

Для примера вычислим звуковое давление вне цилиндрической оболочки, создаваемое системой источников, равномерно распределенных вдоль прямолинейного отрезка длиной  $2r_0$ , лежащего в плоскости, перпендикулярной к оси оболочки, и проходящего через центр сечения.

Подставим в формулу (4) выражение для поля звуковой волны, прошедшей через тонкую цилиндрическую оболочку, полученное в работе [1]. Внешнее поле системы источников, излучающих через оболочку, определится тогда в виде

$$p_1 = \frac{2Q (\rho_2 c_2)^2 e^{ikR + i\pi/4}}{\sqrt{\lambda_2 R k_2 k_0 a}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_m \cos m\varphi \int_0^{k_0 r_0} J_m(x) dx}{H_m^{(1)'}(k_2 a) J_m'(k_0 a) (z_m + z_{s2} + z_{s0})},$$

где  $R$  — расстояние до точки наблюдения,  $k_0$  и  $k_2$  соответственно волновые числа среды внутри и вне оболочки,  $a$  — радиус оболочки,  $z_m$ ,  $z_{s0}$  и  $z_{s2}$  — соответственно механический импеданс оболочки и импедансы излучения во внутреннюю и внешнюю области; суммируются только четные члены.

На фигуре приведены результаты расчета и эксперимента для решетки точечных источников, помещенных внутри оболочки вдоль ее диаметра;  $a = 8,1$  см, толщина оболочки  $0,5$  см,  $k_2 a = 5,8$ . Решетка состоит из семи источников, расстояние между ними  $2$  см. Легко видеть, что наличие оболочки существенно искажает поле решетки (показанное для случая отсутствия оболочки сплошной линией). График, полученный экспериментально (штриховая кривая), хорошо приближается к расчетной кривой (штрих-пунктирная линия).

Автор выражает признательность Л. М. Лямшеву за руководство работой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Л. Шендеров. Прохождение звуковой волны через упругую цилиндрическую оболочку. Акуст. ж., 1963, 9, 2, 222—230.
2. Л. М. Лямшев. К вопросу о принципе взаимности в акустике. Докл. АН СССР, 1959, 125, 6, 1231—1234.

Ленинград

Поступило в редакцию  
28 марта 1963 г.

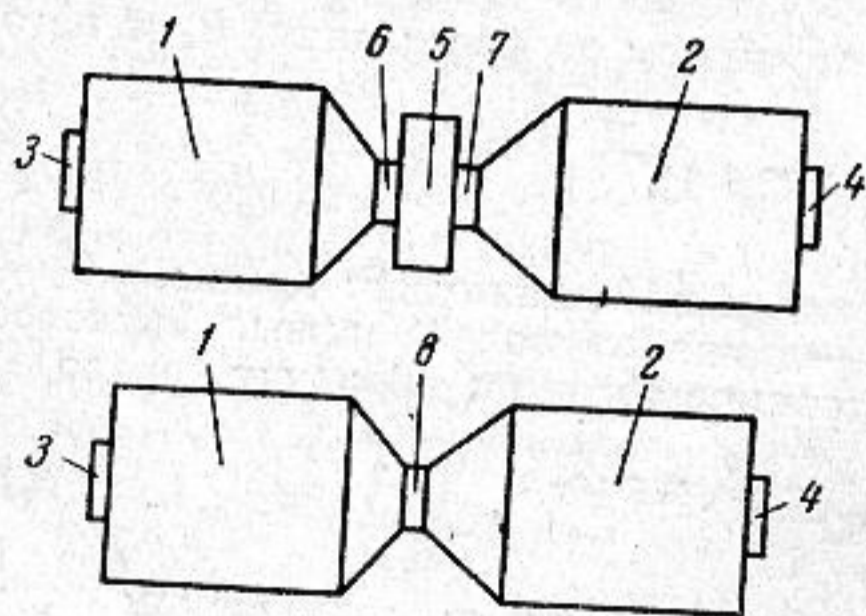
### ВЛИЯНИЕ КОНТАКТИРУЮЩИХ СЛОЕВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

УДК 534.6

В. А. Щукин, Л. А. Яковлев

При измерении скорости распространения упругих колебаний в твердых телах акустический контакт между образцом и излучателем звука достигается с помощью масляного, либо склеивающего слоя. Из-за малости толщин таких слоев, их влияние на результаты измерений обычно не учитывается, хотя в ряде случаев это может приводить к значительным погрешностям.

