



<http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2016.08.053>

УДК 534-14;534-8:538.951

Академік НАН України Л. А. Булавін, О. І. Білоус, О. С. Свечнікова

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Інститут проблем безпеки АЕС України, Київ

E-mail: o\_bilous@ua.fm

## Швидкість та поглинання звуку в розчині нітробензол–*n*-гексан поблизу критичної температури розшарування

*Проведено акустичне дослідження бінарного розчину нітробензол–*n*-гексан з різними концентраціями в широкому інтервалі частот поблизу його верхньої критичної точки розшарування. Показано, що згідно з теорією динамічного скейлінгу результати дослідження швидкості розповсюдження звуку слід аналізувати окремо в трьох динамічних областях, роль флуктуацій в яких, відповідно, або відсутня, або суттєва, або знаходиться на межі визначення. Аналіз температурних залежностей швидкості розповсюдження ультразвуку дозволив оцінити час життя флуктуацій концентрацій в розчині нітробензол–*n*-гексан при підході його до критичної точки з боку гомогенного стану на відстань 0,1 К.*

**Ключові слова:** швидкість, поглинання ультразвуку, критична точка розшарування, бінарний розчин, час життя флуктуацій концентрацій.

Акустичні дослідження розчинів поблизу критичної температури розшарування  $T_{кр}$  лишаються темою жвавої наукової дискусії [1–4], враховуючи широкі можливості практичного використання властивостей таких систем [5, 6]. Важливою особливістю акустичної спектроскопії є можливість відслідковувати динаміку процесів та встановлювати фізичні механізми, що їх зумовлюють. Причому експериментально такі дослідження значно простіше проводити поблизу критичних точок розшарування, ніж поблизу критичної точки “рідина–пара”, а наявність гіпотези ізоморфізму дозволяє розповсюджувати отримані поблизу критичної точки розшарування результати на поведінку речовини поблизу критичної точки “рідина–пара”. Саме тому особливий науковий інтерес викликають акустичні дослідження швидкості розповсюдження та коефіцієнта поглинання звуку бінарних розчинів поблизу їх критичних температур розшарування [7].

© Л. А. Булавін, О. І. Білоус, О. С. Свечнікова, 2016

Як відомо [8], процес адиабатичного поширення звукової хвилі в рідинних системах супроводжується часовими та просторовими змінами миттєвого тиску, амплітуда якого зменшується за відомим експоненціальним законом:

$$P(x, f, t) = P_0 e^{-\alpha x} e^{-i2\pi(ft-x/\lambda)}, \quad (1)$$

де  $P = P_0$ , за умови  $x = 0, t = 0$ ;  $c = f\lambda$  — фазова швидкість звуку;  $f, \lambda$  — частота та довжина звукової хвилі відповідно;  $\alpha$  — коефіцієнт поглинання звуку. Аналіз поведінки швидкості поширення та коефіцієнта поглинання звуку і становить основу проведеного дослідження.

Як правило, аномальну поведінку пронормованого коефіцієнта поглинання звуку ( $\alpha f^{-2}$ ) чи швидкості поширення звуку  $c$  для розчинів поблизу їхньої критичної температури розшарування пов'язують із флуктуаціями концентрації та пояснюють в рамках теорій динамічних критичних явищ [9]. Наразі найбільш визначні із них: теорія взаємодіючих мод [10], гіпотеза динамічного скейлінгу та універсальності [11], наближення ренормалізаційної групи [12].

З теорії динамічного скейлінгу [11] відомо, що при наближенні до  $T_{кр}$  зростають не лише розміри флуктуацій, що визначаються радіусом кореляції  $R_c$ , а й час життя флуктуацій  $\tau_{фл}$  [11].

Тому для розуміння кінетики процесів утворення та розпаду флуктуацій поблизу критичних точок необхідно проводити комплексні дослідження швидкості розповсюдження звуку та його поглинання в різних областях змін величини  $\omega\tau_{фл}$  ( $\omega = 2\pi f$ ): в області, далекій від критичної точки  $\omega\tau_{фл} \ll 1$ , де діє теорія середнього поля, в критичній області  $\omega\tau_{фл} \gg 1$ , де діє флуктуаційна теорія, та в кросоверній області, де  $\omega\tau_{фл} = 1$ .

На сьогодні більшість експериментальних досліджень саме критичної області [4] проведено у вузькому частотному діапазоні і лише для розчинів із критичними концентраціями [2], що зменшує достовірність отриманих результатів.

Метою даної роботи є аналіз швидкості розповсюдження звуку  $c$  та пронормованого коефіцієнта його поглинання ( $\alpha \cdot f^{-2}$ ) у бінарних розчинах нітробензол–гексан різної концентрації в широкому діапазоні частот (5–2800 МГц) вздовж їх ізоконцентрат для температур, вищих за критичну температуру розшарування.

