

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ГАЗАХ
ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ПОСТОЯННОЙ ДЛИНЫ

© 1994 г. В. Сукацкас

Каунасский технологический университет
3028 Каунас, Литва, КТУ, Кафедра физики

Поступила в редакцию 11.11.93 г.

Известны лишь немногие попытки измерения скорости звука в газах с помощью ультразвукового интерферометра [1]. Причиной тому является неэффективное излучение кварца или пьезокерамики в газ (за исключением узкой области резонанса преобразователя) и, как следствие этого, непосредственное просачивание ультразвука через стенки кюветы и элементы конструкции. Последний эффект особенно проявляется когда по причине химической агрессивности недопустим непосредственный контакт газа с преобразователем.

Предложенная методика позволяет провести измерения бесконтактным способом, сохраняя основные преимущества интерферометра – простоту реализации и точность. Схематический чертеж кюветы интерферометра приведен на рис. 1а.

Импеданс, нагружающий столбик среды 1 с одного конца, можно найти, последовательно применяя рекуррентную формулу [2]:

$$Z_{i,i+1} = Z_{i+1} \operatorname{tg} (k_{i+1} l_{i+1} + \operatorname{arctg} (Z_{i+1,i+2}/Z_{i+1})), \quad (1)$$

где $Z_{i,i+1}$ – входной акустический импеданс на границе i -го и $i+1$ -го слоев, но в i -м слое; l_{i+1} , k_{i+1} – толщина и волновое число $i+1$ -го слоя; Z_{i+1} – удельный акустический импеданс $i+1$ -го слоя. Слои, начиная с 1-го – это исследуемый газ (l_1), стенка кюветы (l_2), контактная жидкость (l_3), пьезоматериал (l_4), газ (l_5). В расчетах i пробегает значения от 3 до 1; ввиду того, что l_5 бесконечно, $Z_{4,5} = Z_5 \equiv 0$. Потерями пренебрегаем.

Фазовый сдвиг волны при отражении на границе 1-ого слоя равен

$$\varphi_1 = -\operatorname{arctg}(Z_{1,2}/Z_1), \quad (2)$$

а нагрузка слоя 1 эквивалентна дополнительному отрезку исследуемого газа длиной Δl полуволи [3], где Δl выражается формулой

$$\Delta l = -\frac{\varphi_1}{\pi}. \quad (3)$$

Из всех параметров кюветы интерферометра наиболее трудно поддается контролю толщина контактного слоя l_3 . Непостоянство Δl вносит си-

стематическую фазовую погрешность измерения. Для выяснения ее характера были проведены расчеты $\Delta n = \Delta n(f, n_3)$, где $n_i = l_i/\lambda_i$; λ_i – длина волны в i -м слое, f – частота ультразвука. Пример расчета для $Z_1 = Z_5 = 300$, $Z_2 = 1.3 \times 10^7$ (плавный кварц), $Z_3 = 1.5 \times 10^6$ (вода), $Z_4 = 3 \times 10^7$ (пьезокерамика), все в Па с м⁻¹, $n_2 = 0.6$; $n_4 = 1$, приведен на рис. 1б. Все n_i определены на резонансной частоте пьезопреобразователя f_0 . На зависимости $\Delta n = \Delta n(f, n_3)$ имеется значительная плоская часть, что как известно [3], способствует высокой точности измерения скорости ультразвука методом интерферометра постоянной длины.

Напряжение на обкладках пьезоприемника $U_{\text{вых}}$ при постоянном возбуждении может быть выражено так:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{н}} + U_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{н}}$ – сигнал интерференции, $U_{\text{п}}$ – сигнал помехи, вызванный наводкой и просачиванием ультразвука через стенки. Сигнал $U_{\text{н}}$ – квазипериодический по отношению к частоте – последовательность так называемых резонансных пиков. Сигнал $U_{\text{п}}$ может быть сделан “размазанным” по частоте (введением в стенки акустических лабиринтов, поглощающим покрытием внешней стороны и т.д.); от наличия или отсутствия интерференции он не зависит. Это позволяет разделить сигналы снимая амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) с закрытым и открытым путем ультразвука через газ и затем их вычитая.

При повороте кюветы вертикально пластинка б под действием собственного веса уходит из пучка ультразвука, открывая акустический тракт и наоборот. Пример АЧХ, снятых с открытым и закрытым путем ультразвука и их разность приведены на рис. 2 (соответственно кривые 1, 2 и 3). Заметим, что сигнал $U_{\text{н}}$ является более быстро осциллирующим, чем $U_{\text{п}}$, и в пределах резонансного пика может быть выражен так:

$$U_{\text{н}} = \frac{U_0}{\sqrt{1+x^2}} \cos(\operatorname{arctg} x + 2\pi ft), \quad (5)$$

где $x = (f - f_n)/\Delta F$ – относительная расстройка, f_n – частота данного акустического резонанса, ΔF – половина полосы пропускания кюветы,

