АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 4

УДК 534.32:628.517.2:699.84:669–405.8

О ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОДНОСЛОЙНОГО ОГРАЖДЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОРИСТЫМ СЛОЕМ

В. И. Заборов, В. В. Зудихин

Исследована звукоизоляция однослойного ограждения с дополнительным пористым слоем (с открытыми и закрытыми на поверхности порами, мягким и жестким скелетом) при диффузном падении звука. Показано, что повышение звукоизоляции пористым слоем происходит в основном вследствие затухания волны в воздухе пор. Определена роль скелета в дополнительной звукоизоляции. Приведен анализ звукоизоляции в области граничной частоты плиты. Получены достаточно простые выражения дополнительной звукоизоляции для различных частотных диапазонов. Расчетные значения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Прохождение звука через пористое ограждение с жестким скелетом и двойное ограждение с пористым промежуточным слоем рассматривалось в работе [1]. Расчет звукоизоляции пористого слоя, лежащего на плите, масса которой значительно превосходит массу пористого материала, содержится в работе [2]. При этом значение дополнительной звукоизоляции было получено из сравнения колебательных скоростей воздуха на границах пористого материала. Ниже исследуется звукоизоляция однослойной плиты с дополнительным пористым слоем.

Гармонические колебания пористого слоя опишем уравнениями Цвиккера и Костена [3] при пористости $\sigma=1$

$$
\begin{aligned}
&-\mathrm{q}\,\mathrm{grad}\, p_1=(i\omega\rho_1+s)\mathbf{v}_1-s\mathbf{v}_2; \quad -\mathrm{div}\,\mathbf{v}_1=\frac{i\omega}{E_1}p_1;\\
&-\mathrm{q}\,\mathrm{grad}\, p_2=(i\omega\rho_2+s)\mathbf{v}_2-s\mathbf{v}_1; \quad -\mathrm{div}\,\mathbf{v}_2=\frac{i\omega}{E_2}p_2;
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{v}_2$ — колебательные скорости скелета и воздуха, p_1 и p_2 — давления в скелете и воздухе пор, ρ_1 и ρ_2 — плотности скелета и воздуха, $s=i\omega\rho_2(\varepsilon-1)+\nu$, ε — структурный фактор, ν — удельное воздушное сопротивление, ω — круговая частота, E_1 и E_2 — модули упругости скелета и воздуха.

Ось Oz расположим параллельно нормали плиты. Если на упругой изотропной плите неограниченной протяженности лежит слой с открытыми порами (фиг. 1), то при падении на слой плоской гармонической звуковой волны под углом θ к нормали плиты уравнения (1) должны удовлетворять граничным условиям

$$
\begin{aligned}
&p_1=0 \text{ и } p_2=q_1+q_2 \text{ при } z=0, \quad v_0=v_1=v_2 \text{ при } z=\delta,\\
&v_2=\frac{q_1-q_2}{\rho_2 c_2}\cos\theta \quad \text{при} \quad z=0, \quad v_0=\frac{q_3}{\rho_2 c_2}\cos\theta \quad \text{при} \quad z=\delta+h,
\end{aligned}
\tag{2}
$$

где v_0 — колебательная скорость плиты, q_1, q_2 и q_3 — давления в падающей, отраженной и прошедшей волнах, h — толщина плиты, δ — толщина пористого слоя, c_2 — скорость звука в воздухе.

Решая уравнения (1) при граничных условиях (2) совместно с уравнением движения плиты

$$\bar{D}\frac{\partial^4 v_0}{\partial y^4}-m_0\omega^2 v_0=\frac{1}{i\omega}[-(q_3)_{z=\delta+h}+(q_1+q_2)_{z=\delta}],$$

где $\bar{D}=(1+i\eta)D$ — комплексная цилиндрическая жесткость плиты, η — коэффициент потерь, m_0 — поверхностная плотность плиты, определим коэффициент прохождения звука

$$A=\frac{q_3}{q_1}=\frac{2\varphi}{\beta[D(k\sin\theta)^4-m_0\omega^2-\psi+\varphi\alpha]+1}, \tag{3}$$