**Об'єкти дослідження та методика проведення експерименту.** Для експериментальних досліджень ми обрали бінарний розчин нітробензол– $n$ -гексан, який має верхню критичну температуру розшарування ( $T_{кр}$ ), величина якої належить до кімнатної температури, що спрощує проведення експерименту. Для приготування розчинів із різними концентраціями в діапазоні концентрацій  $0 \div 1$  з кроком 0,1 мольна частка нітробензолу використовували гексан та бензол марки ХЧ.

Експериментальні дослідження коефіцієнта поглинання та швидкості розповсюдження звуку проводили імпульсним методом, який детально описаний в роботі [13]. У діапазоні частот 5–150 МГц використовували імпульсний метод змінної відстані та метод резонансного збудження п'єзокристала кварцу, а в діапазоні високих частот (300–2800 МГц) — метод нерезонансного збудження монокристала ніобату літію. Відносні похибки вимірювань величин швидкості та коефіцієнта поглинання звуку в залежності від умов експерименту становили 2–5%.

**Швидкість розповсюдження звуку.** Нами проведені частотні та температурні дослідження швидкості розповсюдження звуку в розчині нітробензол– $n$ -гексан в інтервалі частот 5–2800 МГц та інтервалі температур 294–310 К для низки вказаних розчинів із різною концентрацією. На рис. 1 зображена частотна залежність швидкості розповсюдження звуку

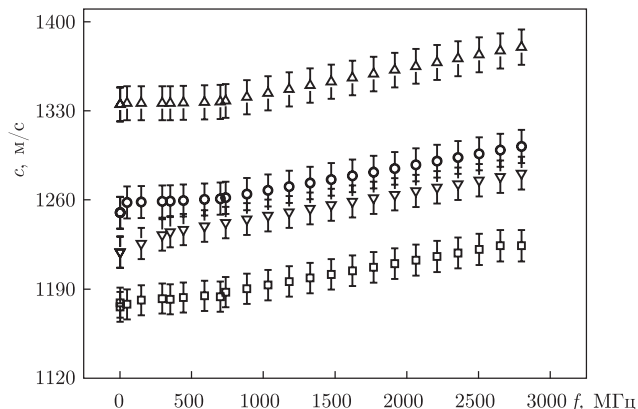


Рис. 1. Частотна залежність швидкості розповсюдження звуку в розчині нітробензол–*n*-гексан з різними концентраціями нітробензолу:  $X = 0,300$  ( $\square$ );  $X_{кр} = 0,401$  ( $\nabla$ );  $X = 0,505$  ( $\circ$ );  $X = 0,703$  ( $\Delta$ ) при  $T = 294,1$  К

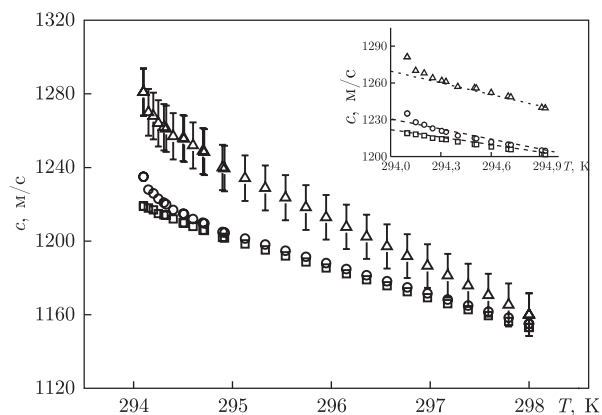


Рис. 2. Температурна залежність швидкості розповсюдження звуку в розчині нітробензол–*n*-гексан із критичною концентрацією  $X = 0,401$  (мольних часток нітробензолу [3]) для частот:  $f_1 = 5$  ( $\square$ );  $f_2 = 100$  ( $\circ$ );  $f_3 = 2800$  МГц ( $\Delta$ )

в розчині нітробензол–*n*-гексан із різними концентраціями нітробензолу при температурі, яка перевищує критичну температуру на 0,1 К.

Як бачимо на рис. 1, у всьому дослідженому інтервалі частот у межах похибки експерименту  $\delta_c \approx (3 \div 4)\%$  не виявлена аномальна дисперсія звуку, а спостерігається незначна нелінійна залежність швидкості розповсюдження звуку від частоти.

