АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXI 1975 Вып. 1

УДК 534.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ УЧАСТКОВ СТЕН ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Зденек Кинцл

Рассмотрено использование импульсного метода для определения локального значения коэффициента отражения звука от плоской стенки. Выражение для коэффициента отражения получено с использованием преобразований Фурье прямого и отраженного импульсов. Сравнение значений коэффициента отражения, полученных рассмотренным импульсным методом и измеренных в трубе Кундта, показывает весьма хорошее совпадение.

Чтобы определить коэффициент отражения участка стены помещения, необходимо использовать такой метод измерения, который позволил бы отделить сигнал, падающий на стену, от сигнала, отраженного от исследуемого участка, и оба эти сигнала — от остальных отражений от стен и предметов, находящихся в помещении. Очевидно, для этого необходимо использовать достаточно короткий звуковой импульс.

Между преобразованиями Фурье $P_1(\omega)=fP_1(t)$ и $P_2(\omega)=fP_2(t)$ падающего и отраженного от плоской поверхности S импульсов имеется для случая сферической волны соотношение, вытекающее из интеграла Гюйгенса (см., например, работу [1])

(1)
$$P_2(\omega)=P_1(\omega)\frac{r_0}{2\pi c}\exp\left(j\omega\frac{r_0}{c}\right)\iint\limits_{(S)}\eta(\theta,\omega)\frac{j\omega R+c}{R^2\xi}\exp\left(-j\omega\frac{R+\xi}{c}\right)\cos\theta\,dS,$$

где η — локальный коэффициент отражения элемента поверхности dS при угле падения θ; R — расстояние от элемента поверхности dS до источника; ξ — расстояние от элемента dS до микрофона и r_0 — расстояние от источника до микрофона.

Чтобы иметь возможность сравнения наших экспериментальных данных с величинами, получаемыми при измерениях посредством интерферометра, мы будем рассматривать случай нормального падения звуковых волн.

С этой целью применим интеграл (1) к случаю, когда волна падает на бесконечную плоскую поверхность, однородную с точки зрения локального коэффициента отражения. Пусть при этом микрофон и источник лежат на одной прямой, перпендикулярной этой бесконечной поверхности. Интеграл (1) имеет в этом случае следующий вид:

(2)
$$P_2(\omega)=P_1(\omega)\frac{h(h-l)}{c}\exp\left(j\omega\frac{h-l}{c}\right)\times$$
$$\times\int\limits_0^\infty\eta(\theta,\omega)\frac{j\omega\sqrt{q^2+h^2}+c}{\sqrt{(q^2+h^2)^3(q^2+l^2)}}\exp\left(-j\omega\frac{\sqrt{q^2+h^2}+\sqrt{q^2+l^2}}{c}\right)q\,dq,$$

где h — расстояние от источника до поверхности, l — расстояние от микрофона до поверхности; локальный угол падения в этом случае определяется

из выражения

$$\cos\theta = h/\sqrt{h^2+q^2}. \tag{3}$$

Если длительность отраженного импульса T_2, то он формируется на круговой области поверхности, радиус которой

$$q_{\text{м}} = \frac{\sqrt{\left(h+l+\frac{1}{2}cT_2\right)\left(h+\frac{1}{2}cT_2\right)(2l+cT_2)cT_2}}{h+l+cT_2}. \tag{4}$$

Косинус угла падения θ на область $0 \leqslant q \leqslant q_{\text{м}}$, согласно формуле (3), находится в интервале

$$\frac{h}{\sqrt{h^2+q_{\text{м}}^2}} \leqslant \cos\theta \leqslant 1. \tag{5}$$

Очевидно, что для $h \geqslant q_{\text{м}}$

$$\frac{h}{\sqrt{h^2+q_{\text{м}}^2}} \approx 1, \tag{6}$$

так что угол падения на упомянутую круговую область $\theta \approx 0°$.

