений

Измерения низкочастотных ультразвуковых характеристик в образцах ЖК малого объема проводились на экспериментальной установке (рис. 2), разработанной в Проблемной лаборатории молекулярной акустики Московского государственного университета приборостроения и информатики [17]. Установка предназначена для абсолютных и относительных измерений c и α в ячейках различного объема и конструкции; импульсным, импульсно-фазовым и резонаторным методами [18, 19]. В данной работе использовались три резонаторные ячейки (камеры) с рабочим диапазоном частот 0,68 – 1,63 МГц. 1) Цилиндрическая камера объемом $V = 70 \text{ см}^3$ (рис. 2, *c*) использовалась при контрольных измерениях и при акустических исследованиях растворов и микроэмульсий ЖК в немезогенных растворителях – воде, глицерине и др [17]; 2) Камера, составленная из двух плоско-выпуклых пьезопреобразователей и распорного кольца толщиной 2 мм объемом $0,15 \text{ см}^3$ (рис. 2, *b*) использовалась для абсолютных измерений c и α в образцах ЖК при фазовых переходах [20]; 3) Открытая акустооптическая камера наиболее малых размеров (рис. 2, *f*) использовалась для относительных измерений (c/c_0) и (α/α_0) при фазовых переходах в образцах ЖК объемом $0,06 \text{ см}^3$; а также для непосредственного визуального контроля фазовых переходов. Собственная частота пьезокерамических преобразователей (ЦТС-23), использовавшихся в камерах, составляла 2,7 МГц. Значения акустических характеристик определяли, в различных случаях применения установки: из анализа спада (рис. 2, *b*) длинного радиоимпульсного сигнала $A_n(n)$ – при малых значениях α , в камерах объемом 70 см^3 ; 2) из частотной зависимости $A_s(F)$ (рис. 2, *d, e*) – вдали от фазового перехода, в ячейках $0,15 \text{ см}^3$; 3) из ослабления результирующего резонансного сигнала A_{sm} на выходе резонансной ячейки – в области фазового перехода, в образцах объемом $0,06 \text{ см}^3$. Расчеты проводились по формулам:

$$c = 2L(F_k - F_o)/k; \quad c/c_o = F/F_o(1 + b(T - T_o)); \quad (11)$$

$$A_n = A_s \exp(-\alpha_s 2Ln); \quad \alpha = \alpha_s - \alpha_k, \quad (12)$$

$$\alpha_s = \pi\Delta F/c; \quad \alpha = \alpha_s - \alpha_k, \quad (13)$$

$$\alpha_s = \alpha_{so}(A_{so}/A_s), \quad (14)$$

где L – акустическая база камеры, F_o и F_k – частоты резонансных состояний с номерами k (рис. 2, *d*); A_s и A_{so} – текущее и начальное значение результирующего сигнала на выходе акустической камеры на частотах резонанса в зависимости от внешнего параметра – температуры, напряженности магнитного поля и т. п.; A_n – ордината сигнала на «ступеньке» осциллограммы сигнала с номером n (рис. 2, *b*); α_s и α_{so} – текущее и начальное значение коэффициента затухания акустического сигнала в системе «камера + образец», α_k – собственные потери камеры; c_o и F_o – начальные значения скорости ультразвука и частоты резонансного состояния при относительных измерениях; ΔF –

полуширина резонансного пика (рис. 2, *g*); $\alpha_s = \alpha_{so}(A_{so}/A_s)$. Собственные потери камеры α_k определяются по измерениям затухания сигнала α_s в камере, заполненной эталонной средой с известными акустическими свойствами.