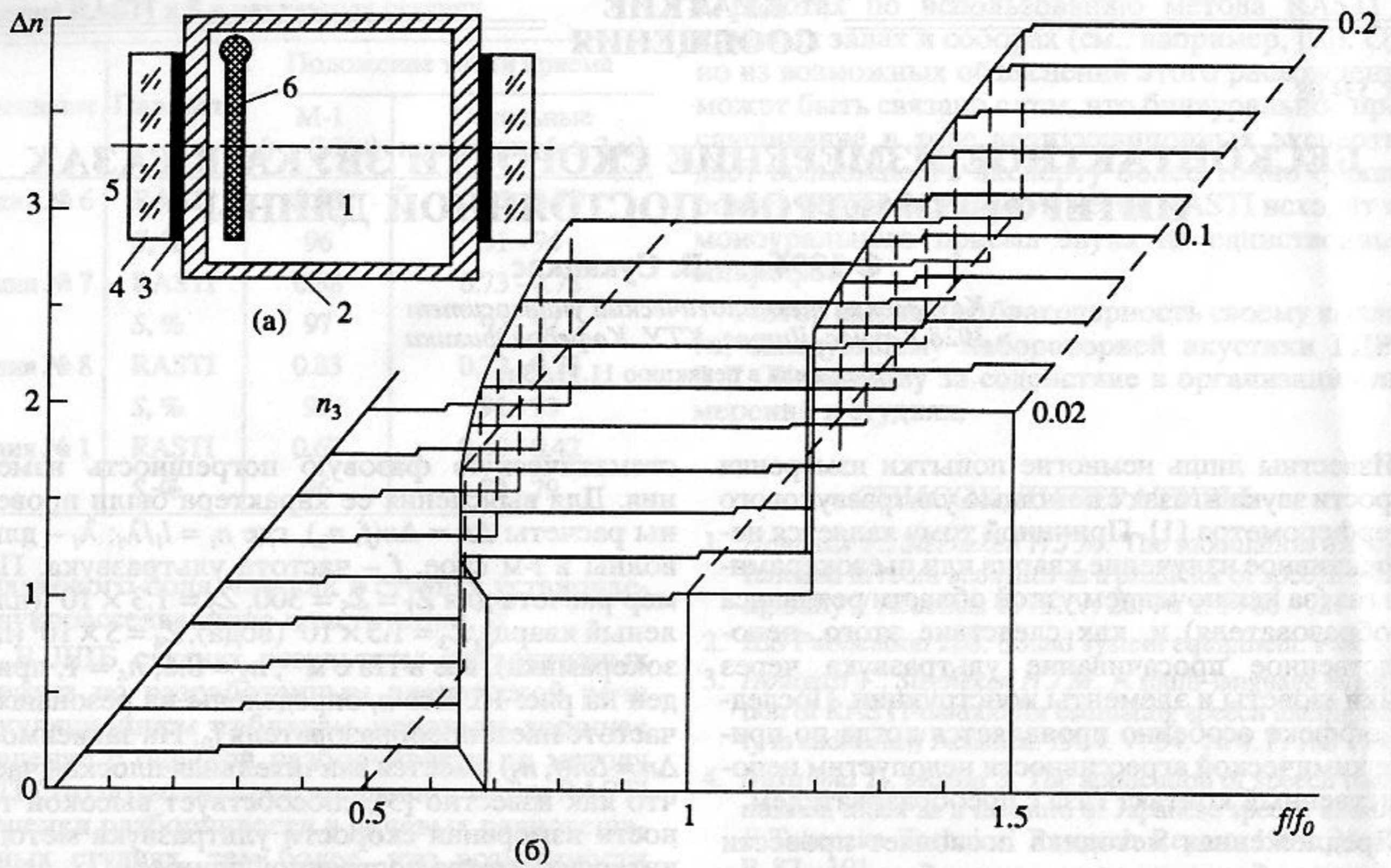


Рис. 1. Схематический чертеж измерительной кюветы (а): 1 – исследуемый газ; 2 – кювета; 3 – слой контактной жидкости; 4 – пьезопреобразователи; 5 – газ сзади; 6 – вращающаяся пластинка, зависимость $\Delta n(f, n_3)$ (б).