На рис. 2 наведено експериментальні дані по швидкості розповсюдження звуку на трьох частотах:  $f_1 = 5$ ;  $f_2 = 350$ ;  $f_3 = 2800$  МГц. Як бачимо, для частоти  $f_1 = 5$  МГц швидкість звуку в розчині нітробензол–*n*-гексан із його критичною концентрацією ( $X_{кр} = 0,401$ ) з підвищенням температури лінійно зменшується. На відміну від цього при частоті  $f_2 = 350$  МГц спостерігається відхилення від вказаної лінійної залежності. Ще більш значне відхилення від лінійної залежності спостерігається на частоті  $f_3 = 2800$  МГц.

На нашу думку, лінійна залежність  $c = c(T)$  свідчить про те, що на такій частоті розповсюдження звуку “не відчуває” наближення розчину до критичного стану, тобто відповідно до теорії динамічного скейлінгу  $\omega\tau_{фл} \ll 1$ . Іншими словами, отримана лінійна залежність  $c = c(T)$  підтверджує, що в дослідженій області параметрів  $\omega$ – $T$ – $X$  працює теорія середнього поля. Відхилення від прямолінійної залежності  $c = c(T)$ , яке спостеріга-

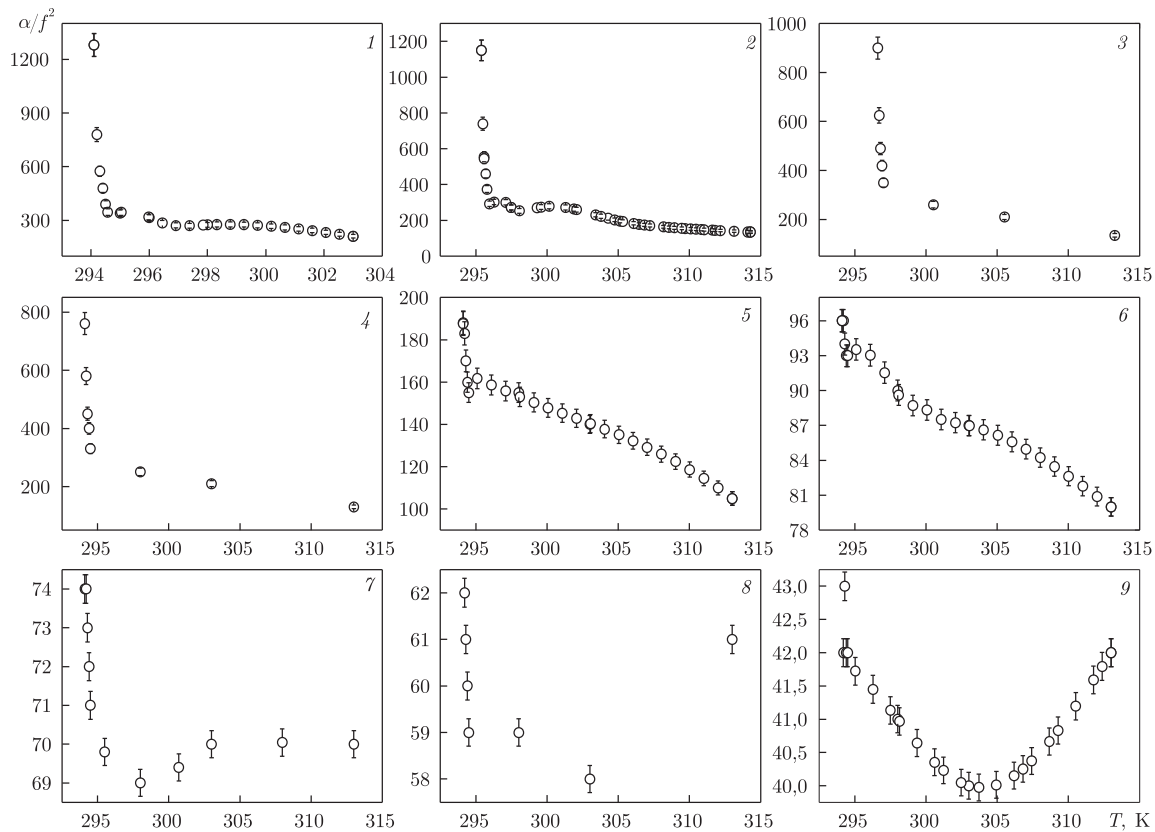


Рис. 3. Температурні залежності експериментально отриманих пронормованих на квадрат частоти  $f$  значень коефіцієнта поглинання звуку  $\alpha$  в розчині  $n$ -гексан для концентрації  $X_{кр} = 0,401$  (мольних часток нітробензолу) на частотах: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 25; 4 – 30, 5 – 110, 6 – 300, 7 – 900, 8 – 1500, 9 – 2800 МГц