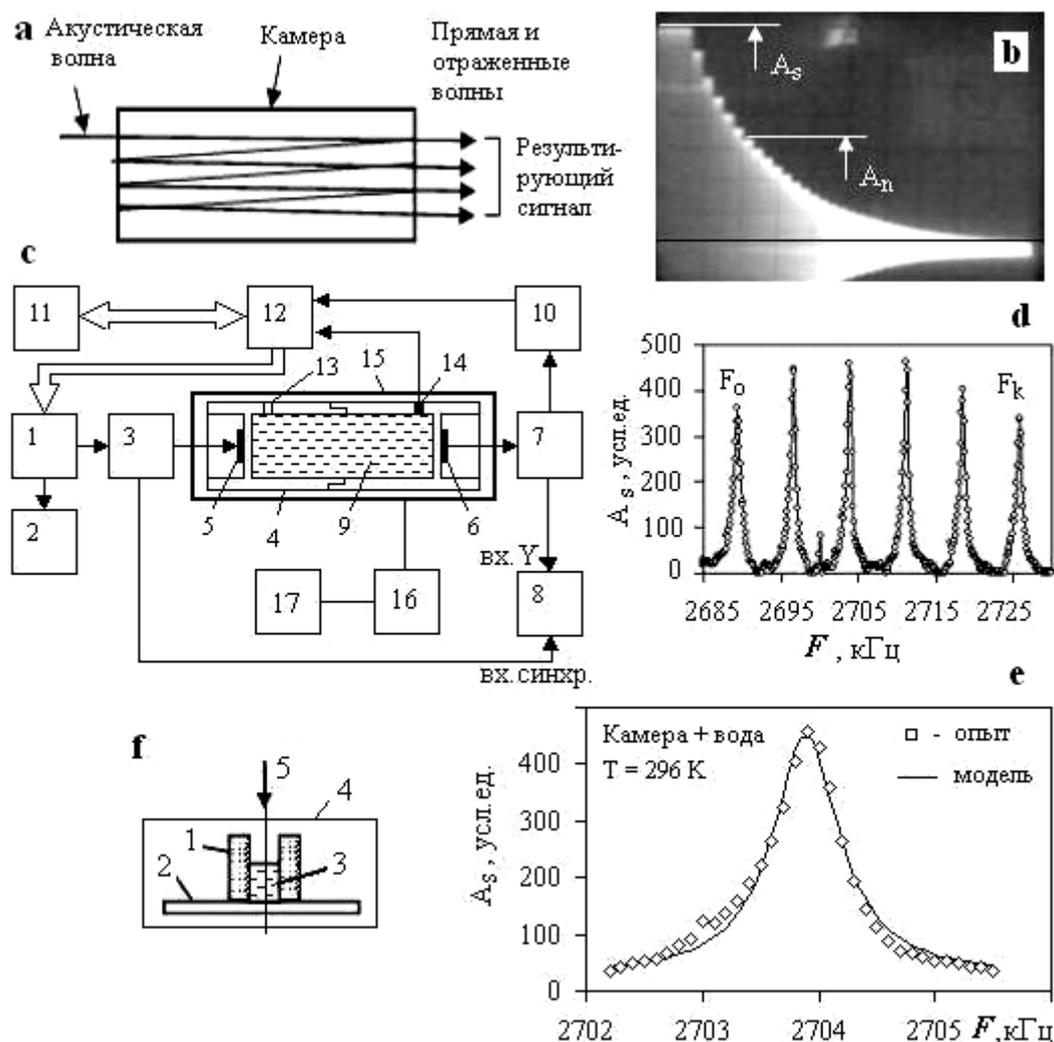


Рис. 2. Акустическая экспериментальная установка:

a – геометрия эксперимента; *b* – форма результирующего сигнала на выходе акустической измерительной камеры; *c* – блок-схема установки: 1 – ВЧ генератор (Г4-158), 2 – частотомер, 3 – генератор синусоидального сигнала или «длинных» когерентных импульсов, 4 – цилиндрическая акустическая камера ($L = 100$ мм, $V = 70$ см³) с преобразователями 5 и 6 (пьезокерамика), 7 – усилитель (УЗ-29), 8 – аналоговый осциллограф (С1-70) с цифровой камерой для регистрации осциллограмм или цифровой осциллограф, 9 – исследуемый образец, 10 – импульсный вольтметр (ВЗ-43), 11 – компьютер, 12 – блок сопряжения (Е440), 13 – заливочное отверстие, 14 – датчик температуры, 15 – термостат, 16 – блок управления термостатом, 17 – задатчик скорости изменения температуры; *d* – пример амплитудно-частотной зависимости $A_s(F)$, полученный при сканировании частоты; *e* – детальный вид одного из резонансных пиков; *f* – разрез миниатюрной акустической резонаторной ячейки ($L = 2$ мм, $V = 0,06$ см³): 1 – пьезопреобразователи, 2 – основание, 3 – образец, 4 – термостат, 5 – оптический канал

Результаты исследований акустических и вязкоупругих свойств

На рис. 3 – рис. 6 представлены полученные нами температурные зависимости акустических свойств c и α для соединений **I** – **IV** в образцах объемом $0,06 - 0,15 \text{ см}^3$ и рассчитанных на их основе объемных вязкоупругих характеристик μ^* и K .

Скорость ультразвука c и рассчитанный по формуле 10 объемный модуль упругости K с ростом температуры во всех исследованных соединениях, в целом, уменьшаются (рис. 3 – 4). Особенности в зависимостях $c(T)$ и $K(T)$ могут быть связаны с следующими фазовыми переходами: «ступеньки» при 219 и 331 К (в соединениях **III** и **IV**) – с переходом $Cr - Sm$; изломы при 228 и 300 К (в соединениях **I** – **III**) – с переходом $Sm - N$; локальные минимумы при 325 К (в соединениях **I** – **III**) – с переходом $N - I$; слабо выраженный минимум, выродившийся в «ступеньку», при 343 К (в соединении **IV**) – с переходом $Sm - I$. Глубина минимума скорости ультразвука и объемного модуля упругости в соединениях **I** – **IV** при постоянной частоте ω уменьшается с ростом количества атомов углерода в алкоксильной цепи и может быть связана с ростом времени релаксации τ объемной вязкости [1, 14].

Установлено критическое поведение коэффициента поглощения α в соединении **I**, в образцах объемом $0,15 \text{ см}^3$, при температурах в окрестности нематик-изотропного перехода, на ультразвуковых частотах ниже 1 МГц (рис. 6). Это соответствует известным свойствам других жидких кристаллов в образцах объемом порядка 5 см^3 [4]. Зависимость α / f^2 от температуры, для изотропной и нематической фаз, хорошо описывается степенными зависимостями (рис. 6) вида:

$$\alpha / f^2 = \alpha / (T - T^*)^\beta \quad \text{и} \quad \alpha / f^2 = \alpha / (T_{NI} - T)^\beta; \quad (15)$$

T_{NI} – температура перехода из нематической фазы в изотропную фазу, $T^* = T_{IN} - \Delta T^*$ – температура перехода из изотропной в нематическую фазу, $\Delta T^* \approx 1$ – температура переохладения при переходе. Для обеих фаз получено $\beta \approx 1$ для температур, отстоящих более чем на 1,5 К от фазового перехода и $\beta \approx 0,45$ для температур вблизи фазового перехода, что также характерно для объемных образцов жидких кристаллов [4, 14, 15]. Эти данные показывают, что вдали от фазового перехода, при температурах, отстоящих от T_{NI} на величину более 1,5 К, β с высокой достоверностью соответствует значению 1, предсказываемому теорией [14, 15], исходящей из приближения низкочастотного гидродинамического предела $\omega\tau \ll 1$. Этому приближению соответствуют и вычисленные нами на основе акустических данных значения объемной вязкости μ^* при различных частотах: в области частот меньше 1 МГц $\mu^*(f) \approx \cos t$ (рис. 6). Значение критического индекса вблизи фазового перехода равно порядка 0,45, что также соответствует ранее установленному значению для образцов объема порядка 5 см^3 [4].

