АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XI 1965 Вып. 2

УДК 534.833.524.2

О ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ СО СВЯЗЬЮ ПО КОНТУРУ

В. И. Заборов

Исследуется прохождение звука через ограждение из двух одинаковых панелей, связанных между собой по контуру ребрами. Показано, что для панелей, имеющих значительно большую изгибную жесткость, чем ребра, основную роль в передаче звука через ребра играют изгибные волны. Если ребра весьма жестки, то прохождение звука через ограждение не может быть объяснено без учета возникающих в панелях продольных волн. Получены простые формулы для вычисления дополнительной звукоизоляции двойного ограждения по сравнению с однослойным. Расчетные данные находятся в согласии с результатами проведенных измерений.

В работах [1—4] рассматривалась теория звукоизоляции двойных ограждений без учета связи между составляющими плитами по контуру. На практике, однако, двойные стены, как правило, состоят из панелей, достаточно жестко связанных между собой через смежные конструкции. Как показывают измерения [5, 6], до граничной частоты $f_{гр}$ величина звукоизоляции двойного ограждения мало зависит от условий на краях. На частотах выше граничной передача звука по контуру резко снижает величину звукоизоляции двойного ограждения.

Точный расчет звукоизоляции с учетом условий на краях оказался чрезвычайно сложным даже для однослойной стены [7, 8]. Поэтому заслуживает внимания способ расчета, приведенный в работе [9].

Ниже излагается приближенный расчет звукоизоляции двойного ограждения со связью по контуру. Принятая расчетная схема показана на фиг. 1. Ограждение состоит из двух одинаковых плит с цилиндрической жесткостью D_1. По двум сторонам они жестко связаны с плитами-ребрами, имеющими цилиндрическую жесткость D_2. В другом направлении плиты безграничны. Плиты разделены воздушным промежутком или упругим слоем.

Общую величину излучаемой ограждением звуковой мощности мы будем определять как сумму значений мощности, прошедшей через ребра, и мощности, передаваемой через промежуточный слой ограждения, составленного из двух безграничных плит, не связанных между собой по контуру. Величина звукопроницаемости промежуточного слоя находится по формулам работы [3]. Поэтому задача сводится к исследованию передачи звука через связи по контуру. Звуковое давление, действующее на плиту *1*, представим в виде

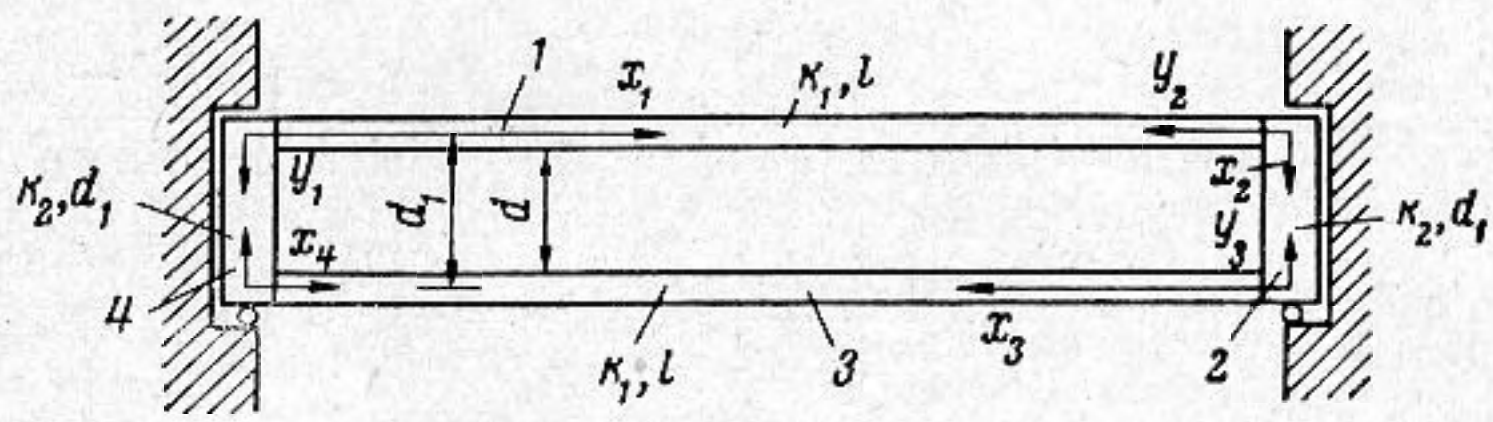
$$p = \sum_{n=0,1,2,\ldots}^{\infty} p_n \cos\frac{n\pi x}{l}, \tag{1}$$

где l — длина ограждения (расстояние между ребрами). Реакцией звукового поля на излучающую плиту (плита *3*) пренебрегаем. Примем сначала, что в плитах возникают только колебания изгиба.