где

$$\psi=-(E_2a_1+E_1)\gamma_1 b_1\,\mathrm{th}\,\gamma_1\delta+(E_2a_2+E_1)\gamma_2 b_2\,\mathrm{th}\,\gamma_2\delta,$$

$$\varphi=\left[\frac{E_2a_1+E_1}{\mathrm{ch}\,\gamma_1\delta}-\frac{E_2a_2+E_1}{\mathrm{ch}\,\gamma_2\delta}\right]\times$$

$$\times\left[E_2(a_1-a_2)+\frac{1}{\beta}\left(\frac{a_1\,\mathrm{th}\,\gamma_1\delta}{\gamma_1}-\frac{a_2\,\mathrm{th}\,\gamma_2\delta}{\gamma_2}\right)\right]^{-1},$$

$$\alpha=\frac{1}{\beta}\left(\frac{a_1b_1}{\mathrm{ch}\,\gamma_1\delta}-\frac{a_2b_2}{\mathrm{ch}\,\gamma_2\delta}\right),\quad \beta=\frac{\cos\theta}{i\omega\rho_2c_2},$$

$$a_{1,2}=1-\frac{E_1\gamma_{1,2}^2+\rho_1\omega^2}{i\omega s},\quad b_{1,2}=\frac{1-a_{2,1}}{a_1-a_2},$$

$$\gamma_{1,2}=i\left(\frac{A_0^2}{2}\pm\sqrt{\frac{A_0^2}{4}-B_0}\right)^{1/2}, \tag{4}$$

$$A_0=\frac{\rho_1\omega^2-i\omega s}{E_1}+\frac{\rho_2\omega^2-i\omega s}{E_2},$$

$$B_0=\frac{\rho_1\omega^2-i\omega s}{E_1}\,\frac{\rho_2\omega^2-i\omega s}{E_2}+\frac{\omega^2s^2}{E_1E_2}.$$

Звукоизоляцию ограждения при диффузном падении звуковых волн представим в виде

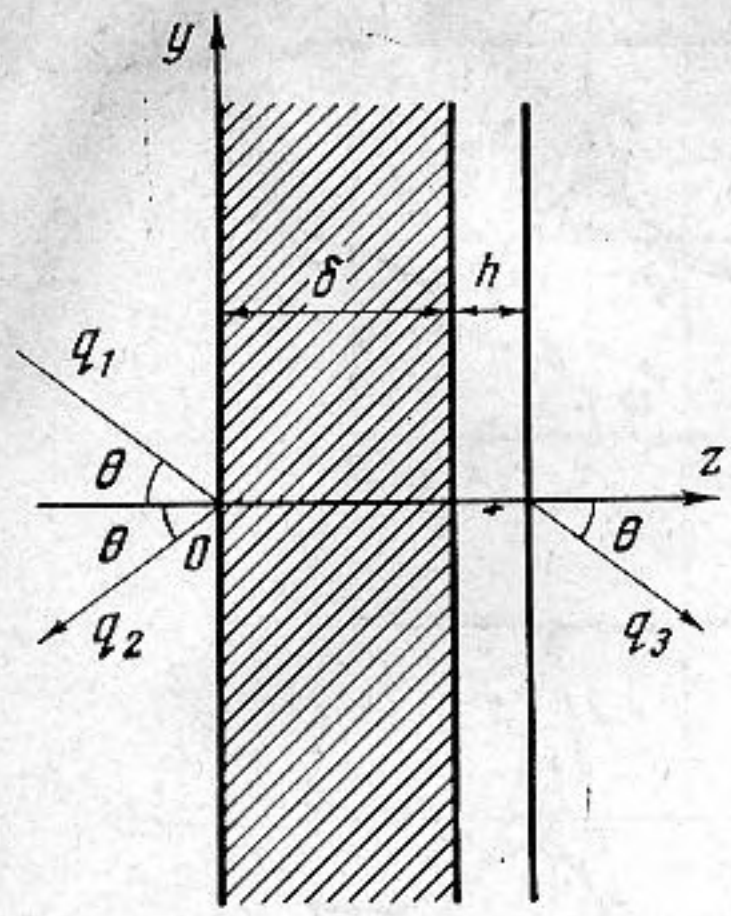
$$R=-10\lg\int\limits_{\cos^2\theta_n}^{1}|A|^2 d\cos^2\theta=R_0+\Delta R_1+\Delta R_2, \tag{5}$$

где R_0 — звукоизоляция плиты с учетом массы пористого слоя, ΔR_1 — дополнительная звукоизоляция, обусловленная действием скелета пористого слоя на плиту, ΔR_2 — дополнительная звукоизоляция вследствие затухания звуковой волны в воздухе пор скелета, $\theta_n\approx 80°$.