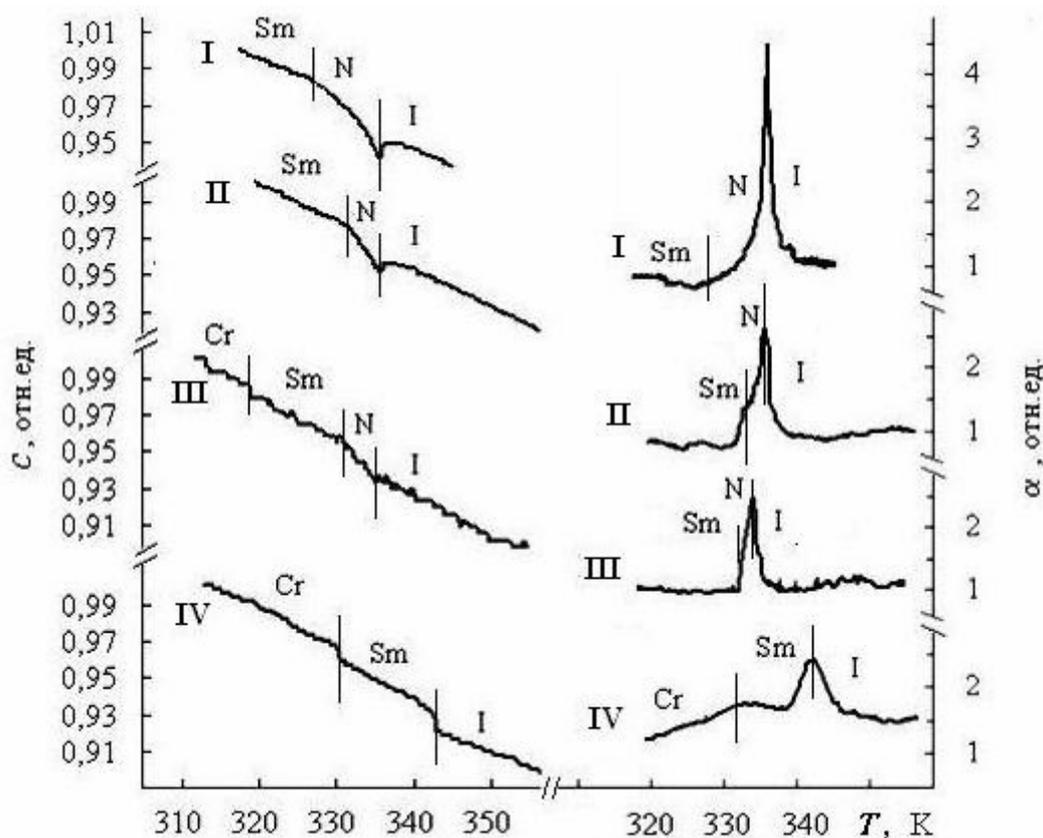


Рис. 3. Температурные зависимости c и α на частоте 0,68 МГц для соединений:

I – объемом $0,15 \text{ см}^3$ и (II-IV) – $0,06 \text{ см}^3$; при нагреве: 0,4 К/мин.

Чувствительность акустического метода с дальнейшим уменьшением рабочего объема ячеек до $0,06 \text{ см}^3$ существенно уменьшается, однако, как видно из рис. 3 – 4, чувствительность низкочастотного ультразвукового метода к фазовым переходам, особенно к переходу мезофаза – изотроп, сохраняется и при измерении относительных изменений c и α . Основные особенности в зависимостях $c(T)$ и $\alpha(T)$, хорошо воспроизводятся в вычисленных на основе акустических данных зависимостях $K(T)$ и $\mu^*(T)$.

Искажения формы пика поглощения в зависимости $\alpha(T)$ при 332 – 334 К (в соединениях II – III), может быть связано с проявлением перехода Sm – N.