Если подставить в интеграл (2) в качестве локального коэффициента отражения в интервале $0 \leqslant q \leqslant q_{\text{м}}$ величину

$$\eta_0 = \eta(0, \omega), \tag{7}$$

то можно применить интегрирование по частям в пределах $\langle 0, q_{\text{м}} \rangle$ и вынести η_0 за знак интеграла. Используя формулу (4), получим

$$\begin{aligned} P_2(\omega) \approx {} & P_1(\omega)\eta_0(\omega)\frac{h-l}{h+l}\exp\left(-j\omega\frac{2l}{c}\right) - \\ & -P_1(\omega)\eta_0(\omega)\frac{h(h-l)}{\sqrt{q_{\text{м}}^2+h^2}(h+l+cT_2)}\exp\left[-j\omega\left(\frac{2l}{c}+T_2\right)+\right. \\ & +P_1(\omega)\frac{h(h-l)}{c}\int\limits_{q_{\text{м}}}^{\infty}\eta(\theta,\omega)\frac{j\omega\sqrt{q^2+h^2}+c}{\sqrt{(q^2+h^2)^3(q^2+l^2)}}\times \\ & \times\exp\left[-j\omega\frac{\sqrt{q^2+l^2}+\sqrt{q^2+h^2}-h+l}{c}\right]q\,dq. \end{aligned} \tag{8}$$

Очевидно, что второй и третий члены формулы (8) выражают преобразование Фурье импульсов, начинающихся в момент $t = \frac{2l}{c} + T_2$. Так как для $t > \frac{2l}{c} + T_2$ значение отраженного импульса $P_2(t) = 0$, сумма второго и третьего членов должна быть равна нулю, и формулу (8) можно написать следующим образом:

$$P_2(\omega) \approx P_1(\omega)\eta_0(\omega)\frac{h-l}{h+l}\exp\left(-j\omega\frac{2l}{c}\right). \tag{9}$$

Экспоненциальный сомножитель означает, что отраженный импульс запаздывает по отношению к прямому импульсу на $\Delta t = 2l/c$.

Формула (9) позволяет определить коэффициент отражения для нормального падения звука с помощью преобразований Фурье прямого и отраженного импульсов. Если совместить начала обоих импульсов, то из

формулы (9) получим

$$(10)\qquad \eta_0(\omega) \approx \frac{\int\limits_0^{T_2} P_2\left(t+\frac{2l}{c}\right) e^{-j\omega t}\,dt}{\int\limits_0^{T_1} P_1(t)\, e^{-j\omega t}\,dt}\,\frac{h+l}{h-l},$$

причем пределы изменения угла падения определяет неравенство (5). Коэффициент звукопоглощения можно затем вычислить по известной формуле

$$(11)\qquad \alpha = 1-|\eta|^2.$$

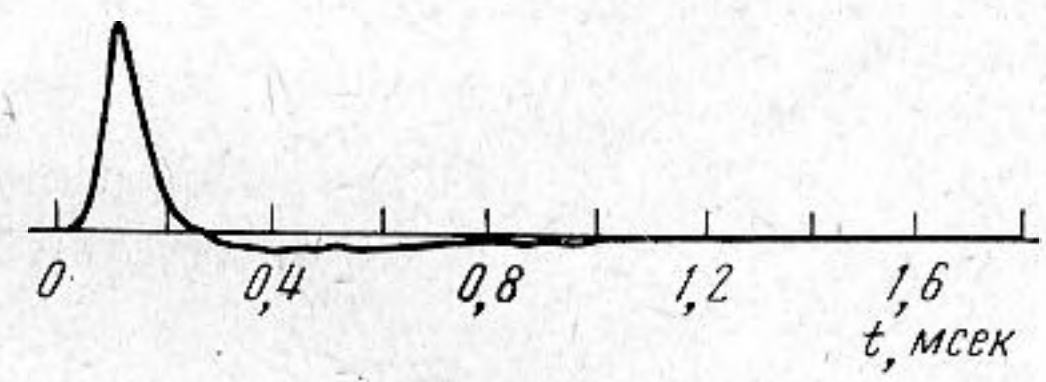
Чтобы можно было отдельно регистрировать прямой и отраженный импульсы, необходимо выполнить следующие условия:

$$(12)\qquad l \geqslant \frac{cT_1}{2},$$

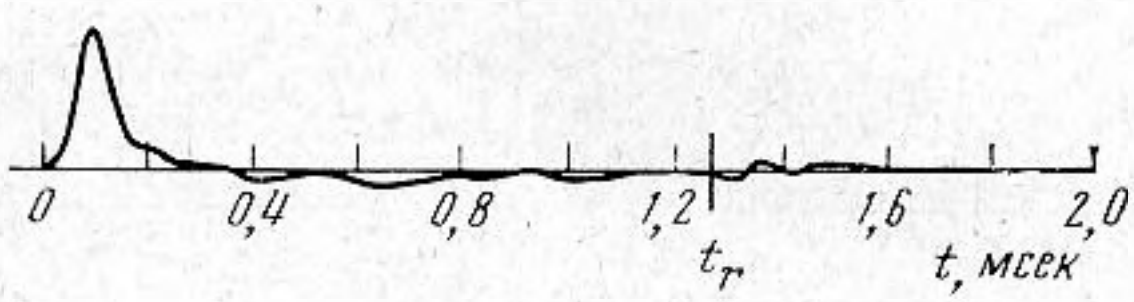
$$(13)\qquad Q \geqslant q_{\text{м}},$$

$$(14)\qquad t_r \geqslant \frac{2l}{c} + T_2,$$

где T_1 — длительность прямого импульса, Q — радиус исследуемой области стены, t_r — время прихода отражения от другой ближайшей стены или ближайшего предмета помещения.



Фиг. 1



Фиг. 2

Максимальное отклонение угла падения на круговую область равно

$$(15)\qquad \Delta\theta \approx \frac{q_{\text{м}}}{h}\,\frac{180^\circ}{\pi}$$

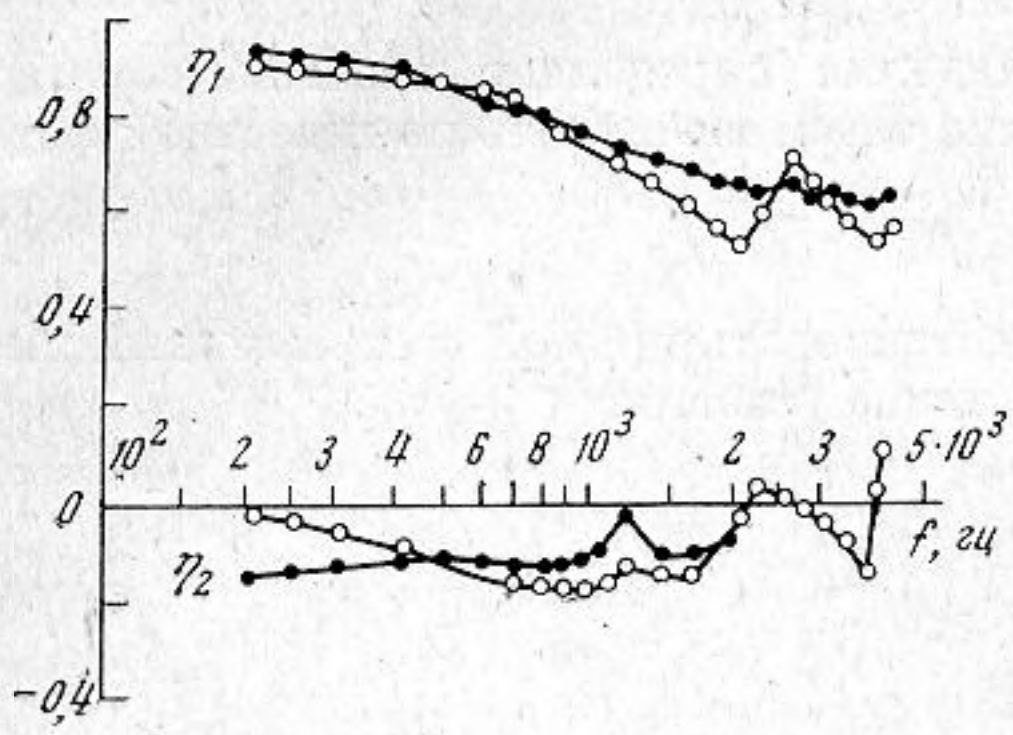
и максимальное отклонение косинуса угла падения