ється при  $f_2 = 100$  МГц, свідчить про перехід умов проведення експерименту в кросоверну область, де  $\omega\tau_{фл} \sim 1$ . Значне відхилення від вказаної лінійної залежності при підході до критичної температури в нашому експерименті спостерігається на частоті  $f_3 = 2800$  МГц, що свідчить про те, що умови експерименту відповідають флуктуаційній області теорії динамічного скейлінгу. Такий аналіз температурної залежності швидкості розповсюдження звуку дозволяє нам оцінити час життя флуктуацій концентрацій в розчині нітробензол–гексан при підході його до критичної точки розшарування на відстань 0,1 К. За нашими оцінками, час життя флуктуацій концентрацій розчину нітробензол–гексан у вказаному термодинамічному стані становить  $\tau_{фл} \approx 2 \cdot 10^{-9}$  с.

**Коефіцієнт поглинання звуку.** Далі проаналізуємо отримані нами температурні залежності пронормованого на квадрат частоти коефіцієнта поглинання звуку в досліджуваних розчинах із різними концентраціями за умови фіксованого значення частоти на прикладі розчину з критичною концентрацією  $X_{кр} = 0,401$  (мольних часток нітробензолу). На рис. 3 наведено температурні залежності  $\alpha f^{-2}$  для розчину з критичною концентрацією.

В області низьких частот  $\omega\tau \ll 1$  (криві 1, 2 на рис. 3 при 10 і 30 МГц) температурні залежності експериментальних значень коефіцієнта поглинання, що зображені точками, мають монотонний характер, причому при збільшенні температури коефіцієнт поглинання зменшується. Аналіз цих графіків в інтервалі температур  $T \div T_{кр} = 1$  К показує, що

експериментальні точки можуть бути описані в рамках динамічної теорії критичних явищ формулою [9, 10]

$$\alpha f^{-2} = A_0 t^{-\alpha \pm Z\nu}, \quad (2)$$

де  $A_0$  — коефіцієнт, що залежить від частоти;  $t = (T - T_{\text{кр}})/T_{\text{кр}}$  — приведена температура;  $Z = 3,05$  — динамічний критичний показник [9];  $\alpha_t = 0,091$  — критичний показник теплоємності та  $\nu = 0,63$  — критичний показник радіуса кореляції [10]. Знак показника степеня є функцією частоти.

При збільшенні частоти ультразвуку температурна залежність коефіцієнта поглинання має більш складний характер (див. графіки 5–9 рис. 3) і вже не може бути описана навіть у вузькому температурному інтервалі за допомогою формули (2).

Разом з тим для некритичних концентрацій розчину та для його компонент немонотонна температурна залежність коефіцієнта поглинання ультразвуку не спостерігалась.

Підтвердженням спостереженої нами немонотонної температурної залежності поглинання звуку є проведений нами аналіз літературних даних для розчинів із критичною концентрацією розшарування. Аналіз проведених експериментів [3, 4] показав: якщо для одного з компонентів бінарного розчину температурна залежність коефіцієнта поглинання є монотонно спадною функцією, а для іншого компонента — зростаючою, лише тоді реалізується не монотонність у температурній залежності коефіцієнта поглинання звуку, яка спостерігалась і в нашому експерименті.

Цей факт разом із наведеними вище свідчить про флуктуаційну природу зафіксованих високочастотних температурних аномалій. Справді, у випадку наближення розчинів до критичної точки розшарування розмірами системи вже є розмір флуктуації або величина радіуса кореляції системи  $R_C$ . Так, при підході до критичної точки “рідина–пара” на відстань  $t = (T - T_{\text{кр}})/T_{\text{кр}} \sim 10^{-4}$  (де  $T_{\text{кр}}$  — критична температура) спостережений оптичним методом радіус кореляції  $R_c$  збільшується до величини  $R_c \sim 10^3$  нм. Довжина ультразвукової хвилі із частотою  $f \sim 10^9$  Гц стає співрозмірною із радіусом кореляції, що неминуче приводить не лише до поглинання, але й до розсіяння звукової хвилі. Отже, спостережувані нами температурні аномалії коефіцієнта поглинання звуку, що розпочинаються на частотах  $f > 10^8$  Гц, можуть бути результатом розсіяння звукової хвилі на флуктуаціях концентрацій.

