

АКУСТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В КРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ВОДЫ

Н.Ф.Ерохин

Впервые изучена частотная зависимость поглощения звука в критической области воды. Поглощение для критических изохоры и изотермы укладывается на одну универсальную кривую при критическом показателе кривой сосуществования, не согласующемся с предсказаниями скейлинг-теории.

Результаты динамической масштабной теории [1], эксперимент на простых жидкостях (X_e) [2] и бинарных смесях (нитроэтан-изоктан) [3] привели к универсальной зависимости избыточного коэффициента поглощения звука ($\alpha_{\eta} \lambda$) от приведенной частоты (ω^*). Однако проверка теории на сложных однокомпонентных системах, в которых возможно влияние на результаты внутренних молекулярных степеней свободы, не проводилась. В частности, релаксационные процессы в критической области такой специфической системы как вода до

сих пор не изучались из-за трудности акустического (спектроскопического) эксперимента при высоких температурах и давлениях ($T_K = -647,38\text{K}$, $P_K = 22,124\text{МПа}$).

Избыточный коэффициент поглощения на длину волны, обусловленный объемной вязкостью, [4] для критической изохоры однокомпонентной жидкости представляется в виде

$$\alpha_{\eta} \cdot \lambda = A(T) \int_0^{\infty} \frac{y^2}{(1+y^2)^2} \frac{K(y)\omega^*}{K^2(y) + \omega^{*2}} dy, \quad (1)$$

где $\omega^* = \omega/\omega_c$, ω_c — частота внешнего поля, $\omega_c = \frac{kT}{3\pi\eta^* r_c^3}$ — харак-

терная частота релаксации, однозначно определяемая равновесным радиусом корреляции флуктуаций r_c , $K(y)$ — функция Кавасаки — Феррела [4], зависящая от волнового числа q и r_c ($y = qr_c$), $A(T)$ — функция, слабо зависящая от приближения к критической точке, явный вид которой дан в [1].

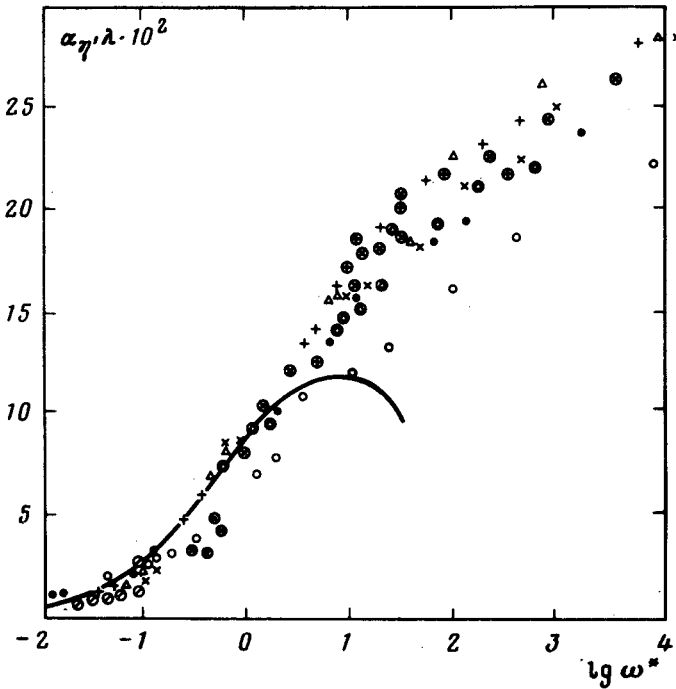


Рис. 1. Избыточный коэффициент поглощения ультразвука на длину волны как функция приведенной частоты ω^* : (для критической изохоры \bullet — 0,48 МГц, $+$ — 1,47, Δ — 2,55, \times — 3,55 МГц; для критической изотермы \circ — 0,48, \oplus — 1,47, \triangle — 2,55, \otimes — 3,55; \circ — 10,38 МГц)

Ниже обсуждаются результаты измерений коэффициента поглощения ультразвуковых волн в рамках динамической масштабной теории [1]. Коэффициент поглощения измеряли вдоль критической изохоры

и критической изотермы воды методом непрерывного интерферометра Фрая на экспериментальной установке, описанной в работе [5]. Частотную зависимость коэффициента поглощения измеряли в интервале 0,48 – 10,38 МГц с погрешностью не более 10 – 15%. В непосредственной близости к критической точке из-за аномально большого роста коэффициента поглощения измерения удалось провести только для частот 0,48 – 3,55 МГц. Точность термостатирования образца воды составляла $\pm 0,01\text{K}$.

На рис. 1 дана зависимость избыточного коэффициента поглощения ультразвука на длину волны от приведенной частоты вдоль критической изохоры воды для частот \bullet – 0,48; \circ – 1,47; Δ – 2,55; \times – 3,55 МГц. Для расчета длины волны использовались данные ранее обнаруженной нами дисперсии скорости звука [5]. Нетрудно видеть, что экспериментальные данные $\alpha_{\eta} \cdot \lambda$ укладываются на одну универсальную кривую (в пределах случайного разброса данных для различных частот и температур и являются функцией приведенной частоты в широком интервале изменений ω^* (шесть порядков). Это подтверждает предсказания теории динамического подобия о наличии характерной частоты релаксации ω_c , однозначно связанной с равновесным радиусом корреляции. Для $\omega^* \gg 1$ $\alpha_{\eta} \cdot \lambda$ не должно зависеть от приближения к критической точке. Из рис. 1 видна тенденция к такому поведению. Расчет по теории Кавасаки (1) (сплошная кривая) удовлетворительно (количественно) согласуется с экспериментальными значениями $\alpha_{\eta} \cdot \lambda$ для $\omega^* < 10$. Расчет выражения (1) проведен на ЭВМ (подробности расчета аналогичны приведенному в [5] для дисперсии скорости звука). Для $\omega^* > 10$ наблюдается качественное расхождение теории [4] и эксперимента, обусловленное неверным видом корреляционной функции Орнштейна – Цернике [1] при выводе (1).