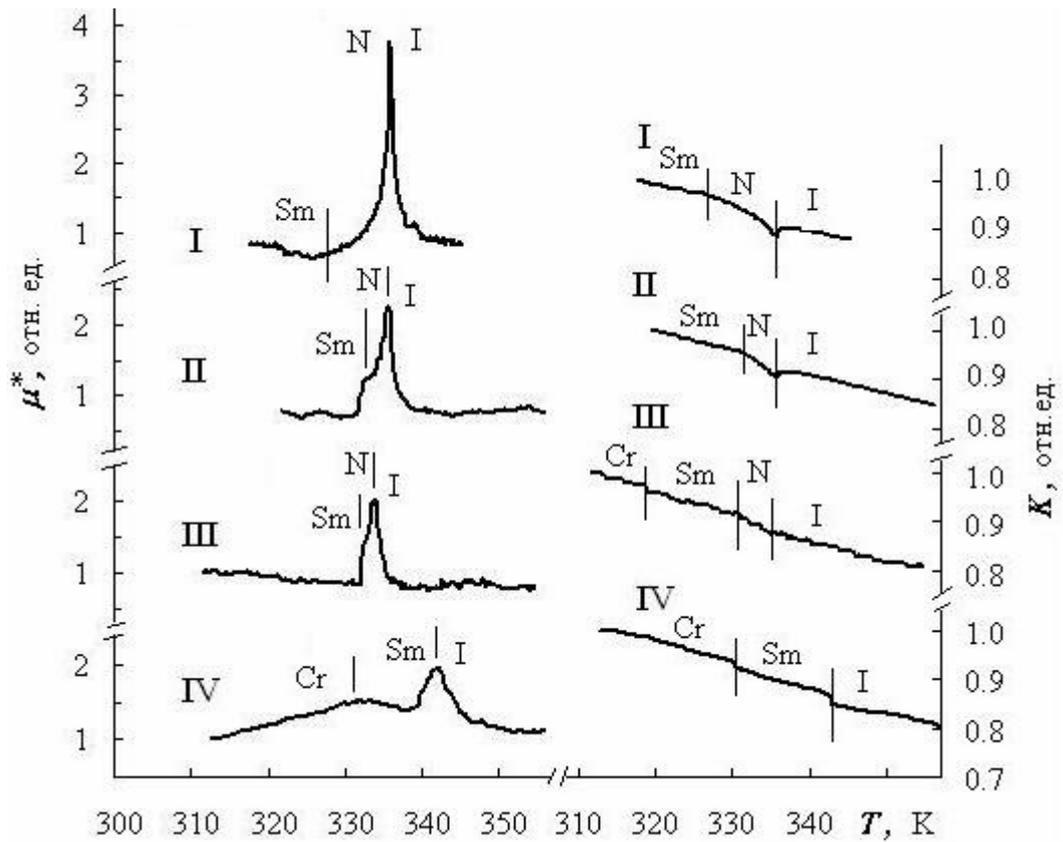


Рис. 4. Рассчитанные на основе акустических данных температурные зависимости μ^* и K для образцов соединений: I – объемом $0,15 \text{ см}^3$ и (II – IV) – $0,06 \text{ см}^3$

