

УДК 620.179.16

А. И. Кондратьев, Ю. М. Криницын, М. А. Березюк

(Хабаровск)

**УЧЕТ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ**

Приведены результаты расчета дифракционных поправок при измерении скорости распространения и коэффициента затухания ультразвуковых колебаний резонансным методом. Проведено сопоставление результатов расчета и эксперимента.

При проведении измерений скорости распространения C и коэффициента затухания α ультразвуковых колебаний (УЗ) резонансным методом [1, 2] на частотах ниже 10 МГц возможны искажения акустических спектральных линий (АСЛ) образцов, обусловленные дифракционной расходимостью УЗ-пучка.

Сигнал на выходе приемного преобразователя на частоте f описывается выражением (схема измерений показана на рис. 1):

$$u(f) = u_0 |Z| - u_0 \left| \sum_{n=1}^{\infty} y^{(2n-1)} D(a, f, n) \exp[j(2n-1)kd] \right|, \quad (1)$$

где u_0 – параметр, определяемый характеристиками преобразователей и электронным трактом измерительной установки; $y = \exp(-\alpha d)$; $D(a, f, n)$ – функция, учитывающая дифракционную расходимость УЗ-колебаний; $k = 2\pi f / C$.

Функция $D(a, f, n)$ определяется следующим соотношением [3]:

$$D(a, f, n) = 1 - \left[\left(1 - \frac{\xi_n}{(ka)^2} \right) J_0(\xi_n) + j \left(1 + \frac{\xi_n}{(ka)^2} \right) J_1(\xi_n) \right] \exp(-j\xi_n), \quad (2)$$

где

$$\xi_n = kd \left[\sqrt{(2n-1)^2 + (2a/d)^2} - (2n-1) \right] / 2;$$

$J_0(\xi)$, $J_1(\xi)$ – функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно.

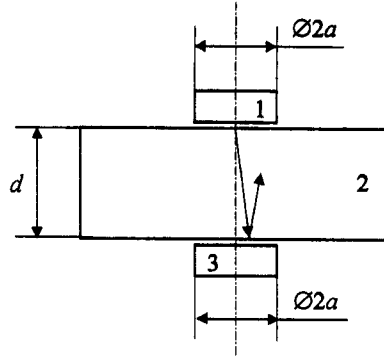


Рис. 1. Схема измерений параметров распространения УЗ-колебаний: 1 – излучатель УЗ-колебаний, 2 – образец, 3 – приемник УЗ-колебаний, $2a$ – диаметр преобразователей, d – толщина образца

При $a \rightarrow \infty$ соотношение (1) приводится к соотношению, описывающему форму АСЛ для случая преобразования плоских волн в слое [1]:

$$u_{\text{пл}}(f) = u_0 |Z_0| = u_0 \left| \sum_{n=1}^{\infty} y^{(2n-1)} \exp[j(2n-1)kd] \right| = \frac{u_0 y}{\sqrt{1 + y^4 - 2y^2 \cos(2kd)}}. \quad (3)$$

При $a \rightarrow 0$ из (1) получаем

$$\begin{aligned} u_{\text{т}}(f) &= u_0 |Z_{\text{т}}| \approx u_0 \left| \sum_{n=1}^{\infty} y^{(2n-1)} \exp[j(2n-1)kd] \left[\frac{(1 - jk^2 a^2)}{2kd(2n-1)} - \frac{a^2(k^2 a^2 + j)}{4d^2(2n-1)^2} \right] \right| = \\ &= u_0 y \left| \exp(jkd) \left[\left\{ \frac{1}{2kd} (1 - jk^2 a^2) - \frac{a^2}{4d^2} (k^2 a^2 + j) \right\} \times \right. \right. \\ &\quad \times \left. \left. F \left(\left[1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right], \left[\frac{3}{2}, \frac{3}{2} \right]; y^2 \exp(j2kd) \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{4y^2 \exp(j2kd)}{9(2 + jka^2/d)} F \left(\left[\frac{3}{2}, \frac{3}{2}, 2 \right], \left[\frac{5}{2}, \frac{5}{2} \right]; y^2 \exp(j2kd) \right) \right] \right|, \quad (4) \end{aligned}$$

где F – гипергеометрическая функция.

На рис. 2 приведена форма АСЛ (u/u_0), рассчитанная по формулам (1), (3), (4) в зависимости от kd при различных значениях параметра a/d ($y = 0,98$). Для разделения кривых на рисунке кривая 4 поднята на 6 единиц, кривая 3 – на 4, кривая 2 – на 2.

На рисунке видно, что при $kd < 200$ и $a/d < 1$ происходит смещение максимума спектральной линии в область малых значений параметра kd (соответствует уменьшению частоты), существенное уменьшение «амплитуды» АСЛ и несимметричное искажение АСЛ.