Выражение свободных изгибных колебаний плиты напишем в форме (сомножитель $\exp(-i\omega t)$ здесь и в дальнейшем опущен)

$$w(x)=\frac{1}{2}w(0)(\operatorname{ch}kx+\cos kx)+\frac{1}{2}\frac{w'(0)}{k}(\operatorname{sh}kx+\sin kx)-$$
$$-\frac{Q(0)}{2Dk^3}(\operatorname{sh}kx-\sin kx)-\frac{M(0)}{2Dk^2}(\operatorname{ch}kx-\cos kx). \qquad (2)$$

Здесь $w(0)$, $w'(0)$, $Q(0)$ и $M(0)$ — начальные значения смещения, угла поворота, перерезывающей силы и изгибающего момента в плите (при $x=0$), $k=\sqrt[4]{m\omega^2/D}$ — волновое число для изгибной волны, в общем случае комплексное, m — масса единицы площади плиты, ω — круговая частота.



Фиг. 1

Уравнение (2) описывает движение плит *2*, *3* и *4*. Для плиты *1* имеем

$$w_1(x)=W(x)+\frac{w_1(0)}{2}(\operatorname{ch}k_1x+\cos k_1x)+\frac{w_1'(0)}{2k_1}(\operatorname{sh}k_1x+\sin k_1x)-$$
$$-\frac{Q_1(0)}{2D_1k_1^3}(\operatorname{sh}k_1x-\sin k_1x)-\frac{M_1(0)}{2D_1k_1^2}(\operatorname{ch}k_1x-\cos k_1x), \qquad (3)$$

причем

$$W(x)=\sum\frac{p_n}{Z_n}\left[\cos\frac{n\pi x}{l}-\frac{1}{2}(\operatorname{ch}k_1x+\cos k_1x)+\frac{1}{2}\left(\frac{n\pi}{k_1l}\right)^2(\operatorname{ch}k_1x-\cos k_1x)\right],$$

$$Z_n=\frac{D_1}{l^4}[(n\pi)^4-(k_1l)^4],\quad k_1=\sqrt[4]{\frac{m_1\omega^2}{D_1}}.$$

Уравнения движения плит должны удовлетворять следующим граничным условиям:

$$w_1(0)=0,\quad w_2(0)=0,\quad w_3(0)=0,\quad w_4(0)=0 \qquad (4)$$
$$w_1(l)=0,\quad w_2(d_1)=0,\quad w_3(l)=0,\quad w_4(d_1)=0, \qquad (5)$$
$$w_1'(0)=w_4'(d_1),\quad w_2'(d_1)=w_3'(0),\quad w_1(l)=w_2'(0),\quad w_4'(0)=w_3'(l), \qquad (6)$$
$$M_1(0)=M_4(d_1),\quad M_2(d_1)=M_3(0),\quad M_1(l)=M_2(0),\quad M_4(0)=M_3(l), \qquad (7)$$

где d_1 — расстояние между срединными плоскостями плит *1* и *3*.

Из решения системы уравнений (4) — (7) мы получаем интересующие нас значения

$$w_3'(0)=k_0\frac{g_1(k_0\beta_1+\lambda_1)-g_2(k_0^2\beta_2+\lambda_2)}{2k_0^2+k_0^2\beta_2\lambda_3+2k_0\lambda_1\beta_1+\beta_3\lambda_2},$$

$$\frac{M_3(0)}{D_1k_1}=k_0\frac{g_1(\beta_3+\lambda_3)+g_2(k_0\beta_1+\lambda_1)}{2k_0^2+k_0^2\beta_2\lambda_3+2k_0\lambda_1\beta_1+\beta_3\lambda_2},$$

$$\frac{Q_3(0)}{D_1k_1^2} = w_3'(0)\frac{\operatorname{sh} k_1l + \sin k_1l}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l} - \frac{M_3(0)}{D_1k_1}\frac{\operatorname{ch} k_1l - \cos k_1l}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l}$$

где

$$\lambda_1 = k_0^2\alpha_1\alpha_3\beta_2 + k_0\alpha_2\alpha_3\beta_1 - k_0\alpha_1^2\beta_1 + \alpha_1\alpha_2\beta_3,$$

$$\lambda_2 = k_0^2\alpha_1^2\beta_2 + 2k_0\alpha_1\alpha_2\beta_1 - \alpha_2^2\beta_3,$$

$$\lambda_3 = 2k_0\alpha_1\alpha_3\beta_1 + \alpha_1^2\beta_3 - k_0^2\alpha_3^2\beta_2,$$

$$g_1 = \frac{W'(l)(\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l) - k_1W(l)(\operatorname{ch} k_1l - \cos k_1l)}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l}$$

$$g_2 = \frac{k_1W(l)(\operatorname{sh} k_1l + \sin k_1l) - (1/k_1)W''(l)(\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l)}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l},$$

$$\alpha_1 = \frac{\operatorname{sh} k_1l\cos k_1l - \operatorname{ch} k_1l\sin k_1l}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l}, \qquad \alpha_2 = \frac{\operatorname{ch} k_1l\cos k_1l - 1}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l},$$