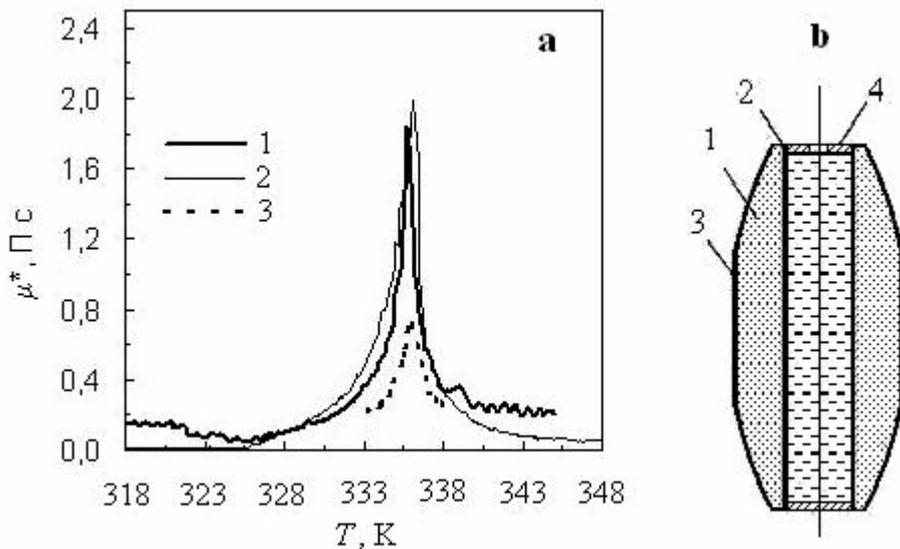


Рис. 5 Температурные зависимости μ^* для соединения I (а) при различных частотах: 1 – 0,68; 2 – 1,37 и 3 – 1,63 МГц; по результатам измерений в резонаторной измерительной ячейке (б) объемом $0,15 \text{ см}^3$; 1 – пьезопреобразователь, 2 и 3 – электроды, 4 – кольцо

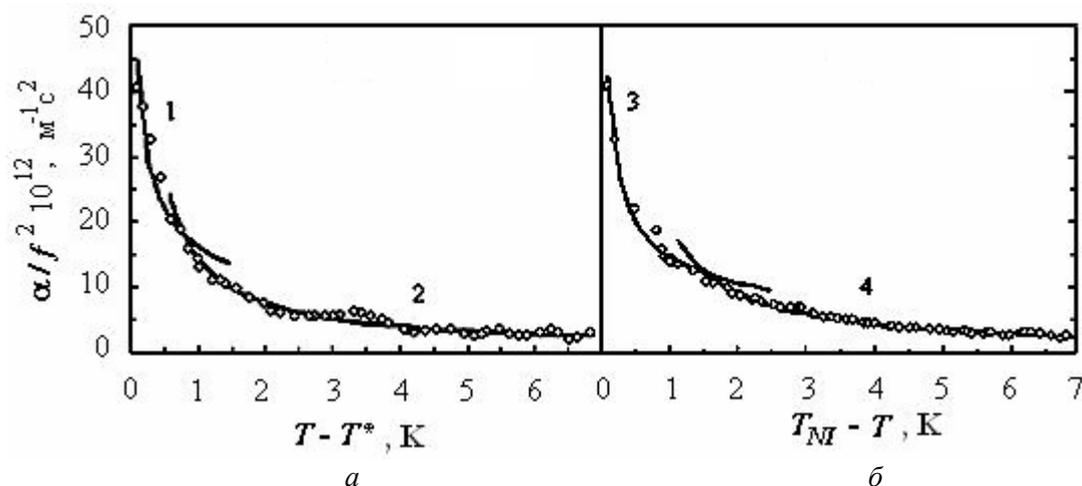


Рис. 6. Коэффициент поглощения ультразвука в образце **I** при температурах в окрестности «нематик – изотропного» перехода:

a – изотропная фаза; *б* – нематическая фаза. Кривые 1–4 отвечают критическим индексам β :
 1 – $0,44 \pm 0,05$ (при статистических характеристиках $R^2 = 0,902$, $\chi^2 = 12,6$); 2 – $0,93 \pm 0,03$
 ($R^2 = 0,949$, $\chi^2 = 0,27$); 3 – $0,46 \pm 0,02$ ($R^2 = 0,978$, $\chi^2 = 1,8$); 4 – $1,08 \pm 0,02$
 ($R^2 = 0,988$, $\chi^2 = 0,07$)

Высота экстремума в зависимости $\alpha(T)$ и $\mu^*(T)$ в области перехода «мезоген-изотроп» в ряду соединений **I** – **IV** также уменьшается с ростом числа атомов углеродов в алкоксильной цепи. Известно, что релаксационное поглощение в мезофазах уменьшается с ростом произведения $\omega\tau$ [1, 14]. Учитывая, что в данном случае измерения проводились при постоянной частоте, можно сделать вывод о росте времени релаксации объемной вязкости τ в ряду соединений от **I** до **IV**.