В данном сообщении анализируется систематическая ошибка, обусловленная наличием контактных слоев в импульсных установках для измерения скорости, работающих на принципе прямого прохождения звука [1, 2]. В таких установках обычно сравнивается время распространения звука в измерительном устройстве с образцом и без образца (см. фиг. 1). Измерительное устройство представляет собой пару стержней 1 и 2, к которым приклеены пьезопластины 3 и 4. Акустический контакт с образцом 5 достигается с помощью слоев 6 и 7. Через слой 8 осуществляется контакт



при измерении без образца. В результате двух измерений находят время  $t = \tau + 2\Delta t_1 - \Delta t_0$ . Здесь  $\tau$  — время распространения звука в образце,  $\Delta t_1$  — в слое 6 или 7,  $\Delta t_0$  — в слое 8. Для оценки величины  $(2\Delta t_1 - \Delta t_0)$  рассмотрим задачу о прохождении звуковой волны через слой толщиной  $l$ . Схема распространения волн и их направления показана на фиг. 2.

Запишем решения волнового уравнения в виде

$$\begin{aligned} u_1 &= U_{01} \exp(iq_1x), & u_4 &= U_{04} \exp(-iq_2x), \\ u_2 &= U_{02} \exp(-iq_1x), & u_5 &= U_{05} \exp(iq_3x), \\ u_3 &= U_{03} \exp(iq_2x), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{0i}$  — амплитуды смещений,  $q_i$  и  $z_i$  — волновые числа и удельные акустические сопротивления. Временные множители  $\exp(-i\omega t)$  в выражениях (1) опущены. Используя условие равенства упругих смещений и напряжений на границах, получаем систему четырех уравнений, решение которой дает следующие соотношения для коэффициента прохождения:

$$k = \frac{2Z_1 \cdot Z_2 [(Z_2 \cdot Z_3 + Z_1 \cdot Z_2) \cos q_2 l + i (Z_2^2 + Z_1 \cdot Z_3) \sin q_2 l]}{(Z_2 \cdot Z_3 + Z_1 \cdot Z_2)^2 \cos^2 q_2 l + (Z_2^2 + Z_1 \cdot Z_3)^2 \cdot \sin^2 q_2 l}$$

и фазового сдвига

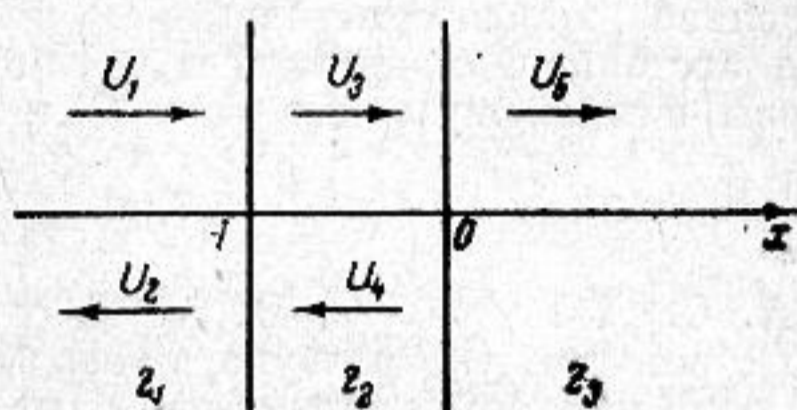
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Z_2^2 + Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot (Z_1 + Z_3)} \cdot \operatorname{tg} q_2 l. \quad (2)$$

Вещества, обеспечивающие акустический контакт, обычно имеют малое сопротивление  $Z_2$ , поэтому в формуле (2) можно пренебречь членом  $Z_2^2$ , по сравнению с  $Z_1 \cdot Z_3$ . Тогда выражение для временной задержки звука в слое приобретает следующий вид:

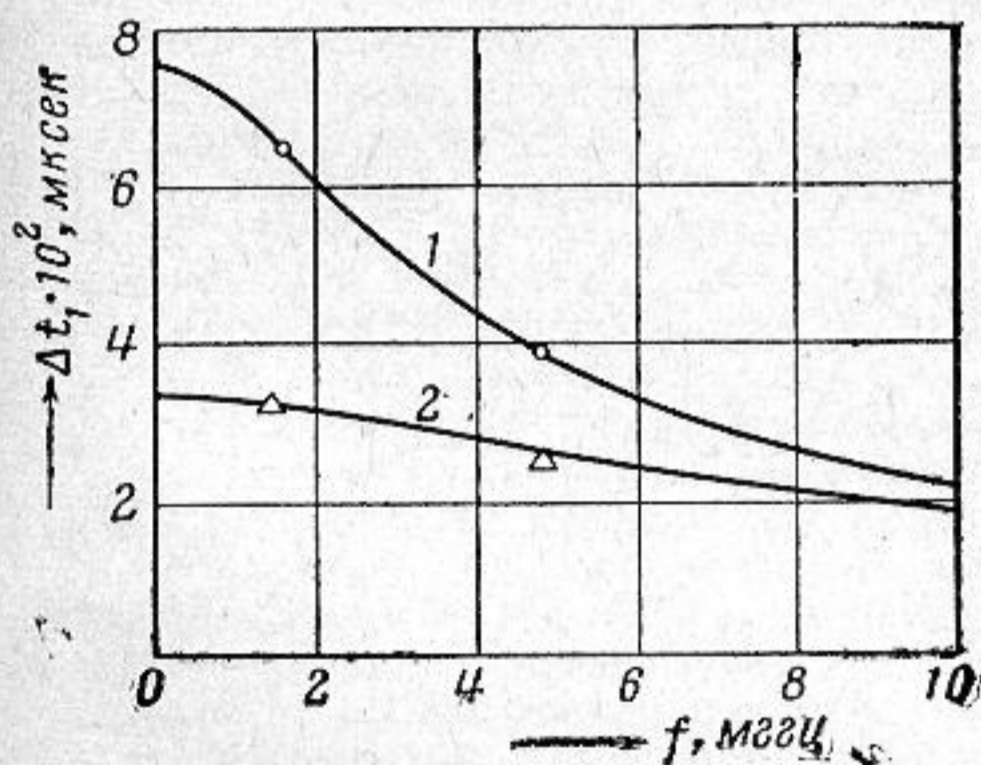
$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \left[ \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 (Z_1 + Z_3)} \operatorname{tg} q_2 l \right], \quad (3)$$

где  $\omega$  — круговая частота. Видно, что  $\Delta t$  значительно превышает время прямого прохождения звуком слоя  $l$ . Для уменьшения времени  $\Delta t$  необходимо использовать слои, по возможности, малой толщины и изготовлять стержни измерительного устройства из материала с достаточно низким акустическим сопротивлением, например, из плавного кварца.

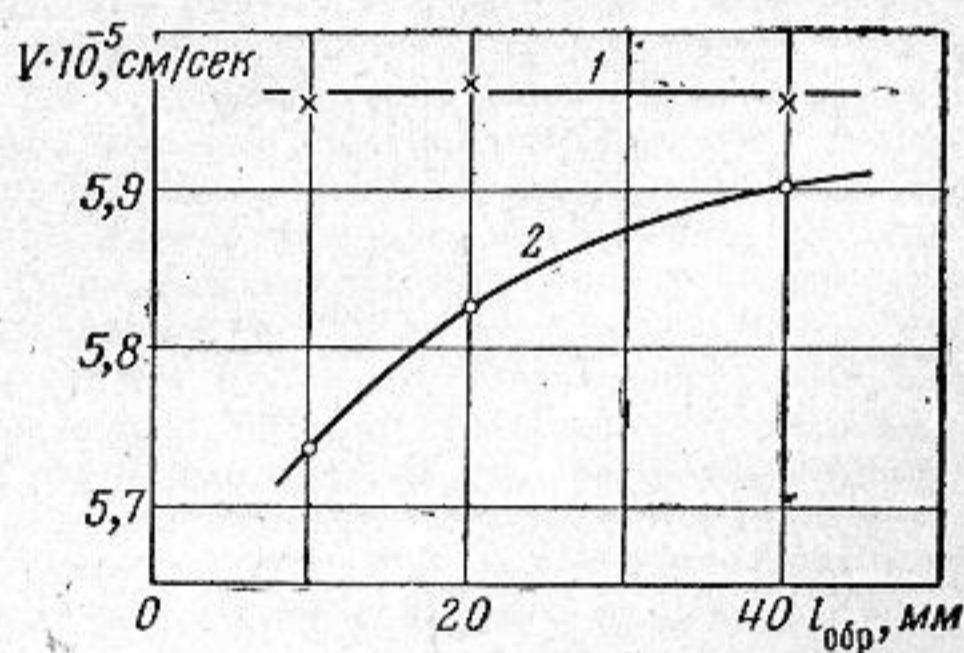
На практике минимальная толщина слоя ограничивается неровностями соприкасающихся поверхностей образца и стержней измерительного устройства. Экспери-