$$\alpha_3 = \frac{2\operatorname{sh} k_1l\sin k_1l}{\operatorname{sh} k_1l - \sin k_1l}, \qquad k_0 = \frac{D_1k_1}{D_2k_2},$$

$$\beta_1 = \frac{\operatorname{sh} k_2d_1\cos k_2d_1 - \operatorname{ch} k_2d_1\sin k_2d_1}{\operatorname{sh} k_2d_1 - \sin k_2d_1}, \qquad \beta_2 = \frac{\operatorname{ch} k_2d_1\cos k_2d_1 - 1}{\operatorname{sh} k_2d_1 - \sin k_2d_1},$$

$$\beta_3 = \frac{2\operatorname{sh} k_2d_1\sin k_2d_1}{\operatorname{sh} k_2d_1 - \sin k_2d_1}, \qquad k_2 = \sqrt[4]{\frac{m_2\omega^2}{D_2}}.$$

В реальных ограждениях, как правило, $k_1l \gg 1$ и поэтому $\operatorname{sh} k_1l \approx \approx \operatorname{ch} k_1l \gg 1$. Пренебрегая несущественными членами, находим среднюю по длине l величину квадрата смещения плиты *3*

$$(w_3^2)_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\left[\frac{w_3'(0)}{k_1} - \frac{M_3(0)}{2D_1k_1^2}\right]^2 + \frac{1}{2}\left[\frac{M_3(0)}{2D_1k_1^2}\right]^2. \tag{8}$$

Как указывалось выше, основной интерес при исследовании звукоизоляции двойных ограждений со связью по контуру представляет область частот выше граничной частоты.

При распределении звукового давления по закону (1) явление волнового совпадения возникает каждый раз, когда длина свободной изгибной волны $\lambda_u = 2l / n$, что равносильно равенству $k_1l = n\pi$ $(Z_n = 0)$. Известно, что для частот $f > f_{\text{гр}}$ механизм звукоизоляции ограждения определяется явлением совпадения. Для вычисления величины звукоизоляции достаточно ограничиться рассмотрением узкой области углов падения звуковой волны вблизи угла совпадения [3].

Отсюда следует, что в нашем случае при $f > f_{\text{гр}}$ можно оставить в уравнении (8) только один член с $Z_n \approx 0$. Тогда выражение для квадрата средней колебательной скорости плиты *3* будет иметь вид:

$$(w_3^2)_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\left(\frac{k_0p_n\omega}{KZ_n}\right)^2\{[(4k_0^2\beta_2 + 4k_0\beta_1 - \beta_3)(\cos n\pi - \cos k_1l) +$$
$$+ (2k_0\beta_1 - \beta_3)(\cos n\pi\cos k_1l - 1)\sin k_1l - 2k_0(k_0\beta_2 + \beta_1)\cos n\pi\sin^2 k_1l]^2 +$$
$$+ \sin^2 k_1l\,[2k_0(k_0\beta_2 + \beta_1)\cos n\pi\cos k_1l + (2k_0\beta_1 - \beta_3)\cos n\pi\sin k_1l -$$
$$- 2k_0^2\beta_2 - 2k_0\beta_1 + \beta_3]^2\}, \tag{9}$$

где $K = a_1 - a_2 \sin k_1 l \cos k_1 l + a_3 \cos^2 k_1 l$,

$$a_1 = 4k_0^2(1 - \beta_1^2) - 8k_0^3\beta_2(k_0\beta_2 + \beta_1),$$
$$a_2 = 4k_0^2(1 - 3\beta_1^2) - 8\beta_1\beta_2 k_0^3 + 4k_0\beta_1\beta_3,$$
$$a_3 = (4k_0\beta_1 - \beta_3)\beta_3 + 8k_0^3\beta_2(k_0\beta_2 + \beta_1), \quad Z_n = 4\frac{m_1\omega^2}{k_1 l}(n\pi - k_1 l).$$

Заметим, что во многих случаях $k_2 d_1 < 1$ и $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = -k_2 d_1 / 2$, $\beta_3 = 6 / k_2 d_1$.

Величина $(w_3^2)_{\text{ср}}$ значительно изменяется даже при малых изменениях частоты. Имея в виду, что звуковое поле характеризуется некоторой полосой частот, необходимо произвести усреднение значения $(w_3^2)_{\text{ср}}$ и по частоте. Предварительно в выражении (9) необходимо заменить k_1 на $\bar{k}_1 = k_1(1 - 1/4\, i\eta)$, где η — коэффициент потерь для плит. Уравнение (9) становится при этом весьма сложным, а его интегрирование приводит к чрезвычайно громоздкому выражению.

