

И. Л. ФАБЕЛИНСКИЙ и О. А. ШУСТИН

ДИСПЕРСИИ СКОРОСТИ ЗВУКА В НЕКОТОРЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ

(Представлено академиком Г. С. Ландсбергом 10 VII 1953)

1. Дисперсия скорости звука принадлежит к числу принципиальных вопросов физики и многократно изучалась теоретически и экспериментально. До последнего времени экспериментальные данные для жидкости нельзя было считать сколько-нибудь надежными. Теперь твердо установлена дисперсия скорости звука в сероуглероде и в уксусной кислоте на частотах вплоть до $2 \cdot 10^8$ гц (1). Увеличение частоты и измерения на весьма высоких частотах ультразвука встречают существенные трудности, пока не преодоленные. Между тем в большинстве изученных жидкостей поглощение не обнаруживает отступления от квадратичного хода с частотой до $2,8 \cdot 10^8$ гц. Представляется целесообразным поэтому провести измерение скорости звука на частотах $\sim 10^{10}$ гц по тонкой структуре линии релеевского рассеяния в жидкости.

2. Как известно (2), расстояние между смещенной и несмещенной линиями тонкой структуры $\Delta\nu$ определяется соотношением:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \pm 2n \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

где ν — частота возбуждающего света, n — коэффициент преломления, θ — угол рассеяния, v — скорость звука, c — скорость света. Поскольку релеевское рассеяние под прямым углом соответствует упругим волнам частоты 10^{10} гц, появляется возможность определить скорость звука v на этих недоступных пока искусственному генерированию частотах. Попытки найти дисперсию скорости звука по тонкой структуре линии рассеяния света были предприняты Рао (3) и Венкатесвараном (4). Эти работы дали противоречивые результаты. Рао нашел отрицательную дисперсию в ацетоне и положительную дисперсию в четыреххлористом углероде. Венкатесваран не обнаружил никаких следов дисперсии скорости звука в 17 изученных им жидкостях, в том числе в четыреххлористом углероде и бензоле. С другой стороны, хорошо известно (5), что, полагая коэффициент поглощения звука в бензол $\alpha \sim f^2$ на частоте $f \simeq 10^{10}$ гц, получим $\alpha\lambda = 12$ (λ — длина волны звука). Между тем, в бензоле существует отчетливо наблюдаемая тонкая структура, а это приводит к выводу, что $\alpha\lambda \ll 1$. Следовательно, при повышении частоты $\alpha\lambda$ проходит через максимум, существенно уменьшаясь к частоте 10^{10} гц.

Изложенные здесь кратко рассуждения привели М. А. Леонтовича и Л. И. Мандельштама (6) к созданию релаксационной теории поглощения звука в жидкости. Мы воспользуемся этой теорией, чтобы

оценить, в каком случае можно ожидать значительной дисперсии скорости звука и в каком случае заметной дисперсии ожидать нельзя. Коэффициент поглощения α на 1 см длины определяется выражением:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_{\eta'} = \frac{\omega^2}{2v_0^3\rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \eta' \right), \quad (2)$$

где α_n и $\alpha_{\eta'}$ — коэффициенты поглощения, вызванные первым η и вторым η' коэффициентами вязкости; ω — циклическая частота звука; ρ — плотность и v_0 — скорость звука для бесконечно малой частоты.

Релаксационная теория ⁽⁶⁾ дает:

$$\alpha_{\eta'} = \frac{\omega^2 \tau (v_\infty^2 - v_0^2)}{2v_0^3 (1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad (3)$$

где τ — время релаксации второго коэффициента вязкости, v_∞ — скорость звука для бесконечно большой частоты. Полагая в ультразвуковой области $\omega\tau \ll 1$, находим из (3) и (2)

$$\tau = \frac{\eta'}{\rho (v_\infty^2 - v_0^2)}. \quad (4)$$

Из (4) и (2) вытекает, что

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{2v_0^3\rho} \frac{\eta'}{\tau}. \quad (5)$$

Соотношение (5) отчетливо показывает, что ожидать значительной дисперсии скорости можно лишь в том случае, когда велико η' и мало τ .

На основании проделанного здесь расчета и экспериментального определения ⁽⁷⁾ η' можно оценить, каково наименьшее изменение скорости ультразвука, например в бензоле, при переходе через область релаксации второго коэффициента вязкости η' . Из экспериментальных данных ⁽⁸⁾ известно, что в бензоле до частоты звука $f = 1,65 \cdot 10^8$ гц коэффициент поглощения α остается пропорциональным f^2 . Это значит, что время релаксации $\tau < 1/2\pi f = 9,6 \cdot 10^{10}$ сек. Пользуясь соотношением (5), находим, что $\Delta v/v > 3\%$ или $\Delta v > 40$ м/сек. Поскольку в бензоле наблюдается отчетливая тонкая структура ($\alpha\lambda \ll 1$), то частота 10^{10} гц, ответственная за образование тонкой структуры, лежит за область релаксации η' . Следовательно, измерение скорости звука по тонкой структуре должно выявить дисперсию во всяком случае большую 3%. Описанным способом может быть оценена нижняя граница измерения скорости в ряде других жидкостей.

