

И. Г. МИХАЙЛОВ и С. Б. ГУРЕВИЧ

ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТЯХ С ОЧЕНЬ БОЛЬШОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 27 III 1947)

Как известно, поглощение ультразвуковых волн в жидкостях в большинстве случаев значительно больше поглощения, вычисленного по классической теории Стокса — Кирхгофа. Мандельштам и Леонтович⁽¹⁾ указали, что это расхождение может быть объяснено тем, что при рассмотрении акустических явлений нельзя пренебрегать влиянием второй, объемной вязкости.

Если учесть объемную вязкость, то при решении обычных гидродинамических уравнений выражение для коэффициента поглощения может быть получено в следующем виде*:

$$\alpha = \frac{2\pi^2\nu^2}{\rho a^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \eta' \right), \quad (1)$$

где η — коэффициент обычной вязкости, η' — коэффициент объемной вязкости, ν — частота, a — скорость звука и ρ — плотность.

Так как экспериментальные значения коэффициента поглощения в различных жидкостях в среднем в 10—100 раз больше вычисленных, то приходится допустить, что поглощение ультразвуковых волн определяется главным образом вторым членом в уравнении (1), зависящим от объемной вязкости.

Далее Мандельштамом и Леонтовичем было показано, что вторая вязкость имеет релаксационный характер и в конечном счете сама зависит от частоты. При достаточно больших частотах и вязкостях, когда $\omega\tau \gg 1$ (τ — время релаксации объемной вязкости), поглощение, вызванное второй вязкостью, перестает зависеть от частоты и стремится к некоторому пределу.

Однако пренебрегать влиянием обычной вязкости на поглощение ультразвуковых волн в жидкости не всегда возможно. Более того, известен ряд случаев, когда поглощением, вызванным второй вязкостью, можно пренебречь по сравнению с поглощением, вызванным обычной вязкостью. Так, из работ Гунтера⁽²⁾, Вилларда⁽³⁾ и Бажулина⁽⁵⁾ следует, что поглощение ультразвуковых волн в глицерине и в некоторых вязких маслах в пределах погрешности соответствует вычисленному из обычного уравнения Стокса**

$$\alpha = \frac{8\pi^2\nu^2}{3a^3\rho} \eta. \quad (2)$$

* Пренебрегая поправкой Кирхгофа на поглощение, зависящее от теплопроводности.

** В глицерине и в маслах вторая вязкость не должна быть равна нулю. Для того, чтобы объяснить эти результаты, приходится допустить, что в указанных веществах вторая вязкость релаксирует при сравнительно низких частотах.

Если считать, что при больших вязкостях поглощение ультразвуковых волн определяется главным образом обычной вязкостью, то нетрудно убедиться, что при достаточно больших ν и η выражение Стокса (2) перестает быть справедливым. Действительно, если взять расплавленное аморфное твердое тело, то при его охлаждении, т. е. при увеличении вязкости, поглощение ультразвуковых волн должно было бы непрерывно расти и в пределе, при затвердевании, достигло бы столь больших значений, что твердое тело явилось бы практически звуконепроницаемым.

Такой ход поглощения в зависимости от вязкости не соответствует действительности. Хорошо известно, что твердые аморфные тела (например стекло), которые можно рассматривать как жидкости с очень большой вязкостью, обладают вполне заметной звукопроводностью. В этом случае поглощение ультразвуковых волн должно достигать максимума и затем падать при увеличении вязкости.

Это явление, представляющее большой интерес для общей теории поглощения ультразвуковых волн, никем еще, однако, не исследовалось. В связи с этим нами было начато экспериментальное изучение поглощения ультразвуковых волн в расплавленных аморфных твердых телах. Ниже мы публикуем предварительные результаты измерения поглощения ультразвука в канифоли в интервале температур от 145 до 40°С при двух частотах: 1,52 и 3,04 МГц. В этом температурном интервале вязкость канифоли изменяется приблизительно от нескольких пуаз до 10⁹ пуаз*.

Измерение поглощения производилось механическим методом, путем наблюдения отклонения под действием звукового давления легкого металлического крылышка. Это крылышко помещалось в дополнитель-

Т а б л и ц а 1

$t, ^\circ\text{C}$	α	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17}$	$t, ^\circ\text{C}$	α	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17}$	$t, ^\circ\text{C}$	α	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17}$
$\nu = 1,52 \text{ МГц}$								
145	0,06	2 600	116	~1,1	47 500	62	0,48	20 800
134	0,12	5 200	75	~1,2	52 000	60	0,44	19 000
126	0,22	9 540	72	~1	43 000	54	0,34	14 700
124	0,33	14 300	70	0,66	28 800	50	0,30	13 000
120	0,46	20 000	67	0,58	25 000	42	0,20	8 650
$\nu = 3,04 \text{ МГц}$								
145	0,22	2 390	131	0,51	5 500	57	0,60	6 500
142	0,27	3 040	127	~	13 800	54	0,44	4 770
138	0,32	3 470	60	0,72	7 800	42	0,31	3 370
135	0,42	4 550						

ную кювету, изготовленную из тонкого алюминия (хорошо пропускающего звук) и заполненную трансформаторным маслом. Дополнительная кювета погружалась в основную кювету с расплавленной канифолью и могла перемещаться в ней на разные расстояния от источника ультразвуковых колебаний. На каждом расстоянии наблюдалась температурная зависимость интенсивности звука и затем сравнивались значения, полученные на разных расстояниях при одной и той же температуре.

* Значение вязкости канифоли 10⁹ пуаз при 40°С взято из работы Кобеко, Кувшинского и Гуревича (*).

Из этих данных можно легко вычислить коэффициент поглощения для каждой температуры (вязкости).