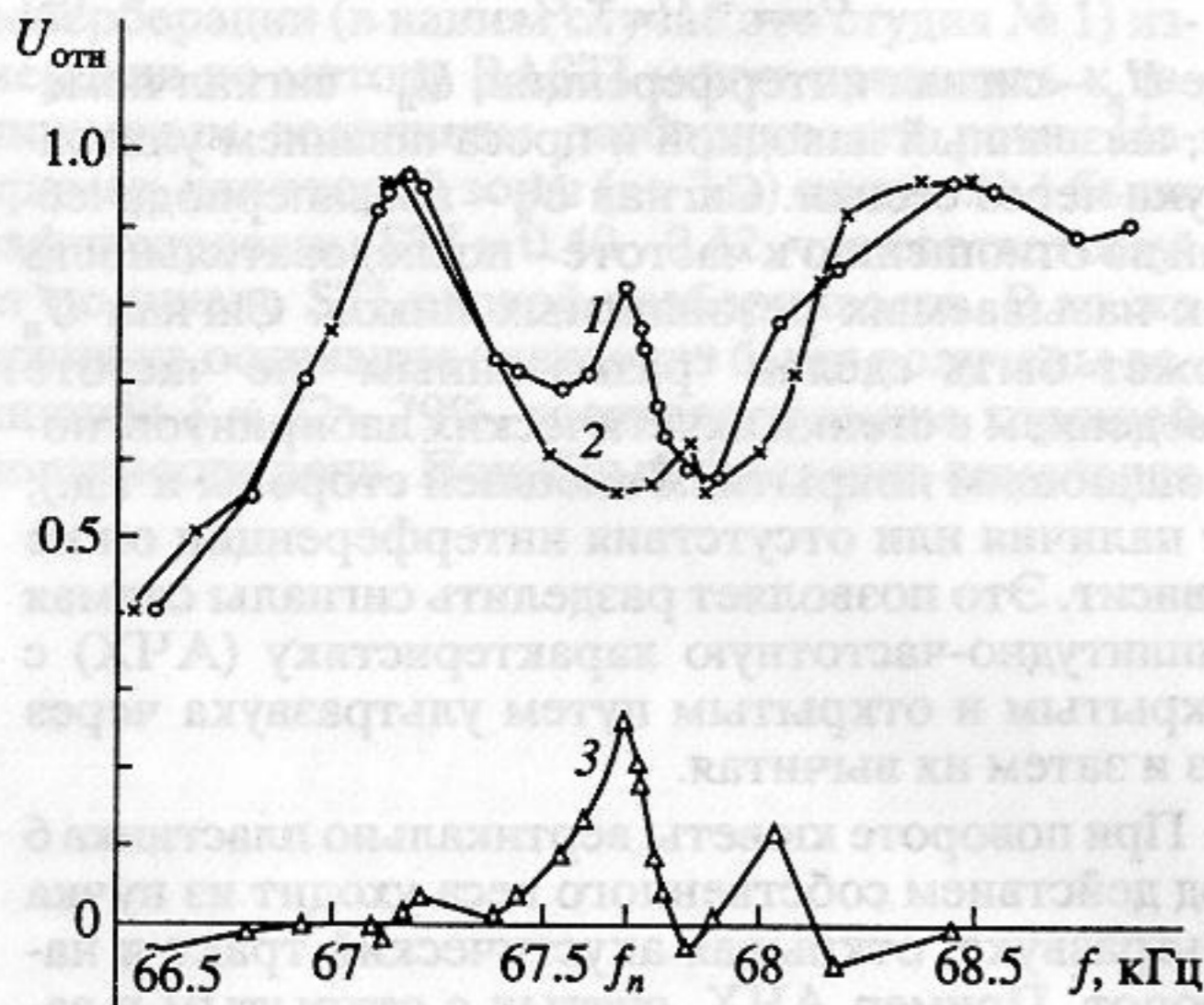


Рис. 2. АЧХ кюветы: 1 – с открытым путем ультразвука через газ, 2 – с закрытым, 3 – их разность.

U_0 – максимальное выходное напряжение. Для случая $U_{\text{п}} = U_{\text{м}} \cos(2\pi ft + \varphi_n)$, где $U_{\text{м}}$ и φ_n – постоянные значения амплитуды и фазы, проводился расчет $U_{\text{вых}}$ по формулам (4, 5). Он показывает, что в зависимости от φ_n при $U_{\text{м}} \geq U_0$ резонансный пик может иметь различную форму – от острого пика, направленного вверх, до такого же пика, на-

правленного вниз. Поэтому после вычитания АЧХ может потребоваться “реставрация” резонансного пика по формуле $U_{\text{н}} = U_{\text{вых}} - U_{\text{п}}$, с подбором φ_n при некотором заданном среднем значении ΔF .

Экспериментальная проверка метода проведена в воздухе при комнатных условиях. Кювета длиной 3 см сделана из дюралюминия. На ней получены АЧХ, изображенные на рис. 2, пьезокерамические преобразователи имели резонансную частоту f_0 порядка 75 кГц. Следует заметить, что оказалось весьма трудным выделить для измерения более 3 пиков. Расчеты по формуле $c = 2(f_{n+1} - f_n)l_1$ дают 342 и 339 м/с, по формуле $c = 2f_n l_1 / N$, где N – общее количество полувольт в кювете, определяемая как целая часть отношения $f_n / (f_{n+1} - f_n)$, дают 338.3 и 338.8 м/с, табличное значение скорости 342.4 м/с.

Надо заметить, что определенные преимущества имеет применение логарифмического усилителя выходного сигнала кюветы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. М.: Изд-во стандартов, 1982.
2. Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В. Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс: Мокслас, 1983.
3. Сукацкас В.А., Яронис Э.П. Условие резонанса для ультразвукового интерферометра постоянной длины // Акуст. журн. 1973. Т. 19. № 1. С. 96 - 100.