Таким образом, если верна релаксационная теория, то следует ожидать вполне заметного изменения скорости звука, доступного экспериментальному обнаружению в таких жидкостях, как, например, бензол и четыреххлористый углерод. Для экспериментальной проверки этого заключения может служить, как уже указывалось, тщательное исследование тонкой структуры линии релеевского рассеяния.

3. Экспериментальная установка, на которой были выполнены все измерения, будет описана подробно в другом месте.

В табл. 1 приводятся результаты определения скорости звука в бензоле по тонкой структуре линии релеевского рассеяния с использованием формулы (1). Обработано 10 снимков. Различные снимки соответствуют несколько отличающейся температуре жидкости. Поэтому измеренные скорости приведены к температуре 20°. Температурный коэффициент скорости взят из ультразвуковых измерений ⁽⁹⁾. Это замечание относится ко всем трем исследованным жидкостям.

Таблица 1

Скорость гиперзвука, определенная по тонкой структуре линии релеевского рассеяния в бензоле при 20°

(скорость ультразвука $v = 1324$ м/сек)

№№ снимков	1	2	4	5	6	13	14	15	16	22	Средн.
Скорость гиперзвука в м/сек	1465	1435	1460	1485	1480	1485	1425	1460	1430	1495	1470 ± 26

Из полученных данных следует, что $\Delta v / v = 10,4\%$. Величина найденной дисперсии лежит далеко за пределами случайных ошибок измерения.

Таблица 2

Скорость гиперзвука, определенная по тонкой структуре линии релеевского рассеяния в толуоле при 20°

(скорость ультразвука $v = 1305$ м/сек)

№№ снимков	1	3	8	10	12	Средн.
Скорость гиперзвука в м/сек	1275	1275	1320	1300	1305	1297 ± 20

В случае толуола в пределах точности мы не можем обнаружить дисперсию скорости звука.

По данным наших измерений, в четыреххлористом углероде получено $\Delta v / v \approx 16\%$. Данные этих измерений основываются всего на трех снимках и поэтому они значительно менее достоверны, чем данные для бензола и толуола, и их следует рассматривать лишь как ориентировочные.

Пользуясь формулами (3) и (5) или (4) и данными измерения η' , найдем $\alpha\eta'$, τ и полное поглощение звука α в жидкости на частоте 10^{10} гц.

В табл. 3 приведены результаты таких расчетов для бензола.

Таблица 3

Поглощение звука на частоте $\sim 10^{10}$ гц в бензоле

Вещество	$\frac{\Delta v}{v}$	$\eta \cdot 10^3$ пуаз	η' пуаз	$\tau \cdot 10^{10}$ сек.	$\alpha_{\eta} \cdot 10^{-3}$ см ⁻¹	$\alpha_{\eta'} \cdot 10^{-3}$ см ⁻¹	$\alpha \cdot 10^{-3}$ см ⁻¹	$\alpha\Lambda$
Бензол	0,104	6,5	0,866	2,44	4,42	3,62	8,04	0,16

Принимая для четыреххлористого углерода ориентировочно $\Delta v / v = 16\%$, получим $\tau \approx 6,7 \cdot 10^{-11}$ сек. и $\alpha \approx 32 \cdot 10^3$ см⁻¹ и, следовательно, $\alpha\Lambda \approx 0,67$.

Если α , измеренное в толуоле на ультразвуковых частотах, экстраполировать к частотам $\sim 10^{10}$ гц по квадратичному закону, то получим $\alpha \approx 32 \cdot 10^3$ см⁻¹ и $\alpha\Lambda = 0,65$. Из этих расчетов следует, что отчетливость картины тонкой структуры в толуоле должна быть такая же, как в четыреххлористом углероде, однако опыт этого не подтверждает. Поэтому следует предположить, что для толуола частота $\sim 10^{10}$ гц лежит за областью релаксации η' . Полагая в толуоле τ того же порядка,

что и в бензоле, получим $\Delta v/v \simeq 0,08\%$. Такое малое изменение скорости не может быть установлено нашим методом.

В этом случае $\alpha\Delta \simeq 0,1$, т. е. в согласии с опытом в толуоле тонкая структура выражена отчетливее, чем в четыреххлористом углероде и бензоле.

Оцененные здесь величины поглощения α должны определять ширину компонент тонкой структуры линии релеевского рассеяния света в жидкостях.

Авторы выражают благодарность акад. Г. С. Ландсбергу за интерес к нашему исследованию и детальное обсуждение этой работы.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступило
17 II 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ T. Lamb, T. Andreae, Nature, **167**, 898 (1951); T. Lamb, T. Pinkerton, Proc. Roy. Soc., **199**, 114 (1949). ² Л. И. Мандельштам, ЖРФХО, 831 (1926), ³ B. V. R. Rao, Proc. Ind. Acad. Sci., **7**, 163 (1938). ⁴ C. S. Venkateswaran, ibid., **15**, 371 (1942). ⁵ М. А. Леонтович, Л. И. Мандельштам, ДАН, **12**, 111 (1936). ⁶ М. А. Леонтович, Л. И. Мандельштам, ЖЭТФ, **7**, 438 (1937). ⁷ П. А. Бажулин, Труды ФИАН, **5**, 261 (1950). ⁸ R. A. Rupano, Phys. Rev. **72**, 79 (1947). ⁹ E. Hiedemann, Ultraschallforschung, Berlin, 1939.