

УСТРАНЕНИЕ ФАЗОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ПОСТОЯННОЙ ДЛИНЫ

В. А. Сукацкас

Одним из факторов, ограничивающих точность измерения скорости ультразвука интерферометром постоянной длины, является частотная зависимость фазы коэффициента отражения ультразвука на границе «среда — пьезопреобразователь». Ввиду этого значение скорости c , полученное из зависимости $c=2\Delta f l$, где Δf — интервал частоты между двумя акустическими резонансами, l — база интерферометра, меньше точного значения. Разность измеренного и точного значений скорости зависит от соотношения частоты ультразвука и резонансной частоты преобразователей, также от соотношения удельных акустических сопротивлений исследуемой среды и вещества преобразователя и по существу является фазовой погрешностью данного метода.

Известны формулы для определения скорости ультразвука как в области резонансной частоты преобразователей f_0 [1], так и в области $0,5f_0$ [2], позволяющие исключить фазовую погрешность. Однако для этого должно быть известно (либо определяться отдельно) удельное акустическое сопротивление среды, что не всегда возможно.

Покажем, что измерением на двух специально подобранных частотах может быть определено значение скорости, свободное от фазовой погрешности, при любом удельном акустическом сопротивлении среды, без определения последнего.

Входной акустический импеданс y единицы площади преобразователя 1 (фигура) со стороны исследуемой среды 2 выражается так [3]:

$$jy = jz \operatorname{tg} \frac{2\pi Lf}{c},$$

где z — удельное акустическое сопротивление вещества преобразователя, L , c — толщина преобразователя и скорость ультразвука в нем, f — частота ультразвука, z и y нормированы относительно удельного акустического сопротивления среды. Считаем, что задняя сторона преобразователей акустически закорочена, а потерями и влиянием электрической нагрузки пренебрегаем.

Фазовый угол φ ультразвуковой волны при отражении от преобразователя будет

$$(1) \quad \varphi = -\operatorname{arctg} \left(z \operatorname{tg} \frac{2\pi Lf}{c} \right).$$

Вблизи частоты $0,5f_0$ уравнение (1) может быть линеаризовано так:

$$(2) \quad \varphi = -\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi L\Delta f}{zc} = -\frac{\pi}{2} - \frac{\pi\Delta f}{zf_0},$$

где $\Delta f = f - 0,5f_0$, а $\Delta f \ll f_0$.

Аналогично для области частоты f_0 можно написать

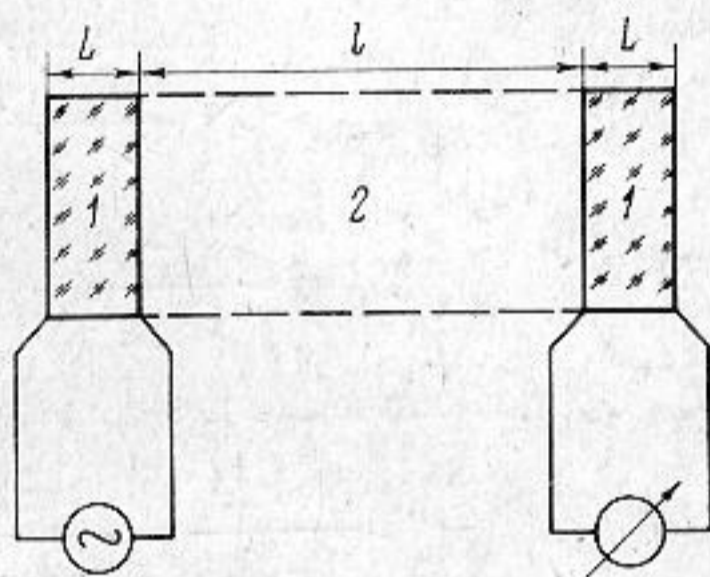
$$(3) \quad \varphi = -\frac{z\pi\Delta f}{f_0},$$

где $\Delta f = f - f_0$.

Такой характер зависимости φ от частоты вытекает также из расчетов и экспериментов работы [4].

Пусть отклонение частоты Δf равно интервалу между двумя акустическими резонансами (который обозначим как Δf_1 в области частоты $0,5f_0$ и как Δf_0 в области f_0). Изменения фазы согласно формулам (2) и (3) в интервалах частоты Δf_1 и Δf_0 соответственно равны $\varphi_1 = -\pi\Delta f_1/zf_0$ и $\varphi_0 = -z\pi\Delta f_0/f_0$. Скорость ультразвука связана с интервалами Δf_1 и Δf_0 следующими зависимостями [4]:

$$(4) \quad c = \frac{2l\Delta f_1}{1 - \frac{2\Delta f_1}{zf_0}}, \quad (5) \quad c = \frac{2l\Delta f_0}{1 - \frac{2z\Delta f_0}{f_0}}.$$



Схематический чертеж интерферометра: 1 — пьезопреобразователи, работающие при колебаниях по толщине, 2 — исследуемая среда

