

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

М. И. МОГИЛЕВСКИЙ, Ю. А. ГАСПАРЯН, В. В. ЗОРИН

О ПРОХОЖДЕНИИ ЗВУКА ИЗ ОБЪЕМА ПОМЕЩЕНИЯ
 В ВОЗДУХОВОД

Расчет прохождения звука из некоторого объема в присоединенный к нему волновод имеет теоретический и практический интерес. Он необходим, например, при определении звуковой энергии, проникающей из одного помещения по воздуховодам систем вентиляции в другие помещения.

Покажем, что потери энергии при прохождении звука из объема в волновод совпадают с потерями энергии, обусловленными отражением звука от конца волновода при излучении его из волновода в объем. Рассмотрим систему (рис. 1), состоящую из объема 1 и волновода 2. Открытый конец волновода может выступать в объем или заканчиваться заподлицо со стенкой объема. Выберем произвольные точки в объеме T_1 и волноводе T_2 . Предположим, что для рассматриваемой системы выполняются условия, при которых справедлив принцип взаимности [1]. Это имеет место, в частности, если граничные условия являются импедансными, т. е. на поверхностях помещений и воздуховодов с жесткими стенками.

В соответствии с принципом взаимности при гармонических колебаниях звуковое давление P_{12} в точке T_1 , возбуждаемое единичным источником звука, расположенным в T_2 , равно звуковому давлению P_{21} в точке T_2 при единичном источнике, расположенном в T_1 , т. е.

$$P_{12} = P_{21}, \quad (1)$$

Пусть теперь на открытом конце волновода установлено согласующее устройство, например, рупор, устраняющее отражение звука. В этом случае на основании принципа взаимности

$$\bar{P}_{12} = \bar{P}_{21}, \quad (2)$$

где \bar{P}_{12} и \bar{P}_{21} — звуковое давление в новой системе в прежних точках от тех же источников.

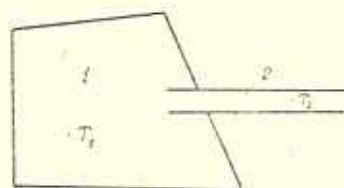


Рис. 1. Акустическая система:
 1 — объем; 2 — волновод.

Снижение звуковой энергии, излучаемой в помещении открытым концом волновода, характеризуется величиной

$$\Delta L = 10 \lg \left(\langle \bar{P}_{12}^2 \rangle / \langle P_{21}^2 \rangle \right), \quad (3)$$

где знак $\langle \rangle$ означает усреднение по времени.

Найдем связь между ΔL и потерями при передаче звуковой энергии из объема в волновод. Пренебрегая быстрозатухающими неоднородными волнами, возбуждаемыми на открытом конце, звуковое поле в волноводе представим в виде суммы свободных волн, распространяющихся на данной частоте [2]:

$$p_{21} = \sum_n A_n \psi_n \cos(\omega t - k_n z - \varphi_n); \quad (4)$$

$$\bar{p}_{21} = \sum_n \bar{A}_n \bar{\psi}_n \cos(\omega t - k_n z - \bar{\varphi}_n).$$

Суммирование в формуле (4) осуществляется только по распространяющимся волнам $n = 0, 1, 2, \dots$, где ω — угловая частота колебаний; k_n — проекция волнового вектора для данной волны на ось волновода z ; $k_n < k$; k — волновое число; A_n, \bar{A}_n — постоянные коэффициенты; $\varphi_n, \bar{\varphi}_n$ — начальные фазы; ψ_n — собственные функции, ортогональные и нормированные условием

$$\int_S \psi_n^2 ds = 1, \quad (5)$$

где S — площадь поперечного сечения волновода; t — время. Проекция на ось z колебательной скорости частиц в волноводе составит, соответственно:

$$V = (\omega \rho)^{-1} \sum_n A_n k_n \psi_n \cos(\omega t - k_n z - \varphi_n); \quad (6)$$

$$\bar{V} = (\omega \rho)^{-1} \sum_n \bar{A}_n k_n \bar{\psi}_n \cos(\omega t - k_n z - \bar{\varphi}_n).$$

Средняя по времени звуковая мощность, переносимая через поперечное сечение волновода, на основании (4) — (6) равна

$$W = (2\omega \rho)^{-1} \sum_n k_n A_n^2, \quad \bar{W} = (2\omega \rho)^{-1} \sum_n k_n \bar{A}_n^2. \quad (7)$$

На частотах, ниже граничной частоты волновода ($f < f_{cp}$), распространяется только нулевая волна: $A_n = 0$, $n = 1, 2, \dots$

Из формул (1) — (3), (7) следует, что

$$\frac{\bar{W}}{W} = \frac{\langle \bar{P}_{21}^2 \rangle}{\langle P_{21}^2 \rangle} = \frac{\langle \bar{P}_{12}^2 \rangle}{\langle P_{12}^2 \rangle},$$

поэтому

$$\Delta L = \Delta L_w = 10 \lg (\bar{W}/W).$$

Таким образом, потери при излучении звуковой энергии из волновода в объем совпадают с потерями при передаче энергии из объема в волновод.

