

И. Г. МИХАЙЛОВ и В. А. СОЛОВЬЕВ

## ПРОСТОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 19 III 1951)

Для газов и жидкостей в настоящее время существует большое число методов измерения поглощения ультразвуковых волн, но для твердых тел число таких методов невелико.

При частотах выше  $10^6$  гц успешно применяется импульсная методика (см., например, (1)). Для прозрачных сильно поглощающих твердых тел возможно также использование оптических методов, основанных на наблюдении дифракции света на ультразвуковой решетке (2). На сравнительно низких частотах (приблизительно до  $10^5$  гц) применяются резонансные методы (3-6). Недавно М. А. Исаковичем (7) был предложен изящный метод измерения скорости и затухания продольных и поперечных ультразвуковых волн по изменению акустических свойств столба жидкости при заполнении части его сечения исследуемым веществом (этот метод также использует импульсную технику).

Ниже мы даем описание разработанного нами метода измерения поглощения ультразвуковых волн в сильно поглощающих твердых телах. Этот метод достаточно прост и дает вполне удовлетворительные результаты. Схематический чертеж установки приведен на рис. 1. Ультразвуковые колебания, возбуждаемые изоэластической кварцевой пластинкой  $Q$ , передаются через алюминиевый стержень  $L$  в ванну с водой  $M$ . На пути распространяющегося в воде узкого пучка ультразвуковых волн помещается призма  $ABC$  из исследуемого материала. Интенсивность прошедшего через призму звука измеряется каким-либо приемником  $R$ , поставленным на пути преломленного «луча». Нами применялись механический (радиометр) и пьезоэлектрический приемники. Чтобы исключить ошибку из-за расходимости пучка, сечение его должно быть меньше площади приемника. Путь ультразвукового «луча» показан на рис. 1 пунктиром. Перемещение призмы позволяет менять длину пути, проходимого ультразвуковой волной в исследуемом веществе, не меняя условий отражения. Для того чтобы преломленный «луч» при перемещении призмы не уходил в сторону от приемника, грань  $AC$  призмы устанавливалась перпендикулярно падающему «лучу» и перемещение призмы производилось в направлении грани  $AB$ . Легко видеть, что при такой установке «луч» преломляется только при выходе из призмы на грани  $AB$ , причем точка  $O$ , в которой луч преломляется, не смещается при перемещении призмы. Из чертежа видно, что изменение толщины поглощающего слоя  $\Delta x$  при перемещении призмы на длину  $\Delta l$  выражается формулой

$$\Delta x = \Delta l \sin \delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  — преломляющий угол призмы. Интенсивность прошедшего звука при толщине поглощающего слоя  $x$  будет:

$$I = I_0 e^{-2(\alpha + \alpha_0)x}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — амплитудный коэффициент поглощения исследуемого вещества, а  $\alpha_0$  — коэффициент поглощения воды. Измерения этим методом могут быть проведены вообще только при не слишком малых значениях  $\alpha$ , и поэтому можно обычно пренебрегать поглощением в воде. Тогда

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}. \quad (3)$$

При измерении поглощения этим методом влияние отражения автоматически исключается, так как для вычисления  $\alpha$  необходимо знать только от-

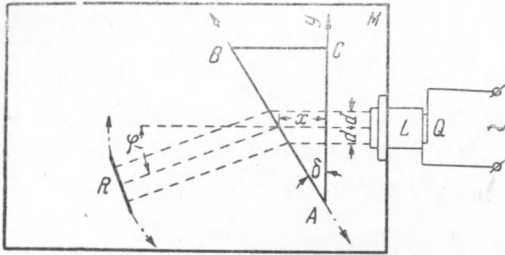


Рис. 1

носительные значения интенсивности прошедшего через призму ультразвукового пучка. Интерференции здесь также не происходит, так как «луч», отраженный от грани  $AB$ , уходит в сторону и после нескольких отражений затухает внутри призмы.

Для иллюстрации способа вычисления  $\alpha$  проводим несколько экспериментальных графиков зависимости  $\ln I$  от  $x$  (см. рис. 2). Из этого рисунка видно, что точки хорошо ложатся на прямые, как и должно быть по формуле (3). Коэффициент поглощения вычисляется как половина тангенса угла наклона этих прямых.