### **Обробка експериментальних даних та обговорення результатів експерименту.**

Ідея обробки експериментальних даних по поглинанню ультразвуку в розчині нітробензол–*n*-гексан поблизу критичної точки розшарування полягала у нижченаведеному. Коефіцієнт поглинання звуку з урахуванням теорії динамічного скейлінгу [8–10] є сумою регулярної та флуктуаційної складових:

$$\alpha f^{-2} = (\alpha f^{-2})_{\text{рег}} + (\alpha f^{-2})_{\text{фл}}, \quad (3)$$

де  $\alpha f^{-2}$  — експериментальні дані поглинання звуку вздовж ізоконцентрат, які є функцією частоти та температури;  $(\alpha f^{-2})_{\text{рег}}$  — регулярна частина поглинання, що пов’язана з структурними особливостями досліджуваних розчинів без врахування флуктуацій;  $(\alpha f^{-2})_{\text{фл}}$  — флуктуаційна частина поглинання, яка пов’язана з процесами, що відбуваються у розчині при наближенні до критичної температури розшарування  $T_{\text{кр}}$ .

Регулярну частину поглинання, яка пов’язана зі змінами молекулярної структури розчину конформаційними процесами, утворенням асоціатів, димерів чи комплексів, для розчинів

із двома областями релаксації [13] ми знаходили в тому інтервалі термодинамічних параметрів, де вплив аномальних флуктуацій, які з'являються при підході до критичної точки, є незначним. Для цього за допомогою програми *Matcad* виконувалась обробка даних, в яких не спостерігалось аномальне поглинання (для  $\Delta T = T - T_{\text{кр}} > 2,1$  К), за формулою [13]

$$(\alpha f^{-2})_{\text{РЕГ}} = \left[ \frac{A_1}{(1 + (\omega\tau_1)^{2s})^{(m+n)/2s}} + \frac{A_2}{(1 + (\omega\tau_2)^{2s})^{(m+n)/(2s)}} \right] + B, \quad (4)$$

де  $\omega = 2\pi f$  — циклічна частота,  $\tau_1, \tau_2$  — час релаксації областей дисперсії;  $A_1, A_2$  — амплітуди відповідних областей релаксації;  $\lim_{f \rightarrow \infty} (\alpha f^{-2}) = B$  — високочастотна границя величини  $\alpha f^{-2}$ ; показники  $m, n, s \in (0, 1]$ , введені Хіллом [14] для врахування колективних процесів, визначають частотну залежність коефіцієнта поглинання звуку. Для досліджуваного розчину  $m = n = s = 1$  [14].

Отримані в результаті обробки залежності параметрів формули (4) від температури для усіх досліджених концентрацій розчину апроксимувались у температурну область, в якій спостерігається аномальне поглинання звуку. Це дало можливість згідно з формулою (3) за наявності експериментальних даних по поглинанню звуку та розрахованих значень регулярної складової поглинання отримати значення флуктуаційної складової коефіцієнта поглинання.

Флуктуаційну складову аналізували з використанням теорії релаксуючої теплоємності Феррела–Бхатачаржи [1, 15]

$$(\alpha f^{-2})_{\text{ФЛ}} = (\alpha f^{-2})_{\text{КР}} F(\Omega), \quad (5)$$

де  $(\alpha f^{-2})_{\text{КР}}$  — ефективний коефіцієнт поглинання ультразвуку (УЗ) в критичній точці;  $F(\Omega)$  — введена авторами [15] масштабна кросоверна функція;  $\Omega$  — масштабний параметр кросоверної функції,  $\Omega = \omega/\omega_D$ ,  $\omega_D$  — характеристична частота релаксації флуктуацій концентрації.

Для розчинів із критичною концентрацією характеристичну частоту релаксації  $\omega_D$  знаходимо за формулою [10]

$$\omega_D = \omega_0 t^{Z\nu}, \quad (6)$$

де  $\omega_0$  — амплітуда характеристичної частоти флуктуації концентрації;  $Z$  — динамічний критичний показник;  $\nu$  — критичний показник температурної залежності радіуса кореляції.

Згідно з (6), поблизу критичних точок, коли  $t \rightarrow 0$ , характеристична частота релаксації флуктуацій концентрації прямує до нуля.

Амплітуда характеристичної частоти флуктуації концентрації може бути обчислена з рівняння

$$\omega_0 = \frac{kT_{\text{кр}}}{3\pi\eta_0 R_0^3}, \quad (7)$$

де  $k$  — стала Больцмана;  $\eta_0$  — амплітуда динамічної в'язкості, значення якої отримане нами з реологічного експерименту,  $\eta_0 = (5,68 \pm 0,20)$  мкПас;  $R_0$  — амплітуда температурної залежності радіуса кореляції, яка за літературними даними має значення  $R_0 = (0,25 \pm 0,055)$  нм [2, 3]. Розраховане в такий спосіб значення амплітуди коефіцієнта поглинання

УЗ для нітробензолу–*n*-гексану становить  $\omega_0 = (4,85 \pm 0,55) \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$  нм і узгоджується із даними [2, 3].