Ограничимся рассмотрением двух частных случаев. Если жесткость плиты D_1 значительно больше жесткости ребра D_2, т. е. $k_0 \gg 1$, то абсолютная величина квадрата колебательной скорости плиты *3* в области $\varepsilon = k_1 l - n\pi$ приближенно будет

$$w^2 = \frac{1}{\pi}\left(\frac{p_n k_1 l}{8 m_1 \omega k_0 \beta_2}\right)^2 \left(\frac{4}{\eta k_1 l}\right)^3 \frac{1}{2\varepsilon}. \tag{10}$$

Напротив, при $k_0 \ll 1$

$$\dot{w}^2 = \frac{1}{18\pi}\left(\frac{p_n k_0 k_1 l}{m_1 \omega \beta_3}\right)^2 \left(\frac{4}{\eta k_1 l}\right)^3 \frac{1}{2\varepsilon}. \tag{11}$$

В дальнейшем нас будет интересовать величина дополнительной звукоизоляции ΔR двойного ограждения по сравнению с однослойным. Частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения может быть построена по методике, изложенной в работах [10—12].

Дополнительную звукоизоляцию ΔR_1 при передаче звука только по контуру через ребра между плитами определим как

$$\Delta R_1 = 10 \lg \frac{\dot{w}_0^2}{\dot{w}^2}\, дб, \tag{12}$$

где $\dot{w}_0^2$ — усредненное значение квадрата колебательной скорости однослойной шарнирно опертой в одном направлении и безграничной в другом — плиты, находящейся под действием звукового давления (1).

Выполнив для однослойной плиты вычисления, аналогичные проведенным выше, получим

$$\dot{w}_0^2 = \left(\frac{p_n k_1 l}{2\pi m_1 \omega}\right)^2 \frac{2}{\eta k_1 l} \frac{\pi}{2\varepsilon}. \tag{13}$$

Теперь на основании уравнений (10)—(13) находим величину дополнительной звукоизоляции двойного ограждения при передаче звука только через ребра для частот выше граничной. При $k_0 \gg 1$

$$\Delta R_1 = 20 \lg k_0 \beta_2 \frac{\eta k_1 l}{\sqrt{2}}, \tag{14}$$

и в случае $k_2 d_1 < 1$

$$\Delta R_1 = 10 \lg \left(\frac{l d_1 \omega}{D}\right)^2 m_1 D_1 + 20 \lg \eta - 9 дб. \tag{15}$$