Для уменьшения влияния дифракционной расходимости необходимо увеличивать диаметр преобразователя, что в ряде случаев невозможно либо

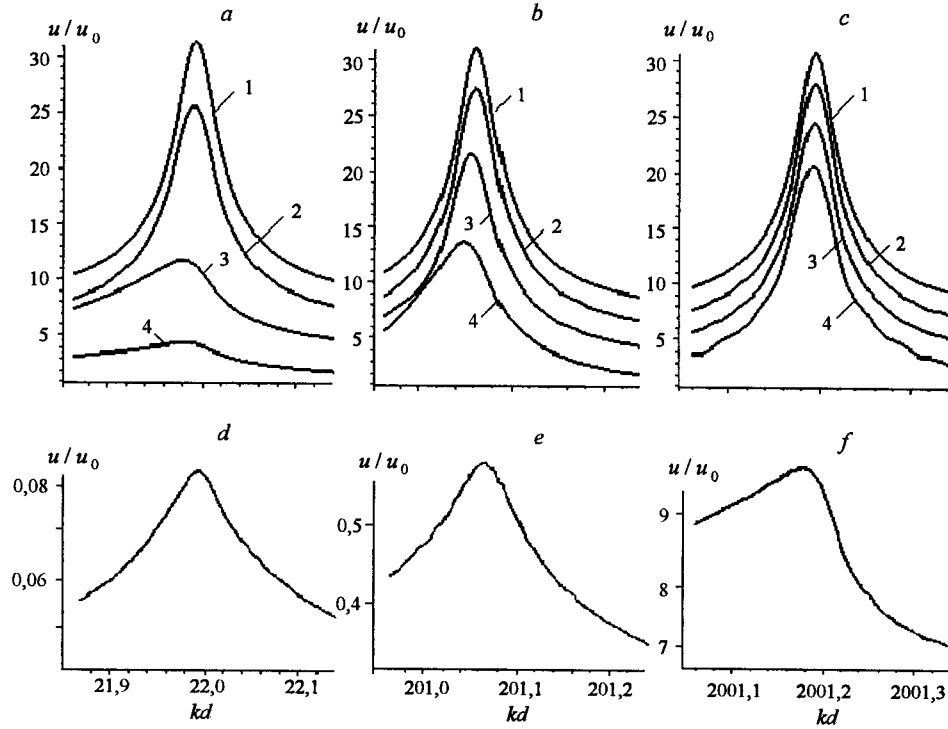


Рис. 2. Форма акустических спектральных линий при различных значениях параметра a/d : кривая 1 – $a/d \rightarrow \infty$ (расчет по формуле (3)); 2 – $a/d = 5$, 3 – $a/d = 1$, 4 – $a/d = 0,5$ (расчет по формуле (1)) (a, b, c); d, e, f – $a/d = 0,05$ (расчет по формуле (4))

вследствие ограниченных размеров образца, либо вследствие значительной упругой неоднородности исследуемого материала [4].

При измерении скорости распространения и коэффициента затухания по положению максимума спектральной линии f_n и ширине АСЛ ΔF на заданном уровне соответственно поправки на расходимость и сами значения C и α определяются соотношениями:

$$\begin{cases} \Delta f_n = f_{n0} - f_n = f_n \frac{\psi_{n0} - \psi_n}{\psi_n}; \\ C = \frac{d}{n} f_n \left(1 + \frac{\Delta f_n}{f_n} \right); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta F_n = \Delta F - \Delta F_0 = \frac{C}{2\pi d} (\Delta\psi - \Delta\psi_0); \\ a = \frac{20}{\ln 10} \frac{10(\Delta F - \Delta F_n)}{C}, \end{cases} \quad (6)$$

где f_{n0} , f_n – истинное и измеренное положения максимума n -й спектральной линии; n – номер спектральной линии; $\psi_{n0} = 2\pi f_{n0} d / C = n\pi$; $\psi_n = 2\pi f_n d / C$; ΔF – измеренное значение ширины АСЛ на уровне 0,707; $\Delta\psi - \Delta\psi_0$ – поправ-

Акустические параметры образца из стекла марки К8

Параметр	2a= 40 мм			2a= 20 мм			2a= 10 мм		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f_n , Гц	1044807	2989100	4933045	1044612	2988790	4932600	1044522	2988025	4931482
Δf_n , Гц	1592	900	454	1735	1200	606	1878	1875	1818
ΔF , Гц	148,1	700,9	2621,0	170,1	705,6	2608,9	214,3	742,5	2687,7
ΔF_{π} , Гц	38,5	19,4	13,1	60,6	48,2	27,2	100,4	58,8	36,1
γ	0,9988	0,993	0,973	0,9986	0,993	0,973	0,9986	0,993	0,973
C , м/с	5979,4	5980,0	5980,0	5979,1	5980,0	5979,6	5979,4	5979,8	5979,8
α , дБ/м	0,50	3,11	11,90	0,50	3,00	11,78	0,52	3,12	12,10

ка к ширине АСЛ (в радианах), полученная с использованием соотношений (3) и (1) или (4).

В таблице приведены значения параметров C и α , полученные для образца из оптического стекла марки К8, толщиной 20 мм на трех частотах и при использовании преобразователей различного диаметра с учетом соотношений (5), (6). Погрешность измерения частоты не превышала 3 Гц.

Из таблицы видно, что измеренные значения параметров C и α на выбранных частотах и для всех преобразователей близки и находятся в пределах погрешностей 0,01 % по скорости и 1–4 % по коэффициенту затухания.

В заключение отметим, что приведенные результаты позволяют расширить область применения резонансных методов и обеспечивают проведение измерений акустических параметров материалов как на низких, так и на высоких частотах при различных соотношениях размеров образца и преобразователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев А. И. Прецизионные измерения скорости и затухания ультразвука в твердых телах // Акуст. журн. 1990. 36, № 3. С. 470.
2. Кондратьев А. И., Криницын Ю. М. Измерение параметров распространения акустических волн резонансным методом // Автометрия. 2000. № 1. С. 115.
3. Bass R. Diffraction effects in the ultrasonic field of a piston source // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1958. 36, N 7. P. 602.
4. Архипов В. И., Кондратьев А. И. О качестве образцов для ультразвуковых измерений // Дефектоскопия. 1991. № 10. С. 41.

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения,
E-mail: kondr@fe.ru

Поступила в редакцию
20 июня 2000 г.