Підставляючи в формулу (6) значення динамічного критичного показника  $Z = 3,065$  [10] та показника температурної залежності радіуса кореляції  $\nu = 0,63$  [6], з урахуванням величини  $\omega_0$ , для температурної залежності відносної частоти  $\Omega$  маємо

$$\Omega = 3,5 \cdot 10^{-11} f t^{-1,93}. \quad (8)$$

У формулі (8)  $f$  – частота, тоді  $\Omega$  є безрозмірною величиною.

Далі для знаходження значення ефективного коефіцієнта поглинання у критичній точці користуємося формулою [15]

$$(\alpha f^{-2})_{\text{кр}} = S f^{-[1+\alpha t/(Z\nu)]}, \quad (9)$$

де  $\alpha_t$  – критичний показник ізохорної теплоємності;  $\nu$  – критичний показник температурної залежності радіуса кореляції,  $Z$  – динамічний критичний показник, для яких у формулу (9) підставили значення  $\alpha_t = 0,091$  [9];  $Z = 3,065$  [10];  $\nu = 0,63$  [9]. Досліджуючи критичне поглинання звуку на різних частотах згідно з формулою (9), можемо знайти величину  $S$ , значення якої для нітробензолу–гексану дорівнює  $S = (2,68 \pm 0,83) \cdot 10^{-5} \text{ c}^{0,94} \text{ м}^{-1}$  [2, 3].

Таким чином, згідно з формулою (9) може бути обраховане критичне поглинання УЗ в критичній точці розшарування розчину нітробензол–гексан.

З урахуванням отриманих виразів для регулярної та флуктуаційної складових коефіцієнта поглинання маємо загальну формулу для розрахунку пронормованого коефіцієнта поглинання в розчині

$$a f = S \underbrace{\left[ 1 + 0,414 \cdot \left( \frac{2,5}{f} \right)^{0,53} \right]}_{(\alpha f^{-2})_{\text{фл}}} f^{-[1+\alpha/(z\nu)]} + \sum_{i=1}^2 \underbrace{\frac{A_i}{\left[ 1 + (\omega\tau_i)^{2s} \frac{m+n}{2s} \right]}}_{(\alpha f^{-2})_{\text{пер}}} + B. \quad (10)$$

Для розчинів з некритичною концентрацією перший доданок прямує до нуля і тоді (10) перетворюється на формулу (4).

Для перевірки справедливості формули (10), з використанням отриманих нами даних для швидкості поширення звуку  $c$ , на рис. 4 побудовано частотну залежність  $\alpha\lambda = \alpha f^{-2} c f$  для розчину з критичною концентрацією  $X_{\text{кр}} = 0,401$  мольних часток нітробензолу.

Узгодження отриманих експериментальних даних та наведених розрахунків, представлених на рис. 4, підтверджують справедливості використаної теорії.

Таким чином, проведено акустичне дослідження бінарного розчину нітробензол–*n*-гексан з різними концентраціями в інтервалі частот 5 – 2800 МГц поблизу його верхньої критичної точки розшарування.

Показано, що згідно з теорією динамічного скейлінгу результати дослідження швидкості розповсюдження звуку слід аналізувати окремо в трьох динамічних областях:  $\omega\tau_{\text{фл}} \ll 1$ ;  $\omega\tau_{\text{фл}} \gg 1$ ;  $\omega\tau_{\text{фл}} \sim 1$ , роль флуктуацій в яких, відповідно, або відсутня, або значна, або знаходиться на межі визначення. Аналіз температурних залежностей швидкості розповсюдження ультразвуку дозволив оцінити час життя флуктуацій концентрацій в розчині нітробензол–*n*-гексан при підході його до критичної точки з боку гомогенного стану на відстань 0,1 К:  $\tau_{\text{фл}} \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ .