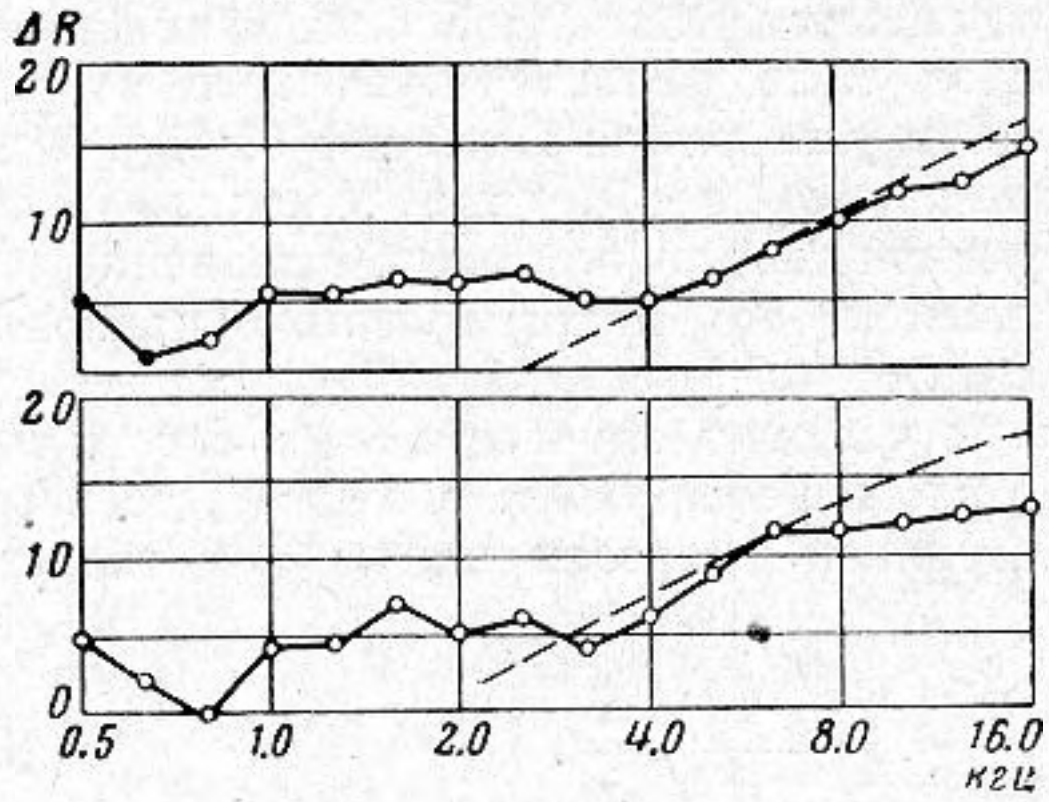
При $k_0 \ll 1$

$$\Delta R_1 = 20 \lg 3 \frac{\beta_3}{k_0} \frac{\eta k_1 l}{8}, \tag{16}$$

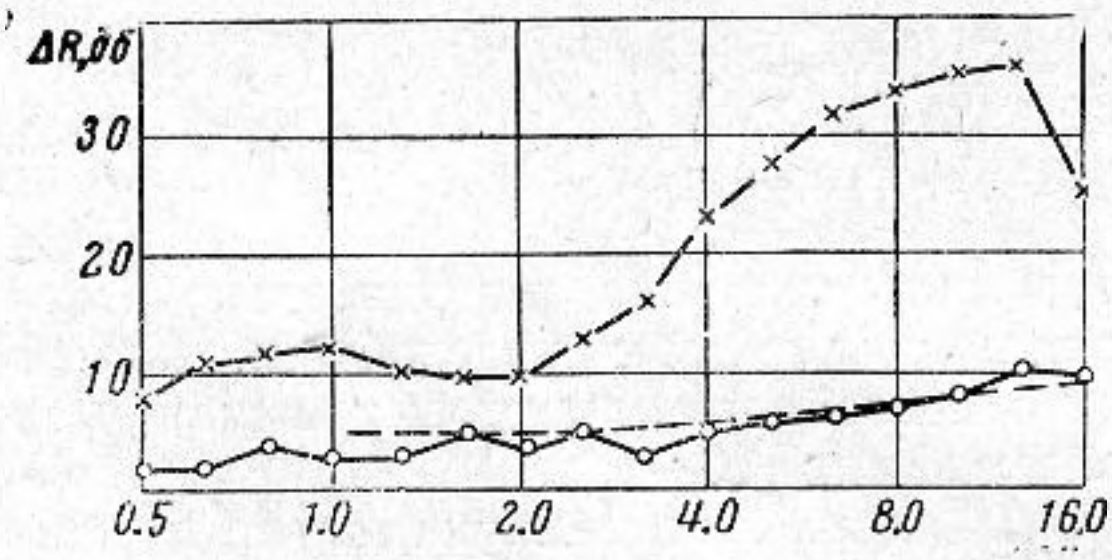
и если $k_2 d_1 < 1$, то

$$\Delta R_1 = 20 \lg \frac{D_2}{D_1} \frac{l}{d_1} + 20 \lg \eta + 7 дб. \tag{17}$$

Чтобы получить полную величину дополнительной звукоизоляции ΔR, необходимо учесть прохождение звука и через промежуточный слой между плитами. Представим значение дополнительной звукоизоляции двойного ограждения без связи по контуру в виде $\Delta R_2 = 10 \lg 1/\tau$. Величину звукопроницаемости τ для различных типов промежуточных слоев при $f > 2f_{гр}$ можно определить на основе работы [3].



Фиг. 2



Фиг. 3

Тогда при $k_0 \gg 1$ мы получаем

$$\Delta R = -10 \lg \left[\left(\frac{\sqrt{2}}{\eta k_1 l k_0 \beta_2} \right)^2 + \tau \right], \tag{18}$$

а при $k_0 \ll 1$

$$\Delta R = -10 \lg \left[\left(\frac{8 k_0}{3 \eta k_1 l \beta_3} \right)^2 + \tau \right]. \tag{19}$$