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

ментальная проверка применимости формулы (3) к таким слоям производилась с помощью прибора типа УЗИС-6 [1] на частотах 1,54 и 4,8 мГц. Для этого был изготовлен ряд стальных и кварцевых образцов различной длины. Стальные образцы и стальные стержни измерительного устройства шлифовались порошком электрокорунда 320 и имели максимальную высоту неровностей  $\sim 4 \mu$ . Образцы из плавного кварца шлифовались порошком карбида кремния М20; максимальная высота неровностей составляла около  $2,2 \mu$ .

В случае продольных волн исследовались слои из трансформаторного масла. Измерения на образцах с разной длиной позволили определить точное значение скорости ультразвука и тем самым оценить величину  $(2\Delta t_1 - \Delta t_0)$ . Найденное из опыта на частоте 1,54 мГц значение  $(2\Delta t_1 - \Delta t_0)$  оказалось равным 0,065 мксек для стальных образцов. Благодаря одинаковой обработке стержней измерительного устройства и стальных образцов можно было считать  $\Delta t_1 = \Delta t_0 = 2\Delta t_1 - \Delta t_0$ . Аналогичные изме-

рения на кварцевых образцах при известном  $\Delta t_0$  дали временную задержку, обусловленную контактирующей прослойкой между стальным стержнем и образцом,  $\Delta t_1 = 0,032$  мксек. По формуле (3) и экспериментальным значениям  $\Delta t_1$  были определены соответствующие эквивалентные толщины слоев  $l_1 = 5,8$   $\mu$  и  $l_2 = 4,9$   $\mu$ . При расчетах использовались следующие численные значения:  $v_2 = 1,39 \cdot 10^5$  см/сек,  $Z_2 = 1,28 \cdot 10^5$  ак ом для трансформаторного масла,  $Z_3 = 46 \cdot 10^5$  ак ом,  $Z_3 = 15,8 \cdot 10^5$  ак ом соответственно для стали и кварца. Рассчитанные по толщинам  $l$  частотные зависимости  $\Delta t_1$  приведены на фиг. 3. Кривая 1 отвечает стальным образцам, кривая 2 — кварцевым. Экспериментальные значения, полученные на частоте  $f = 4,8$  мггц, хорошо ложатся на кривые. Это дает возможность полагать, что в использованном нами частотном диапазоне 1—5 мггц эквивалентные толщины слоев не зависят от частоты.

Сопоставление эквивалентной толщины слоя с максимальной величиной неровностей для данного вида обработки показывает, что между ними существует однозначная связь. Так, на стальных и кварцевых образцах отношение суммарных неровностей двух контактирующих поверхностей к величине  $l$  оказалось равным  $1,3 \div 1,4$ . Таким образом, зная максимальные величины неровностей, можно определить эквивалентные толщины слоев и ввести поправку ( $2\Delta t_1 - \Delta t_0$ ). Последняя позволяет значительно повысить точность измерений скорости ультразвука. Для иллюстрации на фиг. 4 приведены величины скорости, найденные на стальных образцах длиной 10, 20 и 40 мм, с учетом поправки (кривая 1) и без учета таковой (кривая 2);  $f = 1,54$  мггц.

Аналогичные результаты были получены с поперечными волнами. В качестве склеивающего материала использовалась эпоксидная смола ЭД-6 без отвердителя, довольно хорошо передающая колебания сдвига. Места склейки выдерживали под постоянной нагрузкой в течение  $\sim 30$  мин для того, чтобы вытекли излишки смолы и промежуточные слои были минимальными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Голубев, В. А. Щуккин. Прибор для измерения скорости распространения ультразвука в твердых телах. АН СССР. Филиал Всесоюзного института научной и технической информации. Тема 33, М., 1957.
2. А. А. Исаев, А. С. Химунин. Измерение скорости звука в тонких пластинах. Сб. «Промышленное применение ультразвука», изд. Куйбышевского авиационного института, Куйбышев, 1961, 161—166.

Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступило в редакцию  
24 апреля 1962 г.