Результаты измерений избыточного коэффициента поглощения для критической изотермы можно представить также в координатах $\alpha_{\eta} \cdot \lambda = f(\omega^*)$. Учитывая, что $\Delta\rho \sim t^\beta$ (предположение статического скейлинга [6]), представим характерную частоту в виде

$$\omega_c \sim \Delta\rho^{\frac{2-\alpha}{\beta}}, \quad (2)$$

где $\Delta\rho = \frac{\rho - \rho_K}{\rho_K}$ – относительная плотность, $t = \frac{T_K - T}{T}$ – относительная температура, α и β – критические показатели теплоемкости и кривой сосуществования. Значение $\beta = 0,38$ подобрали варьированием по лучшему согласованию данных $\alpha_{\eta} \cdot \lambda$ для критической изохоры и критической изотермы. К такому же значению β приводит расчет, проведенный нами по PVT данным воды для интервала $10^{-4} < t < 10^{-1}$. Однако результаты теории и эксперимента на простых жидкостях [1] дают наиболее вероятное значение $\beta = 0,34$. Такое различие выходит далеко за пределы погрешности определения β и не совсем понятно. Значение $\alpha = 0,11$ брали по результатам измерения скорости звука в воде [5], которое совпадает с рекомендациями [1]. На рис. 1 зна-

чения $\alpha \cdot \lambda$ для критической изотермы воды представлены для частот $\omega = 0,48; \oplus - 1,47; \ominus - 2,55; \otimes - 3,55; \circ - 10,38$ МГц. Видно, что значения избыточного коэффициента поглощения для критической изохоры и критической изотермы удовлетворительно укладываются на универсальную кривую. В узкой области в непосредственной близости к критической точке пропорциональность (2) нарушается, что не позволяет рассчитать ω^* (максимальное расчетное приближение к критической точке $\Delta\rho = 0,018$). Для определения механизма релаксации в критической области воды указанного интервала частот (0,48 – 10,38 МГц) оказалось недостаточно. Для полной картины релаксационного механизма необходимо изучение поглощения и скорости звука методами спектроскопии оптического смешения [7].

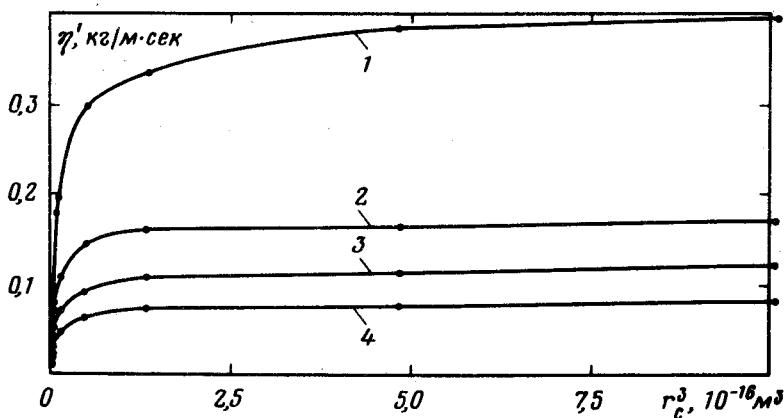


Рис. 2. Зависимость объемной вязкости от радиуса корреляции для критической изохоры воды

Для однокомпонентных жидкостей на низких частотах объемная вязкость зависит от r_c ($\eta' \sim r_c^3$), а при $\omega \rightarrow \infty$, наоборот, только от частоты ($\eta' \sim \omega^{-1}$) [1]. Эти выводы приемлемы и для воды. На рис. 2 дана зависимость объемной вязкости от r_c для критической изохоры воды (η' рассчитывали из измерений избыточного поглощения [8]). Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют частотам 0,48; 1,47; 2,55; 3,55 МГц.

Благодарю М.А.Анисимова, В.А.Соловьева, В.П.Романова за полезные замечания и внимание к данной работе.

Гаганрогский педагогический институт Поступила в редакцию
7 мая 1980 г.

Литература

- [1] М.А.Анисимов. УФН, 114, 249, 1974.
- [2] С. Garland, D. Eden, L. Mistura. Phys. Rev. Lett., 25, 1161, 1970.
- [3] М.А.Анисимов, В.П.Воронов, В.М.Малышев, В.В.Свадковский. Письма в ЖЭТФ, 18, 224, 1973.

[4] К. Kawasaki . Phys . Rev. , A1, 1750, 1970.

[5] Н.Ф.Ерохин, Б.И.Кальянов. ТВТ, 1, 290, 1979.

[6] В.Л.Покровский. УФН, 94, 127, 1968.

[7] Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов, под ред. Г.Каминса, М., Изд. Мир, 1978.

[8] Физическая акустика, под ред. У.Мезона, 7, М., Изд. Мир, 1974.