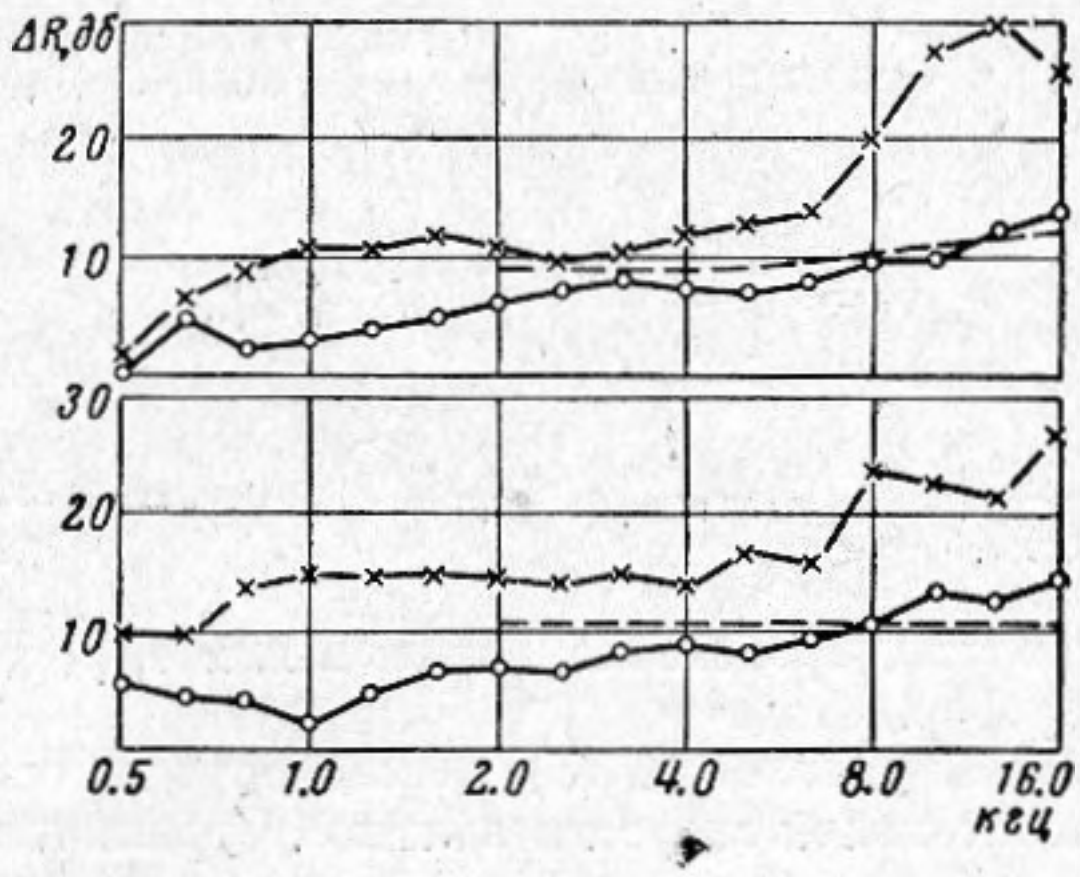
На фиг. 2, 3, 4 приведены измеренные и вычисленные значения ΔR для различных моделей двойных ограждений из фанеры в 1/5 натуральной величины со сплошным воздушным промежутком *. Кривые с крестиками относятся к ограждениям из двух одинаковых плит, не связанных между собой, а кривые с точками — к тем же плитам, соединенным по контуру на клею ребрами из фанеры. Размеры плит в плане составляют 580×580 *мм*^{2}.

В одних моделях (фиг. 2 и 3) плиты имели толщину $h_1 = 12$ *мм*, в других (фиг. 4) $h_1 = 6$ *мм*; соответственно толщина воздушного промежутка была $d = 10$; 20; 8; 11; 21 *мм* при толщине ребер $h_2 = 4$ *мм* (фиг. 2), $h_2 = 20$ *мм* (фиг. 3) и $h_2 = 28$ *мм* (фиг. 4).

К случаю $k_0 \gg 1$ относятся модели, частотные характеристики ΔR которых приведены на фиг. 2. Пунктирными линиями нанесены кривые, вычисленные по формуле (14) для $\eta = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$. При $f > 2f_{гр}$ опытные и теоретические значения хорошо согласуются. Только на высоких частотах, когда по толщине воздушного промежутка укладывается целое число полуволн, наблюдается замедление роста дополнительной звукоизоляции вследствие передачи звука через воздушный промежуток. В остальных областях частот $f > 2f_{гр}$ величина дополнительной звукоизоляции практически определяется звуковой энергией, которую передает изгибная волна, проходя через ребра по контуру.

* Измерения проведены И. Н. Ильиным.

Для двойных ограждений, звукоизоляция которых приведена на фиг. 4, $k_0 \ll 1$ и первый член в формуле (19) значительно меньше второго. Тогда, согласно этой формуле, передача звука должна происходить только через воздушный промежуток, а ребра не должны оказывать влияния. Однако, как видно из фиг. 4, при отсутствии связи по контуру величина дополнительной звукоизоляции для частот $f > 2f_{гр}$ значительно выше, чем при наличии ребер. Такое различие между экспериментальными и теоретическими результатами указывает на то, что расчетная схема при $k_0 \ll 1$ не



Фиг. 4

описывает адекватно явления прохождения звука через двойное ограждение. Можно полагать, что основной причиной снижения звукоизоляции является возникновение в плитах ограждения продольных волн, которые передаются в другую плиту в виде изгибных и продольных волн.

При учете изгибных и продольных колебаний в плитах граничные условия принимают вид:

$$w_1(0) = 0, \quad w_1(l) = 0, \quad w_3(0) = 0, \quad w_3(l) = 0,$$
$$w_2'(0) = w_1'(l), \quad w_1'(0) = w_4'(d), \quad w_3'(0) = w_2'(d),$$
$$w_3'(l) = w_4'(0), \quad w_2(0) = -u_1(l), \quad w_4(d) = u_1(0),$$
$$w_2(d) = u_3(0), \quad w_4(0) = -u_3(l), \quad M_1(l) = M_2(0),$$
$$M_4(d) = M_1(0), \quad M_3(0) = M_2(d), \quad M_4(0) = M_3(l),$$
$$Q_4(d) = E_1 h_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\right)_{x=0}, \qquad Q_2(0) = E_1 h_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\right)_{x=l}$$
$$Q_2(d) = E_1 h_1 \left(\frac{\partial u_3}{\partial x}\right)_{x=0}, \qquad Q_4(0) = E_1 h_1 \left(\frac{\partial u_3}{\partial x}\right)_{x=l}.$$

Здесь u_1 и u_3 — продольные смещения плит *1* и *3*, E_1 — модуль Юнга для плит, d — расстояние между плитами.