На частотах, выше граничной, звуковое давление и колебательная скорость распределены неравномерно по сечению воздуховода. Поэтому усредним звуковое давление в волноводе по его поперечному сечению и времени. Имеем:

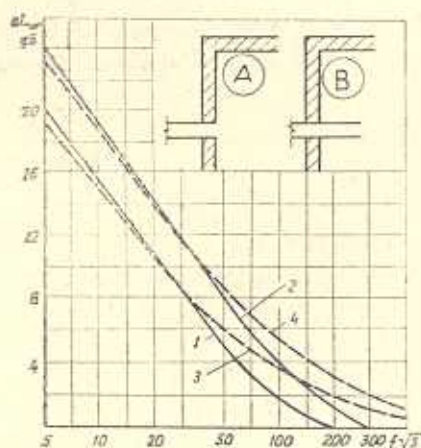
$$\langle P_{12}^2 \rangle = \langle P_{21}^2 \rangle = \frac{1}{2} \sum_n A_n^2; \quad \langle \bar{P}_{12}^2 \rangle = \langle \bar{P}_{21}^2 \rangle = \frac{1}{2} \sum_n A_n^2.$$

Здесь знак $\langle \rangle$ понимается шире, чем в формуле (3) — он означает усреднение по времени и пространству. Поэтому $\langle P_{12}^2 \rangle$ и $\langle \bar{P}_{12}^2 \rangle$ — средние квадраты звукового давления в T_1 по времени и по положению единичного источника в поперечном сечении волновода, проходящем через T_2 .

Тогда

$$\Delta L_i = \left(\frac{\sum_n \bar{A}_n^2}{\sum_n A_n^2} \right), \quad \Delta L = \left(\frac{\sum_n k_n \bar{A}_n^2}{\sum_n k_n A_n^2} \right). \quad (8)$$

Рис. 2. Снижение уровня звуковой мощности ΔL_w при передаче звука из объема в волновод. А — волновод заканчивается заподлицо со стенкой объема, В — волновод выступает в объем. 1, 2 — расчетные значения; 3, 4 — опытные значения; f — частота колебаний, Гц; S — площадь поперечного сечения волновода.



Известно, что в звуковых полях в волноводах преобладают волны с низкими номерами, т. е. величина A_n убывает с ростом n . Кроме того, с ростом номера волны монотонно убывает и величина k_n [2], так что в суммах $\sum_n k_n \bar{A}_n^2$ и $\sum_n k_n A_n^2$ увеличивается вклад свободных волн с меньшими (низкими) номерами по отношению к их вкладу в суммах $\sum_n \bar{A}_n^2$ и $\sum_n A_n^2$. Если учесть при этом, что $k_n \rightarrow k$ при $n \rightarrow 0$ и (или) при росте частоты ω , то из формул (8) следует, что после граничной частоты также имеет место соотношение $\Delta L = \Delta L_w$. Таким образом, потери энергии при передаче звука из объема в волновод совпадают с потерями энергии при излучении звука из волновода в объем.

На рис. 2 приведены расчетные значения потерь энергии (звуковой мощности) при передаче звука из объема в волновод и измеренные опытным путем в Институте отопления, вентиляции и основ строительной техники (г. Берлин, ГДР). Расчетные значения, которые на основании сказанного принимались равными потерям энергии при излучении звука из волновода в объем, хорошо согласуются с экспериментальными.

ЕрПИ им. К. Маркса

15.V.1985

Մ. Բ. ՄՈՓԵԼԵՍՅԱՆ, ՅՈՒ. Ա. ԳԱՐՊԱՐՅԱՆ, Վ. Վ. ԶԱՐԵՆ

ՇԻՆՈՒՔՅՈՒՆԻՅ ԳԵՊԻ ՕԳԱՂԱՂՈՐԴԱՓՈՂ ԶԱՅՆԻ ԱՆՅՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Փոխադարձության սկզբունքի հիման վրա քննարկված է ձայնային էներգիայի կորուստների տեսական հաշվարկը օդահաղորդափողից դեպի շինությունն ճառագայթման դեպքում:

Բերված են ձայնային հղորության կորուստների հաշվարկային արժեքները, երբ ձայնը հաղորդվում է շինությունից դեպի օդահաղորդափող և հակառակը, որոնք համընկնում են փորձնական տվյալների հետ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Morse P. M., Ingard U. U. Theoretical acoustics. — New York: Mc Graw Hill Book Co, 1968—917 p.
2. Исакович М. А. Общая акустика.— М.: Наука, 1973.— 496 с.