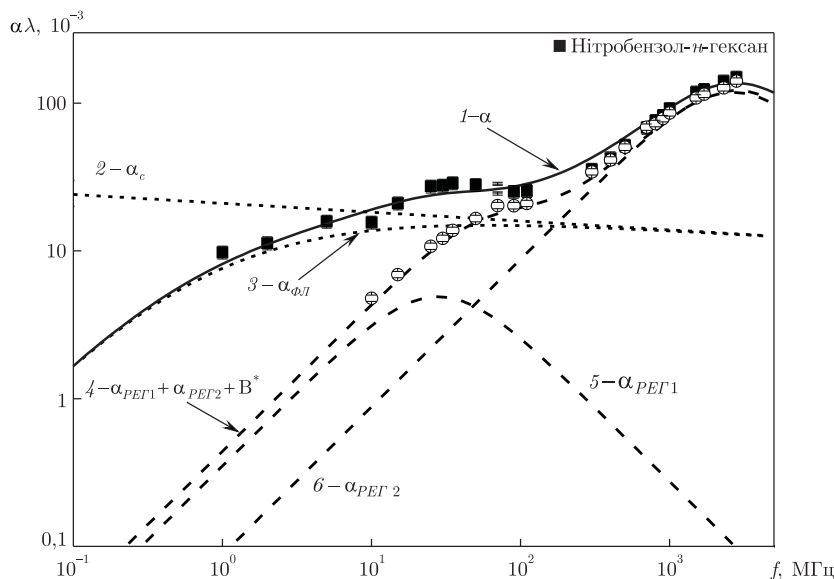


Рис. 4. Частотна залежність безрозмірної величини  $\alpha\lambda$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання, а  $\lambda$  – довжина хвилі ультразвуку для розчину нітробензол–*n*-гексан для  $T = 294,1$  К. Точки відповідають експериментальним результатам; наведені криві – теоретичним розрахункам: 1 – розрахована за формулою (10) величина  $\alpha\lambda$ ; 2 – розрахована за формулою (9) величина  $\alpha\lambda$  при  $T = T_{кр}$ ; 3 – розрахована за формулою (5) флуктуаційна складова поглинання  $(\alpha\lambda)_{фл}$ ; 4 – розрахована за формулою (4) регулярна складова поглинання  $(\alpha\lambda)_{рег}$ , 5 – розрахована регулярна складова  $\alpha\lambda$  для частот  $f > 300$  МГц; 6 – розрахована регулярна складова величини  $\alpha\lambda$  для частот  $5 \text{ МГц} < f < 300 \text{ МГц}$

Проведено аналіз коефіцієнта поглинання звуку в розчині нітробензол–*n*-гексан, який можна представити як суму регулярної та флуктуаційної частин. Показано, що застосування класичної теорії поглинання звуку та теорії динамічного скейлінгу дозволяє адекватно описати отримані експериментальні дані.

## Цитована література

1. *Bhattacharjee K., Mirzaev S. Z., Kaatze U.* Doesthe Viscosity Exponent Derive from Ultrasonic Attenuation Spectra // *Int. J Thermophys.* – 2012. – P. 469–483.
2. *Abdelraziq Issam R., Yun S. S., Stumpf F. B.* Critical behavior of the ultrasonic attenuation and velocity and shear viscosity for the binary mixture of nitrobenzene – *n*-hexane // *J. Acoustic. Soc. Am.* – 1990. – **89**, No 4. – P. 1831–1836.
3. *Mirzaev S. Z., Kaatze U.* Scaling function of critical binary mixtures: Nitrobenzene – *n*-hexane data revisited // *Chem. Phys.* – 2012. – **393**. – P. 129.
4. *Iwanowski I., Mirzaev S. Z., Orzechowski K., Kaatze U.* Critical dynamics at the col point of the ternary system methanol – *n*-hexane-cyclohexane // *J. Molecular Liquids.* – 2009. – **145**. – P. 103–108.
5. *Kozlovskii M. P.* Recurrence relations for the three-dimensional Ising-like model in the external field // *Condens. Matter. Phys.* – 2005. – **8**. – P. 473–506.
6. *Chalyi K. A., Bulavin L. A., Chalyi A. V.* Dynamic scaling and central component width of critical opalescence spectrum in liquids with restricted geometry // *J. Phys. Studies.* – 2005. – **9**, No 1. – P. 66–70.
7. *Шутлов В. А.* Основы физики ультразвука. – Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
8. *Fizman M.* Absorption and Dispersion of Sound in Critical Mixtures // *J. Chem. Phys.* – 1962. – **36**. – P. 1961. – 1964.
9. *Паташинский А. З., Покровский В. Л.* Флуктуационная теория фазовых переходов. – Москва: Наука, 1982. – 382 с.
10. *Анисимов М. И.* Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. – Москва: Наука, 1987. – 382 с.



11. *Artemenko S., Lozovsky T., Mazur V.* Multiple critical points and liquid – liquid equilibria from the van der Waals like equations of state // *J. of Physics: Condensed Matter.* – 2008. – **20**. – 244119, 8 p.
12. *Bulavin L. A., Chekhun, V. F. Vasilkevich O. A. et al.* Neutron investigations of self-diffusion of water molecules in plasmatic membrans // *J. Phys. Studies.* – 2004. – **8**, No 4. – P. 334–337.
13. *Сперкач В. С., Альохін О. Д., Білоус О. І.* Акустичні властивості рідинних систем поблизу критичної температури // *УФЖ.* – 2004. – **49**, № 7. – С. 655–659.
14. *Hill R. M.* Plastic Behaviour of Sheet Metal // *Phys. Stat. Sol.* – 1981. – **103**, No 1. – P. 231–239.
15. *Bhattacharjee J. K., Ferrell R. A.* Dynamic scaling theory for the critical ultrasonic attenuation in a binary liquid // *Phys. Rev. A.* – 1981. – **24**. – P. 1643–1647.