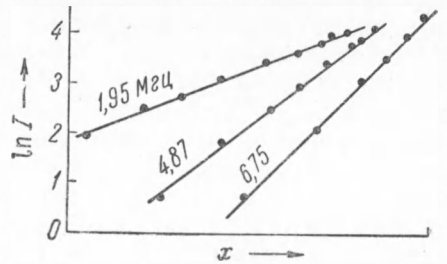


Рис. 2. Полиметилметакрилат

Может показаться, что формула (3) неприменима в нашем случае, так как  $x$  заметно меняется на протяжении ширины пучка. Легко показать, однако, что это не может внести ошибки в измерения. Действительно, пусть ширина пучка равна  $2d$  (см. рис. 1), а толщина призмы в месте прохождения середины пучка  $x$ . Интенсивность луча, прошедшего через призму на расстоянии  $y$  от середины пучка

$$I(y) = I_0(y) e^{-2\alpha(x+y \operatorname{tg} \delta)}. \quad (4)$$

Здесь  $I_0$  также зависит от  $y$ , так как пучок может быть неоднородным. Показания приемника пропорциональны полной энергии падающего пучка, т. е. формулу (4) надо проинтегрировать по всей ширине пучка:

$$\int_{-d}^{+d} I(y) dy = \int_{-d}^{+d} I_0(y) e^{-2\alpha(x+y \operatorname{tg} \delta)} dy = e^{-2\alpha x} \int_{-d}^{+d} I_0(y) e^{-2\alpha y \operatorname{tg} \delta} dy = I_0' e^{-2\alpha x}. \quad (5)$$

Таким образом, опять получилась формула вида (3).

В наших измерениях применялись призмы с преломляющим углом  $\delta \approx 30^\circ$ ; преломляющий угол измерялся методом автоколлимации. Раз-

меры призм позволяли менять толщину поглощающего слоя приблизительно на 3 см. С такими призмами оказалось возможным измерять коэффициенты поглощения приблизительно от 0,1 до 1 см<sup>-1</sup>. Расширение этих пределов в сторону меньших  $\alpha$  возможно только за счет увеличения преломляющего угла или размеров призмы, но эти возможности, очевидно, ограничены. Возможность же измерения этим методом больших коэффициентов поглощения ограничивается только чувствительностью приемника, так как преломляющий угол призмы может быть сделан достаточно малым.

Погрешность наших измерений составляет около 10% при  $\alpha \approx 0,1$  и около 5% при  $\alpha \approx 1$ . На точность измерений могут оказывать влияние паразитные пучки, отражающиеся от стенок ванны и попадающие на приемник. Для проверки влияния этого фактора стенки ванны покрывались поглощающим материалом (губчатая резина), но эта предосторожность оказалась излишней, так как никаких изменений в результате замечено не было.

В данной работе с помощью вышеописанного метода изучалась частотная зависимость коэффициента поглощения в вязко-упругих телах. Имеющиеся в литературе сведения по этому вопросу немногочисленны и противоречивы. В слабо поглощающих твердых телах (стекла, алюминий) была найдена линейная зависимость  $\alpha$  от частоты (1). Есть указания и на нелинейную (но все же степенную) зависимость в ряде металлов (2). В канифоли и полиметилметакрилате в смежном диапазоне частот была ранее обнаружена зависимость, близкая к  $\alpha \sim \sqrt{\nu}$  (3, 4).

Таблица 1

Коэффициент поглощения в вязко-упругих телах

Вещество	$\nu=1,95$ Мгц	$\nu=2,19$ Мгц	$\nu=4,87$ Мгц	$\nu=6,48$ Мгц	$\nu=6,75$ Мгц	Скорость звука в м/сек
Канифоль . . . . .	0,11 <sub>5</sub>	0,17 <sub>5</sub>	0,33	0,45	—	2200
Полиметилметакрилат . . . . .	0,33	0,43	0,68	0,86	0,91	2600
Полистирол . . . . .	0,11	0,14	0,23 <sub>5</sub>	0,33 <sub>5</sub>	0,35	2300
Битум . . . . .	1,8	2,4	3,1	—	3,9	—

В табл. 1 приведены результаты наших измерений для полиметилметакрилата, полистирола, канифоли и ухтинского легкоплавкого битума (температура размягчения  $\approx 96^\circ$ ) при частотах от 2 до 6,75 Мгц. Данные для битума были получены другим методом — на пути ультразвукового пучка помещалась не призма, а плоско-параллельные пластинки разной толщины. В случае битума применение такого метода вполне допустимо, так как большое поглощение исключает интерференцию\*.