$$(16)\qquad \Delta\cos\theta \approx \frac{1}{2}\,\frac{q_{\text{м}}^2}{h^2}.$$

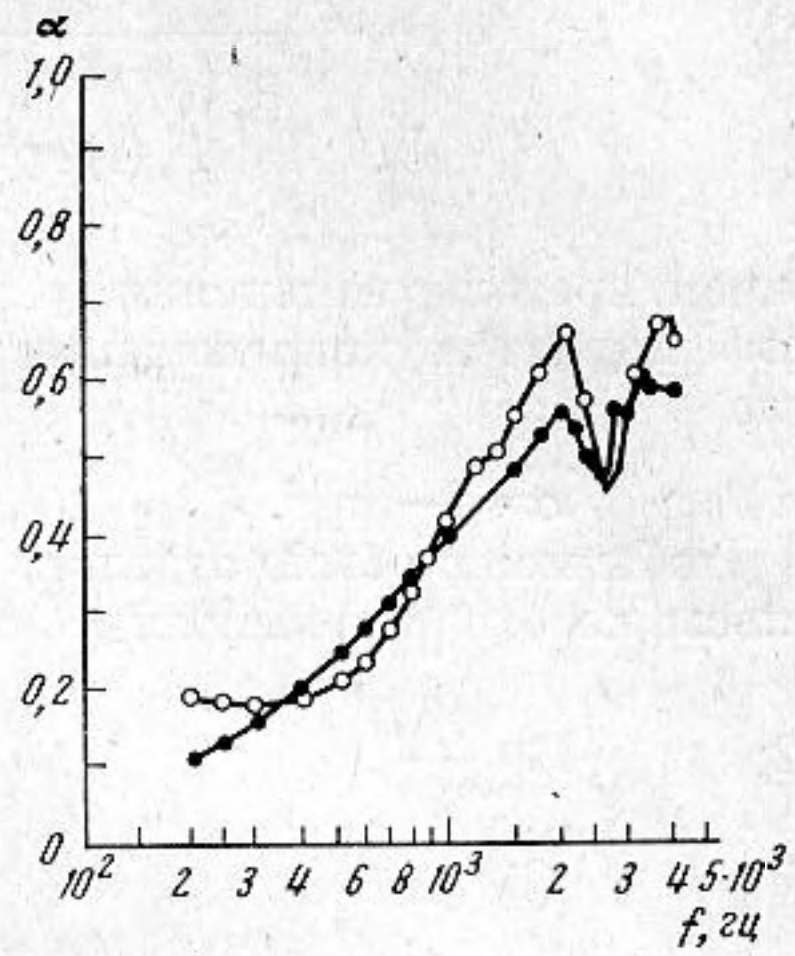
Следовательно, максимальная погрешность в определении коэффициента отражения с помощью формулы (10) будет

$$(17)\qquad \Delta\eta = \left(\frac{\partial\eta}{\partial\cos\theta}\right)_{\theta=0}\frac{1}{2}\,\frac{q_{\text{м}}^2}{h^2}.$$