## References

1. *Bhattacharjee K., Mirzaev S. Z., Kaatz U.* *Int. J Thermophys*, 2012: 469–483.
2. *Abdelraziq Issam R., Yun S. S., Stumpf F. B.* *J. Acoustic. Soc. Am.*, 1990, **89**, No 4: 1831–1836.
3. *Mirzaev S. Z., Kaatz U.* *Chem. Phys.*, 2012, **393**: 129.
4. *Iwanowski I., Mirzaev S. Z., Orzechowski K., Kaatz U.* *J. Molecular Liquids*, 2009, **145**: 103–108.
5. *Kozlovskii M. P.* *Condens. Matter. Phys.*, 2005, **8**: 473–506.
6. *Chalyy K. A., Bulavin L. A., Chalyi A. V.* *J. Phys. Studies*, 2005, **9**, No 1: 66–70.
7. *Shytilov V. A.* *Basics of ultrasound physics*, Leningrad, Izd. LU, 1980.
8. *Fizman M. J.* *Chem. Phys.*, 1962, **36**: 1961–1964.
9. *Patashinskii A. Z., Pokrovsky V. L.* *Fluctuation theory of phase transitions*. Moscow, Nauka, 1982 (in Russian).
10. *Anisimov M. A.* *Critical phenomena in liquid crystals*, Moskva, Nauka, 1987 (in Russian).
11. *Artemenko S., Lozovsky T., Mazur V.* *J. of Phys. Condensed Matter.*, 2008, **20**: 244119,8.
12. *Bulavin L. A., Chekhun, V. F. Vasilkevich O. A. et al.* *J. Phys. Studies*, 2004, **8**, No 4: 334–337.
13. *Sperkach V. S., Alekhin A. D., Bilous O. I.* *Ukr. J. Phys.*, 2004, **49**: 655–658.
14. *Hill R. M.* *Phys. Stat. Sol.*, 1981, **103**, No 1: 231–239.
15. *Bhattacharjee J. K., Ferrell R. A.* *Phys. Rev. A*, 1981, **24**: 1643–1647.

*Надійшло до редакції 10.02.2016*

Академик НАН України **Л. А. Булавин, О. И. Білоус, О. С. Свечникова**

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

*E-mail:* o\_bilous@ua.fm

## Скорость и поглощение звука в растворе нитробензол–*n*-гексан вблизи критической температуры расслоения

*Проведено акустическе дослідження бінарного розчину нітробензол–*n*-гексан при різних концентраціях в широкому інтервалі частот вблизи його верхньої критическої точки розслоєння. Показано, що згідно теорії динаміческого скейлінга результати дослідження швидкості розповсюдження звука слід аналізувати окремо в трьох динаміческих областях, роль флуктуацій в котрих, відповідно, або відсутствует, або*

существенна, либо находится на границе определения. Анализ температурных зависимостей скорости распространения ультразвука позволил оценить время жизни флуктуаций концентраций в растворе нитробензол–*n*-гексан при подходе его к критической точке со стороны гомогенного состояния на расстояние 0,1 К.

**Ключевые слова:** скорость, поглощение ультразвука, критическая точка расслоения, бинарный раствор, время жизни флуктуаций концентраций.

Academician of the NAS of Ukraine **L. A. Bulavin, O. I. Bilous, O. S. Svechnikova**

Taras Shevchenko National University of Kiev

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the NAS of Ukraine, Kiev

*E-mail:* o\_bilous@ua.fm

### **The velocity and absorption of sound near the critical point of stratification in the solution nitrobenzene–*n*-hexane**

*The acoustic research of a binary solution nitrobenzene–*n*-hexane with various concentrations in a wide range of frequencies near its upper critical point of stratification is executed. It is shown that, by the dynamic scaling theory, the velocity of sound should be analyzed separately in three dynamic areas, where the role of fluctuations is absent, significant, or is on the verge of definition. Analysis of the temperature dependence of the velocity of ultrasound allowed us to estimate the lifetime of fluctuations of the concentration in the solution nitrobenzene–*n*-hexane at its approach to the critical point from the homogeneous state up to 0.1 K.*

**Keywords:** velocity, absorption of ultrasound, critical point of stratification, binary mixture, lifetime of fluctuations of the concentration.