В табл. 1 и на рис. 1 и 2 даны результаты измерений.

Из этих результатов видно, что поглощение ультразвуковых волн в расплавленной канифоли действительно имеет максимум, причем поглощение в этом максимуме настолько велико, что получить численное значение коэффициента не оказалось возможным. При низких температурах (больших вязкостях) коэффициент поглощения уменьшается с увеличением вязкости.

Повидимому, при объяснении этих явлений необходимо, кроме

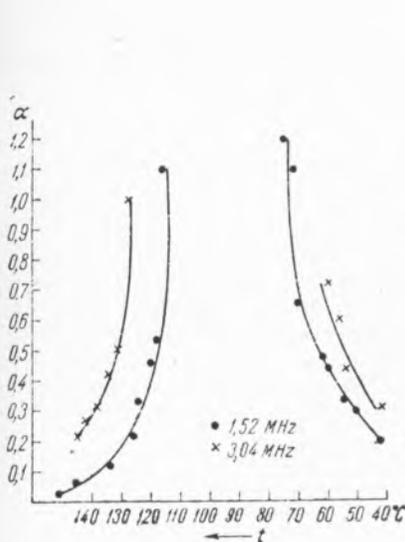


Рис. 1

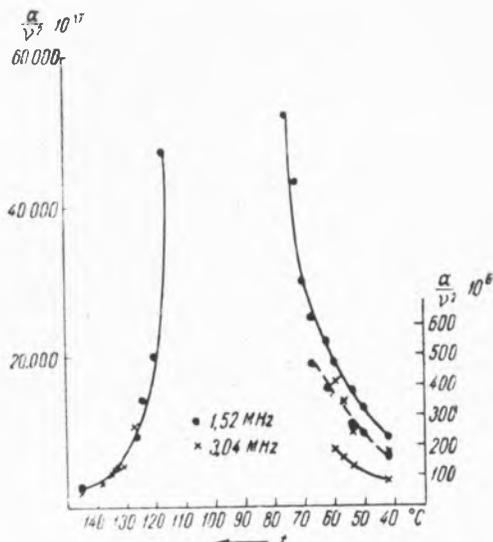


Рис. 2

релаксации объемной вязкости, учитывать и релаксацию обычной, сдвиговой вязкости.

Феноменологическая теория поглощения ультразвуковых волн в аморфных телах с учетом релаксации также и обычной вязкости была дана Френкелем и Образцовым, а также Исаковичем (4).

В предельном случае больших вязкостей и частот выражение для коэффициента поглощения может быть получено в следующем виде:

$$\alpha = \frac{\rho}{2a_{\infty}^3} \left[\frac{(a_{\infty}^2 - a_0^2)_{\tau_1}^2}{4,3\eta} + \frac{(a_{\infty}^2 - a_0^2)_{\tau_1'}^2}{\eta'} \right], \quad (3)$$

где $(a_{\infty}^2 - a_0^2)_{\tau_1}$ — величина дисперсии, обусловленная релаксацией обычной вязкости, и $(a_{\infty}^2 - a_0^2)_{\tau_1'}$ — дисперсия, вызванная релаксацией объемной вязкости.

Из этого выражения следует, что, во-первых, коэффициент поглощения не должен зависеть от частоты, и во-вторых, в случае, если квадрат дисперсии не растет с увеличением вязкости быстрее, чем сама вязкость, коэффициент поглощения уменьшается с увеличением коэффициента вязкости.

Однако, как видно из наших экспериментальных результатов, при больших вязкостях коэффициент поглощения зависит от частоты, что не согласуется с выводами, вытекающими из уравнения (3). Это указывает на то, что данное явление имеет более сложный характер.

Ввиду больших трудностей, встретившихся при измерениях, ошибки измерений не удалось снизить ниже 20—30%. Вследствие этого уста-

новить точно характер частотной зависимости затруднительно. Однако в пределах точности измерения можно сказать, что при малых вязкостях (большие температуры) коэффициент поглощения достаточно хорошо следует квадратичной зависимости в согласии с выражением (2) Стокса (рис. 2).

Что касается больших вязкостей (низкие температуры), то наиболее удовлетворительные результаты получаются, если считать, что α изменяется пропорционально $\nu^{1/2}$ * (рис. 2, пунктирная кривая).

Исходя из релаксационной теории, следует прийти к выводу, что в области максимума поглощения должна наблюдаться дисперсия звука. Однако экспериментальное наблюдение дисперсии при частотах 10^6 — 10^7 невозможно вследствие очень большого поглощения в этой области. Повидимому, дисперсию звука в канифоли можно наблюдать при более низких частотах.

Физический институт
Ленинградского государственного
университета

Поступило
27 III 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Л. Мандельштам и М. Леонтович, ЖЭТФ, 7, 491 (1937); ДАН, 3, 111 (1936). ² J. Z. Hunter, J. Ac. Soc. Am., 13, 36 (1941). ³ G. Willard, *ibid.*, 4, 12, 438 (1941). ⁴ Я. И. Френкель и Ю. Н. Образцов, ЖЭТФ, 9, 1081 (1939); Я. И. Френкель, Кинетическая теория жидкостей, изд. АН СССР, 1945, стр. 210—222; М. А. Исакович, ДАН, 23, № 8, 782 (1939). ⁵ П. А. Бажулин, ДАН, 31, № 2 (1941). ⁶ П. П. Кобеко, Е. В. Кувшинский и Г. И. Гуревич, Изв. АН СССР, сер. физ., 3, 329 (1937).

* Отступление от квадратичной зависимости от частоты коэффициента поглощения было также обнаружено Бажулиным в касторовом масле⁽⁵⁾.