На рис. 3 мы приводим логарифмический график зависимости  $\alpha$  от  $\nu$  при температуре около  $18^\circ$  (численные значения  $\alpha$ , отложенные по оси ординат справа, относятся к битуму). Из приведенных данных видно, что хотя в этом диапазоне частот зависимость  $\alpha$  от  $\nu$  и может быть в пределах погрешности представлена степенными функциями (пунктирные линии), но общей для всех веществ зависимости не существует и показатели степени оказываются дробными. С другой сто-

\* Аналогичный метод был применен Иви, Мроука и Гуттом (5) для измерения поглощения в каучуках. Эти авторы пользовались импульсной методикой, хотя при больших поглощениях в этом нет никакой необходимости.

роны, из ряда других работ следует, что зависимость  $\alpha$  от  $\nu$  вообще не является степенной (по крайней мере, в полимерах), и, следовательно, можно предполагать, что изгиб наших кривых вполне реален. Это заключение подтверждается также и результатами измерений в каучуках в значительно более широком диапазоне частот<sup>(9)</sup>.

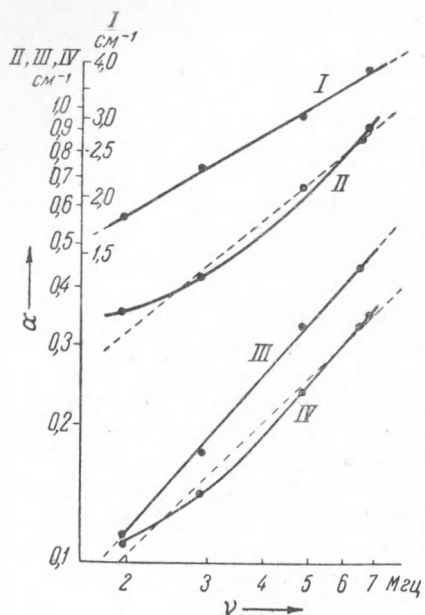


Рис. 3. I — битум, II — полиметилметакрилат, III — канифоль, IV — полистирол

В табл. 1 приведены также приблизительные значения скорости звука, полученные из измерения угла отклонения пучка при прохождении через призму (угол  $\phi$  на рис. 1; пучок отклоняется к вершине призмы, так как скорость звука в воде меньше, чем в твердых телах). Этот угол не может быть измерен достаточно точно из-за большой ширины пучка. Кроме того, перераспределение интенсивностей по ширине пучка (формула (2)) вносит систематическую погрешность (значение скорости получается преувеличенным), которая может быть значительной при большом поглощении. Вследствие указанных причин погрешность при измерении скорости достигает 10%. Поэтому приведенные значения характеризуют только порядок величины скорости.

Следует отметить еще одно обстоятельство. На практике даже при нормальном падении продольной звуковой волны на границу твердого тела в нем всегда может образоваться, кроме продольной, еще и достаточно интенсивная поперечная волна. В нашем случае скорость поперечной волны должна быть меньше скорости звука в воде и при преломлении она должна была отклониться в обратную сторону (к основанию призмы). Однако нам не удалось ее обнаружить. Повидимому, интенсивность поперечных волн была очень мала. Во всяком случае, благодаря полному отделению поперечной волны она не могла искажать результатов измерений. В случае же веществ, где скорости и продольных и поперечных волн намного больше скорости звука в воде, угол между преломленными пучками может быть невелик. В таких случаях следует проявлять осторожность и добиваться полного разделения пучков, например, подбором преломляющего угла призмы.

В заключение отметим, что предлагаемый метод позволяет легко производить исследования также и температурной зависимости поглощения. Для этого достаточно изменять температуру жидкости в ванне, которую можно оборудовать как термостат. Однако для этих измерений механический приемник неудобен из-за помех, вызываемых конвекционными потоками.

Поступило  
1 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> W. P. Mason and H. J. McSkimin, Journ. Acoust. Soc. Am., **19**, 464 (1947).  
<sup>2</sup> И. Г. Михайлов, ДАН, **59**, 1555 (1948). <sup>3</sup> S. L. Quimby, Phys. Rev., **25**, 558 (1925). <sup>4</sup> J. Zacharias, *ibid.*, **44**, 116 (1933). <sup>5</sup> Г. П. Михайлов и В. Н. Кириллина, ЖТФ, **8**, 1723 (1938). <sup>6</sup> R. L. Wegel and H. Walther, Physics, **6**, 4, 141 (1935). <sup>7</sup> М. А. Исакович, ЖЭТФ, **20**, 364 (1950). <sup>8</sup> И. Г. Михайлов и С. Б. Гуревич, ДАН, **58**, 221 (1947). <sup>9</sup> D. G. Ivey, B. A. Mrowca and E. Guth, Journ. Appl. Phys., **20**, 486 (1949).