

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ И ВОЛНОВОЙ ПОПРАВКАХ В  
МЕТОДЕ ПИСТОНФОНА

Бугуславская С.Н., Романенко Е.В.

Как известно [1 - 7], расчет давления в камере пистонфона производится по формуле

$$P = \gamma P_0 \cdot \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1)$$

где  $\gamma = c_p/c_v$ ,  $P_0$  - начальное давление в камере, которое обычно равно атмосферному,  $V_0$  - начальный объем камеры,  $\Delta V$  - изменение объема при движении поршня пистонфона. Однако эта формула справедлива лишь в сравнительно узком диапазоне частот. Нижняя граница диапазона определяется условием

$$3,9 \cdot f^{1/2} \cdot \frac{V_0}{S} > 10 \div 20 \quad (2)$$

которое обусловлено тем фактом, что в области низких частот адиабатический закон деформации газа в камере сменяется изотермическим. Здесь  $S$  - внутренняя поверхность камеры. Верхняя граница диапазона определяется условием

$$k\ell \ll 1 \quad (3)$$

которое представляет собой требование малости размеров камеры по сравнению с длиной волны. Здесь  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\ell$  - длина камеры,  $\lambda$  - длина волны.

Частотные пределы применимости формулы (1) могут быть расширены почти на два порядка, если ввести в нее соответствующие поправки, учитывающие указанные выше термодинамические и волновые явления. В этом случае формула (1) может быть переписана в виде:

$$P = K \cdot C(\alpha) \cdot \gamma P_0 \cdot \frac{\Delta V}{V_0} \quad (4)$$

Здесь  $K$  и  $C(\alpha)$  - термодинамическая и волновая поправки соответственно.

Аналитические выражения для термодинамической поправки хорошо известны [2 - 5], но очень громоздки, и по этой причине здесь не приводятся. Экспериментальной же проверке ее уделено по-видимому чрезвычайно мало внимания, во всяком случае нам не известны такие работы.

Учитывая тот факт, что выражения для термодинамических поправок существуют в нескольких вариантах и неизвестно, какой из вариантов предпочтительнее в метрологической практике, было признано целе-

## О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ И ВОЛНОВОЙ ПОПРАВКАХ

сообразным измерить величину термодинамической поправки в интервале частот, где не выполняется условие (2), на пистонфонной установке, имевшей следующие параметры.

Стальная камера имеет форму короткого цилиндра диаметром 71,8 мм, и длиной 19,2 мм; давление в камере создавалось поршнем, приводимым в гармоническое движение с помощью электродвигателя и эксцентрика. Амплитуда смещения поршня составляла около 2 мм. В качестве звукоприемника использовалась сфера из керамики титаната бария. Неравномерность частотной характеристики приемноусилительного тракта в области низких частот тщательно учитывалась. В качестве индикатора использовался осциллограф типа С1-19.

Результаты измерений представлены на графике рис.1. По оси абсцисс отложена величина  $3,9 \cdot f^{1/2} \sqrt{V_p}$ , по оси ординат - величина поправки. Различные кривые представляют собой поправки, полученные разными авторами. Следует отметить, что поправка Русакова (E) рассчитана при условии, что теплопроводностью обладает только диафрагма микрофона. Поэтому кривая (E) лежит выше остальных. Квадратичная погрешность результатов измерений не превышает 3%. Легко заметить, что результаты измерений лучше всего согласуются с поправкой Даниельса [3] для сферической камеры (A) и поправкой Биаджи и Кука [4] для камеры в форме короткого цилиндра (A').

Вопросу о волновой поправке в методе пистонфона в литературе уделено очень мало внимания. Нам известна лишь одна работа Харкевича [1] почти тридцатилетней давности, в которой теоретически решен вопрос о волновой поправке. Однако эта работа оказалась незаслуженно забытой.

Необходимость учета волновой поправки диктуется тем, что давление в различных точках внутри камеры пистонфона оказывается неодинаковым, как только длина волны в камере становится сравнимой с длиной камеры. Функция, характеризующая распределение давления вдоль оси камеры с абсолютно жесткими стенками, получена Харкевичем в виде:

$$C(\alpha) = k\ell \frac{\cos k\ell(1-\alpha)}{\sin k\ell} \quad (5)$$

Здесь  $\alpha = x/\ell$ ,  $x$  - координата вдоль оси цилиндрической камеры, отсчитанная от среднего положения поршня. Свойства функции  $C(\alpha)$ , которая представляет собой волновую поправку в формуле (4), подробно описаны в работе Харкевича [1]. Мы отметим только наиболее существенное из них. Анализ функции  $C(\alpha)$  показывает, что с ростом величины  $k\ell$  давление внутри камеры меняется весьма существенно во всех точках, кроме некоторой области в окрестности точки  $\alpha = 0,45$ . Вблизи этой точки давление остается неизменным до значений  $k\ell$ , равных примерно 2. Именно в этой точке рекомендуется проводить градуировку звукоприемников

## О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ И ВОЛНОВОЙ ПОПРАВКАХ

Экспериментальная проверка волновой поправки проводилась на описанной выше установке. Только длина камеры была увеличена до 255 мм при внутреннем диаметре 82 мм. Диапазон рабочих частот был 5-33 гц. Измерения давления проводились в трех точках на оси камеры:  $\alpha = 0,024$ ;  $\alpha = 0,97$  и  $\alpha = 0,45$ .

На графиках рис. 2 и 3 представлены результаты.

На рис. 2 по оси ординат отложена величина  $C(\alpha_1)/C(\alpha_2)$ . Здесь взяты не сами поправки в точках  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а их отношение, которое меняется в зависимости от  $\alpha$  быстрее, чем сами поправки, и поэтому легче может быть измерено. На рис. 3 по оси ординат отложена величина поправки  $C(\alpha_3)$  в точке  $\alpha_3$ . По оси ординат на обоих графиках отложена частота  $f$ . Сплошными линиями показаны теоретические кривые, точками - экспериментальные результаты. Квадратичная погрешность результатов не превышает 5%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Харкевич А.А. Акустические измерения в замкнутых помещениях. Труды комиссии по акустике. Сб., 1939, I.
2. *Barrantine S. JASA, 3*, 1932, 3, 319.
3. *Daniels F.B., Acoustical Impedance of Enclosures, 1947, 19, 4, 569-571, JASA.*
4. *Biaqi F. Cook R.K. Acoustical Impedance of a Right Circular 1954, 26, 4, 506 - 509, JASA. Cylindrical Enclosure.*
5. Русаков И.Г. Термодинамическая поправка в методе пистонфона. Труды комиссии по акустике. Сб. 1955, 8.
6. Мясников А.Л. Акустические измерения, 1937.
7. Белов А.И. Акустические измерения, 1941.
8. *Wente E.C. The thermophone Phys Rev, 1922, 19, 4, 333-345.*