В формулах (4) и (5) учтена одинаковость двух преобразователей. Выразив z из формул (4) и (5), получаем

$$(6) \quad \frac{4\Delta f_0 \Delta f_1}{f_0^2} = \frac{(c-2l\Delta f_1)}{c} \frac{(c-2l\Delta f_0)}{c} = \frac{c-c_1}{c} \frac{c-c_0}{c},$$

где $c_1=2l\Delta f_1$, $c_0=2l\Delta f_0$. Из двух приближенных значений скорости c_1 и c_0 ближе к точному значению c (но меньше его) будет c_1 , если $z>1$, и c_0 , если $z<1$. Обозначим большее из двух значений c_1 , c_0 , как c_{\max} , меньшее — как c_{\min} . Тогда уравнение (6) может быть обобщено на случай любого неизвестного значения z следующим образом:

$$(7) \quad \frac{c_{\min}c_{\max}}{f_0^2 l^2} \cong \frac{c-c_{\min}}{c_{\max}} \frac{c-c_{\max}}{c_{\max}} = \delta_{\min}\delta_{\max},$$

где δ_{\min} , δ_{\max} — поправки, которые необходимо ввести соответственно в значения c_{\min} и c_{\max} для получения точного значения скорости c . Мы считаем здесь, что $c_{\max} \approx c$. Член в правой части формулы (7) является квадратом среднего пропорционального величин δ_{\min} и δ_{\max} . Из геометрической интерпретации среднего пропорционально получаем

$$(8) \quad \delta_{\max} = \sqrt{\left(\frac{c_{\max}-c_{\min}}{2c_{\max}}\right)^2 + \frac{c_{\min}c_{\max}}{f_0^2 l^2} - \frac{c_{\max}-c_{\min}}{2c_{\max}}},$$

$$(9) \quad \delta_{\min} = \frac{c_{\max}-c_{\min}}{c_{\max}} + \delta_{\max}.$$

Точное значение измеряемой скорости будет

$$(10) \quad c = \frac{c_{\max}}{1-\delta_{\max}} = \frac{c_{\min}}{1-\delta_{\min}}.$$

Если исследуемая среда обладает дисперсией скорости, то поправки δ_{\max} и δ_{\min} будут содержать абсолютную погрешность, близкую к величине дисперсии.

Из формул (4) и (5) вытекает возможность определения удельного акустического сопротивления среды

$$(11) \quad Z_{\text{ср}} = Z \left[\frac{f_0}{4} \left(\frac{1}{\Delta f_1} - \frac{1}{\Delta f_0} \right) + \sqrt{\frac{f_0^2}{16} \left(\frac{1}{\Delta f_1} - \frac{1}{\Delta f_0} \right)^2 + 1} \right],$$

где Z — ненормированное удельное акустическое сопротивление вещества преобразователя.

Преимущество такого метода измерения $Z_{\text{ср}}$ заключается в том, что не требуется определения c и l , что удобно, например, в случае исследования плоскопараллельных изделий любой длины из твердого вещества.

Точность измерения скорости ультразвука особенно повышается если $z \approx 1$. Например, при исследовании кварцевой пластинки толщиной $l=5,71$ мм получено $c_{\min} \approx c_{\max} = 1906$ м/сек (продольные волны). Расчет по формулам (8)–(10) дает значение $c=5736$ м/сек, т. е. близкое к табличному, равному 5720 м/сек. В дистиллированной воде при $l=12,8$ мм получено $c_{\max}=1445,4$ м/сек, $c_{\min}=438,01$ м/сек. Рассчитанное значение $c=1477,1$ м/сек уточнялось путем повторного расчета с подстановкой его в знаменатели формул (8) и (9), в результате чего получено значение 1477,8 м/сек. Оно с точностью 0,4% совпадает с известным значением при той же температуре 1483,5 м/сек. Рассчитанное для воды по формуле (11) значение $Z_{\text{ср}}/Z$ равно 0,097, что также хорошо согласуется с известными данными. В качестве преобразователей во всех случаях использовались пластинки кварца x среза с $f_0 = 0,5$ Мгц.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Иванов. Об измерении скорости ультразвука в твердых телах интерферометром с двумя пьезопреобразователями. Тр. вузов Лит. ССР, Ультразвук, 1969, 1, 135–140.
2. F. Eggers, Th. Funck. Ultrasonic Measurements with Mililiter Liquid Samples in the 0,5–100 MHz Range. Rev. Sci. Instrum., 1973, 44, 8, 969–978.
3. С. Н. Ржевкин. Курс лекций по теории звука. Изд-во МГУ, 1960, 91–93.
4. В. А. Сукацкас, Э. П. Яронис. Условие резонанса для ультразвукового интерферометра постоянной длины. Акуст. ж., 1973, 19, 1, 96–100.

Каунасский политехнический институт им. Антанаса Снечкуса

Поступила
9 ноября 1976 г.