Решение этой системы уравнений в общем виде оказывается чрезвычайно громоздким. Нас же сейчас интересует главным образом тот случай, когда жесткость при изгибе ребра значительно больше жесткости плиты. В поставленную задачу можно внести некоторые упрощения, если принять ребра абсолютно жесткими. Тогда для последних справедливы следующие уравнения:

$$w(x) = w(0) + w'(0)x, \qquad w'(x) = w'(0),$$
$$M(x) = -\frac{1}{2} w(0) m_2 \omega^2 x^2 - \frac{1}{6} w'(0) m_2 \omega^2 x^3 + Q(0)x + M(0),$$
$$Q(x) = -w(0) m_2 \omega^2 x - \frac{1}{2} w'(0) m_2 \omega^2 x^2 + Q(0).$$

В результате при $k_1 l \gg 1$ находим, пренебрегая несущественными членами,

$$w_3'(0) = -\frac{1}{2}\sum \frac{k_1 p_n}{Z_n} \frac{1-\cos n\pi\left[\sin k_1 l + \left(\frac{n\pi}{k_1 l}\right)^2 \cos k_1 l\right]}{\cos n\pi - \sin k_1 l + (1-\nu_1)\cos k_1 l}, \quad (20)$$

$$\frac{M_3(0)}{D_1 k_1} = -\frac{1}{2}\sum \frac{k_1 p_n}{Z_n} \frac{\cos n\pi - \sin k_1 l + (1-\nu_1+\nu_2)\cos k_1 l}{\cos n\pi\,[\cos n\pi - \sin k_1 l + (1-\nu_1)\cos k_1 l]} \times$$

$$\times \left\{1 - \cos n\pi\left[\sin k_1 l + \left(\frac{n\pi}{k_1 l}\right)^2 \cos k_1 l\right]\right\}, \quad (21)$$

где

$$\nu_1 = \frac{1}{2}\frac{k_3^2}{k_1}\frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{d}{h_1}\right)^3 h_2 + 2\beta,$$

$$\nu_2 = \frac{1}{2}\frac{k_3^2}{k_1}\frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{d}{h_1}\right)^3 h_2 + 2\beta\left(1 + \frac{h_1}{d}\right), \qquad \beta = 3\frac{\rho_1}{\rho_2}\frac{d}{h_1 h_2 k_1},$$

$k_3 = \omega / c_1$, c_1 — скорость продольной волны в плите, ρ_1 и ρ_2 — плотности материалов плит и ребер.

Теперь посредством уравнения (8) можно определить среднюю величину квадрата колебательной скорости плиты *3*. Ограничиваясь для $f > f_{гр}$ в уравнениях (20) и (21) одним членом с $Z_n \approx 0$, имеем с учетом потерь в плитах

$$|\dot{w}_3|_{ср}^2 = \left(\frac{p_n k_1 l}{16 m_1 \omega}\right)^2 \times$$

$$\times \frac{[1 - \cos n\pi(\sin k_1 l + \cos k_1 l)]^2 + (\eta k_1 l/4)^2(\sin k_1 l - \cos k_1 l)^2}{[(n\pi - k_1 l)^2 + (\eta k_1 l/4)^2][\cos^2 k_1 l + (\eta k_1 l/4)^2 \sin^2 k_1 l]}\left(1 + \frac{L}{N}\right), \quad (22)$$

где

$$L = \cos k_1 l\,[2(\nu_2 - 1)(\cos n\pi - \sin k_1 l) + (\nu_2^2 - 2\nu_1\nu_2 + 2\nu_1)\cos k_1 l];$$

$$N = [\cos n\pi - \sin k_1 l + (1-\nu_1)\cos k_1 l]^2 + \left(\frac{\eta k_1 l}{4}\right)^2 \times$$

$$\times [(1-\nu_1)\sin k_1 l + (1+\varkappa)\cos k_1 l]^2; \qquad \varkappa = 2\frac{k_3^2}{k_1}\frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{d}{h_1}\right)^3 \frac{h_2}{l}.$$