Температурные зависимости акустических характеристик c и α , полученные в ячейках объемом $0,15 - 0,06 \text{ см}^3$ соответствуют известным акустическим свойствам других жидких кристаллов в образцах большего объема, а вычисленные на основе акустических исследований температурные зависимости объемной вязкости μ^* и объемного модуля упругости K повторяют в основных чертах температурные зависимости акустических свойств. Таким образом, качественный экспресс-контроль вязкоупругих характеристик образцов жидких кристаллов может осуществляться непосредственно по измерениям температурных изменений акустических характеристик в образцах малого объема.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Гранта РФФИ № 07-01-13523 и Министерства образования и науки РФ (грант РНП.2.2.1.1.7280).

Список литературы

1. Капустин А. П., Капустина О. А. Акустика жидких кристаллов. М.: Наука, 1986. 248 с.
2. Баландин В. А., Ларионов А. Н., Пасечник С. В. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 6. С. 2121 – 2127.
3. Баландин В. А., Пасечник С. В., Прокопьев В. И., Шмелев О. Я. // Акуст. журнал. 1987. Т. 33. В. 4. С. 583 – 587.
4. Пасечник С. В., Баландин В. А., Прокопьев В. И. и др. // ЖФХ. 1989. Т. 63. № 2. С. 471 – 475.
5. Balandin V. A., Pasechnik S. V., Prokorpjev V. I., Shmelyoff O. Ya. // Liquid Crystals. 1988. Vol. 3. N. 10. P. 1319 – 1325.
6. Быкова В. В., Жарова М. А., Жарникова Н. В., Усольцева Н. В. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2002. Вып. 2. С. 13 – 18.
7. Тимофеев Г. А., Савченко В. Е., Усольцев Н. В., Быкова В. В. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2004. Вып. 3/4 (9–10). С. 126 – 132.
8. Stephen M. J. Straley J. P. // Physics of liquid crystals. Rev. Mod. Phys. 1974. Vol. 46. P. 617 – 704.
9. Де Жен П. Ж. Физика жидких кристаллов: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 400 с.
10. Чандрасекхар С. Жидкие кристаллы: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 344 с.
11. Jahnig F. // Z. Physik. 1973. Vol. 258. P. 199 – 208.
12. Кожевников Е. Н. // Акуст. Журнал. 1994. Т. 40. № 4. С. 613 – 618.
13. Balandin V. A., Pasechnik S. V., Shmelyoff O. Ya. // J. Phys. (Fr.). 1985. Т. 46. P. 583 – 588.
14. Анисимов М. А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. М.: Наука, 1987. 245 с.
15. Анисимов М. А. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. № 6. С. 1969 – 1983.
16. Пасечник С. В., Прокопьев В. И., Шмелев О. Я., Баландин В. А. // ЖФХ. 1987. Т. 61. № 1. С. 1675 – 1677.
17. Максимочкин Г. И., Максимочкин А. Г., Пасечник С. В. // Труды XVI сессии РАО. Москва, 2005. Т. 1. С. 30 – 33.
18. Eggers F., Funk T. // Rev. Sci. Instr. 1973. Vol. 44. P. 969.
19. Кононенко В. С. // Акуст. журнал. 1987. Т. 23. В. 4. С. 688 – 694.
20. Максимочкин Г. И., Пасечник С. В., Кравчук А. С., Усольцева Н. В., Быкова В. В., Тимофеев Г. А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 12. С. 22 – 28.

Поступила в редакцию 11.01.2008 г.