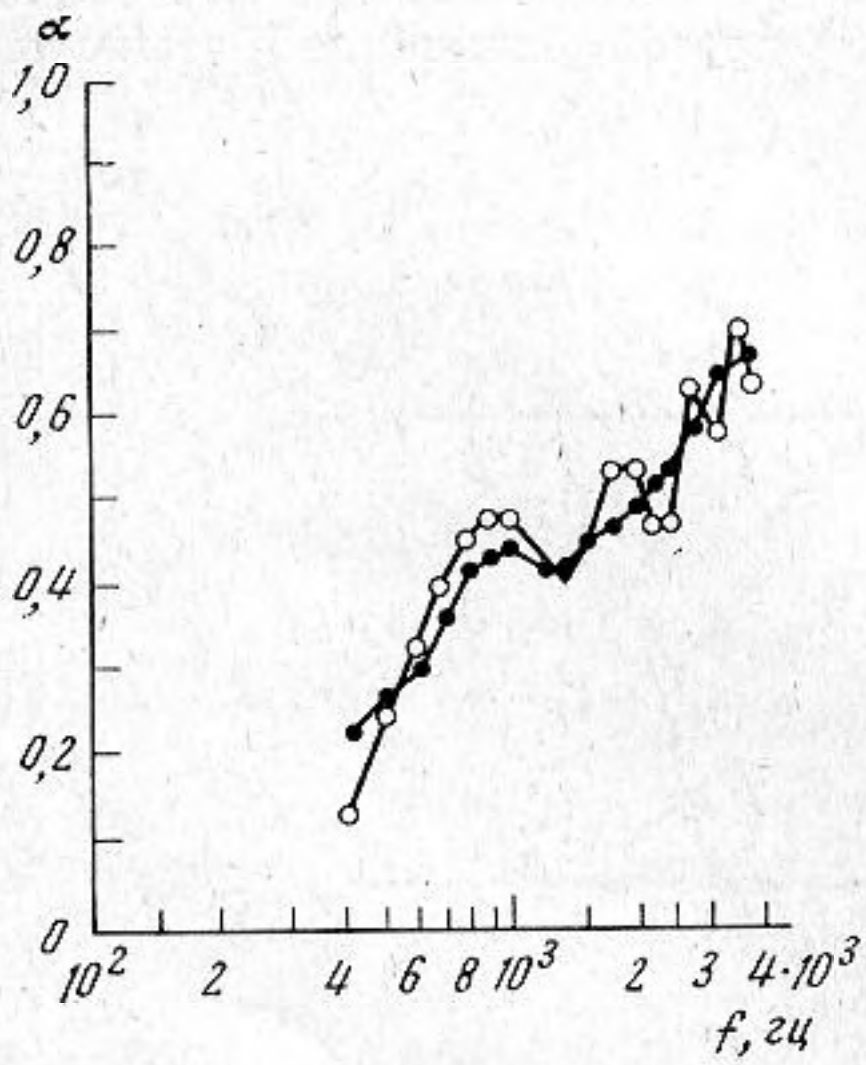
На фиг. 1—6 показаны некоторые экспериментальные результаты. Источником звукового импульса при экспериментах был искровой разряд с расстоянием между электродами 1 *мм*. В этом случае генерируемую волну можно считать сферической. Расстояние от источника до исследуемой



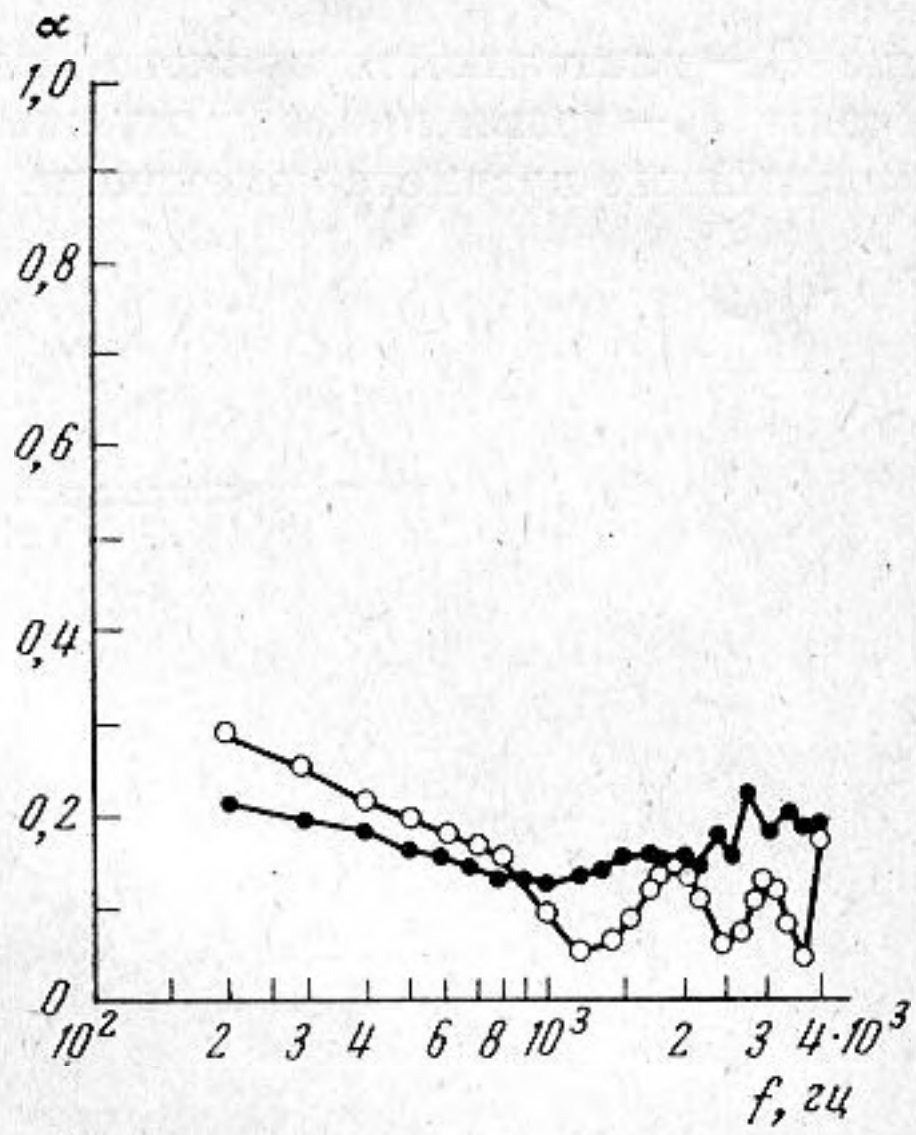
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