При $\nu_1 > 2$ выражение (22) достигает наибольшей величины в случае

$$\cos n\pi - \sin k_1 l = (\nu_1 - 1)\cos k_1 l. \quad (23)$$

Произведем усреднение величины квадрата колебательной скорости по частоте, при $\nu_1 > 2$ и малых изменениях $k_1 l = k_0 l + \varepsilon$, где $k_0 l = \sqrt[4]{m_1 \omega_0^2 / D_1 l}$ удовлетворяет уравнению (23). При этом мы получаем

$$\dot{w}^2 \approx \left(\frac{p_n k_0 l}{16 m_1 \omega_0}\frac{\nu_1 - 2}{n\pi - k_0 l}\frac{\cos k_0 l}{\nu_1 - 1}\right)^2 \frac{4}{\eta k_0 l}(\nu_2^2 - 2\nu_2 + 2)\frac{\pi}{2\varepsilon}. \quad (24)$$

Используя уравнения (12) и (13), можно получить значение дополнительной звукоизоляции двойного ограждения при передаче звука только через ребра

$$\Delta R_1 = 20\lg \frac{4\sqrt{2}\,\delta}{\pi\cos\delta}\frac{\nu_1 - 1}{\nu_1 - 2}\frac{1}{\sqrt{\nu_2^2 - 2\nu_2 + 2}}. \quad (25)$$

Величина $\delta = k_0 l - n\pi$ находится из уравнения (23), которое представляется в виде $1 - \sin\delta = (\nu_1 - 1)\cos\delta$. Уравнение (25) можно упростить, если учесть, что при $\nu_1 > 3$ $\cos\delta \approx 2/(\nu_1 - 1)$. Кроме того, обычно первый член в ν_1 и ν_2 пренебрежимо мал по сравнению со вторым. Тогда мы придем к выражению:

$$\Delta R_1 = 20\lg\frac{5\sqrt{2}}{\pi}\frac{2\beta - 1}{\beta - 1}\frac{1}{\sqrt{\left(2\beta\frac{d + h_1}{d}\right)^2 - 4\beta\frac{d + h_1}{d} + 2}}. \qquad (26)$$

Наконец, при $\beta > 3$ выражение ΔR_1 принимает еще более простой вид:

$$\Delta R_1 = 13 - 20\lg(1 + h_1/d). \qquad (27)$$

Простые значения дополнительной звукоизоляции можно получить также при $\beta = 0{,}5$ и $\beta = 1{,}0$. Для этого указанные значения β следует подставить в выражение (22) и произвести его усреднение по частоте. В этом случае $\Delta R_1 \approx 12{,}5$ *дб*.

Полная величина дополнительной звукоизоляции определяется как

$$\Delta R = -10\lg\left[\left(\frac{\pi}{4\sqrt{2}}\frac{\cos\delta}{\delta}\frac{\nu_1 - 2}{\nu_1 - 1}\right)^2(\nu_2^2 - 2\nu_2 + 2) + \tau\right].$$

Вычисленные по формулам (26)—(27) частотные характеристики дополнительной звукоизоляции показаны на фиг. 3 и 4 пунктирными линиями.

Удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов указывает на правильность принятой картины прохождения звука через двойное ограждение с жесткой при изгибе связью по контуру. Отсюда, в частности, следует, что мероприятия по повышению звукоизоляции таких ограждений должны быть направлены на уменьшение передачи не только изгибных, но и продольных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Cremer. Näherungsweise Berechnung der von einem schwimmenden Estrich zu erwartenden Verbesserung. Fortschritte und Forschungen im Bauwesen Reiche D. H. 2, 1952, 123—136.
2. A. London. Transmission of reverberant sound through double walls. J. Acoust. Soc. America, 1950, 22, 2, 270—279.
3. В. И. Заборов. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. М., Госстройиздат, 1962.
4. В. И. Заборов. О звукоизоляции двойных ограждений с пористым упругим промежуточным слоем. Акуст. ж., 1963, 9, 2, 182—186.
5. K. Gösele. Der Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Schalldämmung von Doppelwänden. Acustica, 1954, 4, 276—278.
6. Ф. Эйхлер. Борьба с шумом и звукоизоляция зданий. М., Госстройиздат, 1962.
7. A. Schoch. Zum Eifluss der seitlichen Begrenzung auf die Schalldurchlässigkeit einfacher Wände. Acustica, 1954, 4, 288—290.
8. Л. М. Лямшев. Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М., Изд-во АН СССР, 1955.
9. M. Heckl. Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. Acustica, 1960, 10, 98—108.
10. B. G. Watters. Transmission Loss of Some Masonry Walls. J. Acoust. Soc. America, 1959, 31, 7, 898—911.
11. Noise reductiony. Edited by Leo L. Beranek. Mc Graw-Hill Book Company, Ins. New Jork, 1960.
12. Методические указания по расчету звукоизоляции однослойных ограждений от воздушного шума. Уральский филиал Академии строительства и архитектуры СССР и Научно-исследовательский институт строительной физики, Челябинск, 1963.

Уральский государственный научно-исследовательский институт сборных железобетонных изделий и конструкций
Челябинск

Поступила в редакцию
11 марта 1964 г.