поверхности было 4 *м*, расстояние от микрофона до этой поверхности — 30 *см*. При экспериментах использован конденсаторный микрофон фирмы «Брюль и Кьер» 4131, причем ось микрофона параллельна исследуемой поверхности. Это значит, что коэффициент направленности микрофона для прямого и отраженного импульсов был одинаковым. Длительность отраженного импульса не превышала $T_2=1{,}2$ *мсек*. Диаметры всех исследованных участков поверхности удовлетворяли неравенству (13), т. е. $Q>0{,}6$ *м*. Угол падения на круговую область во всех случаях лежал в интервале $0°\leqslant\theta\leqslant8°$ и косинус угла падения — в интервале $0{,}99\leqslant\cos\theta\leqslant1$, т. е. $\Delta\cos\theta=0{,}01$.

Импульсы фотографировались с экрана электронного осциллографа; из полученных осциллограмм методом Симпсона с помощью ЭВМ

«Минск-22» по формуле (10) вычислялся коэффициент отражения η_0 и по формуле (11) — коэффициент звукопоглощения α.

На фиг. 1 показана осциллограмма прямого импульса, на фиг. 2 — осциллограмма импульса, отраженного от пористого звукопоглощающего материала «AKUPLAT». На фиг. 3 представлены частотные зависимости реальной (η_1) и мнимой (η_2) составляющих коэффициента отражения этого материала, рассчитанные из осциллограмм прямого и отраженного импульсов по формуле (10) (жирные линии) и полученные при измерении в трубе Кундта (тонкие линии). На фиг. 4—6 представлены частотные характеристики коэффициента поглощения, рассчитанные по формулам (10) и (11) (жирные линии) и измеренные в трубе Кундта (тонкие линии) для пористого материала «AKUPLAT» (фиг. 4), для текстильной занавески (фиг. 5) и для древесноволокнистой плиты (фиг. 6). Как видно, результаты, полученные из осциллограмм импульсов по формулам (10) и (11), и данные измерений на интерферометре совпадают достаточно хорошо.

Импульсные исследования звукопоглощения позволяют получить коэффициенты звукопоглощения участков поверхности непосредственно в готовом помещении. Это важно, так как акустические свойства образцов зависят от способа и качества их крепления на стенах помещений и т. п. Естественно, что импульсным методом можно исследовать звукопоглощение и при наклонном падении звука.

Автор благодарит профессора С. Н. Ржевкина за интерес, проявленный к работе, и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Е. Скучик.* Основы акустики, том I, II. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
Физический факультет, кафедра акустики

Поступила
26 января 1973 г.