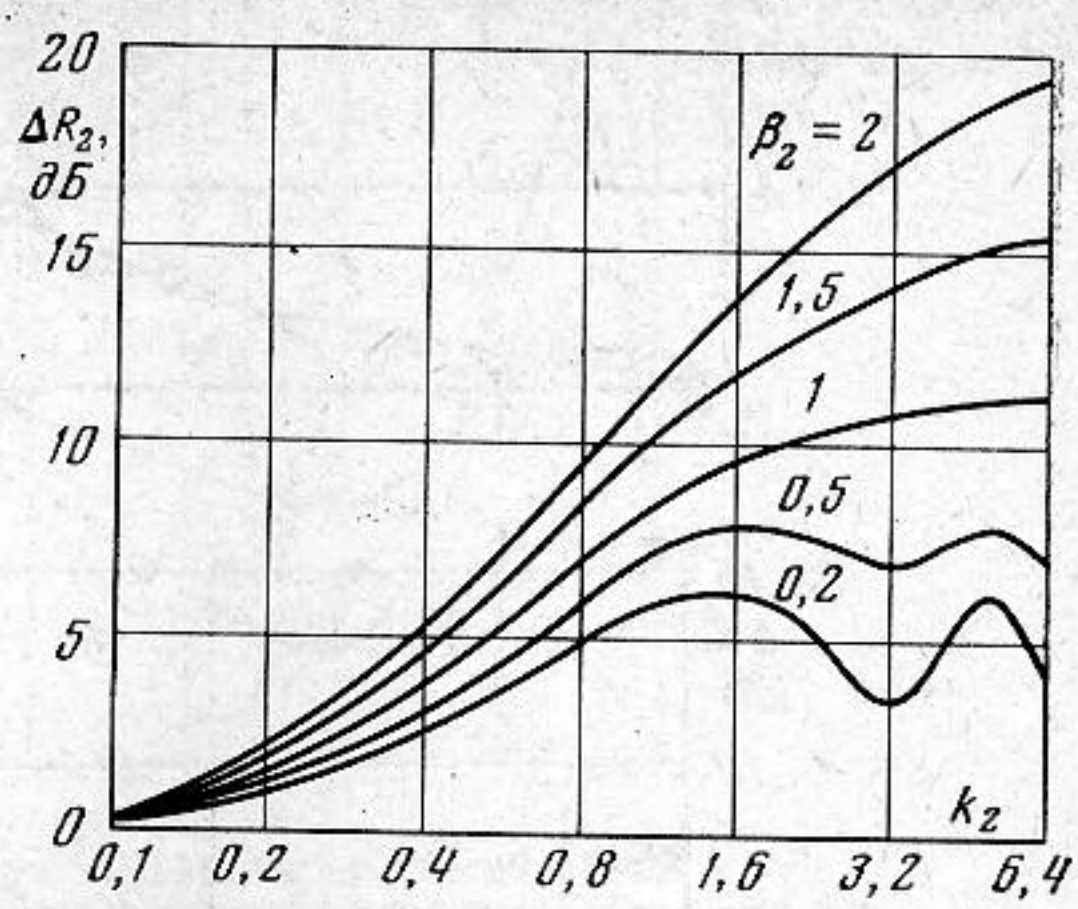
Выражение (5) в общем виде слишком громоздко, поэтому остановимся на двух важных частных случаях: пористые материалы с мягким скелетом ($c_1\ll c_2$) и с жестким скелетом ($c_1\gg c_2$). Здесь c_1 — скорость продольной волны в скелете.

Для материалов с мягким скелетом выражения для постоянных распространения (4) на частотах

$$\omega\gg\frac{\nu}{\rho_1\sqrt{\varepsilon}}\left(\frac{c_2}{c_1}+\frac{\rho_1c_1}{\rho_2c_2}\right)$$



Фиг. 1. Расчетная схема



Фиг. 2. Частотная характеристика дополнительной звукоизоляции ΔR_2 при различных коэффициентах затухания β_2 и $\varepsilon=1$

при $c_1 \ll c_2(2\rho_2/\varepsilon\rho_1)^{1/4}$ и $\rho_1 \gg \rho_2$ упрощаются

$$\gamma_1\delta = ik_1 + \beta_1, \quad \gamma_2\delta = i\bar{k}_2 + \bar{\beta}_2,$$

где

$$\bar{k}_2 = \frac{k_2}{\sqrt{2}}\left(1+\sqrt{1+4\beta_2^2/k_2^2}\right)^{1/2}, \quad \bar{\beta}_2 = \frac{k_2}{\sqrt{2}}\left(-1+\sqrt{1+4\beta_2^2/k_2^2}\right)^{1/2},$$

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1}\delta, \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2}\sqrt{\varepsilon}\,\delta, \quad \beta_1 = \frac{\nu\delta}{2\rho_1 c_1}, \quad \beta_2 = \frac{\nu\delta}{2\rho_2 c_2\sqrt{\varepsilon}}.$$

При этом на частотах ниже граничной частоты плиты $f_{\text{гр}} = (c_2^2/2\pi)\sqrt{m_0/D}$ и $f > \rho_2 c_2/2\pi m_0$

$$R_0 = 10\lg\frac{(m_0+\rho_1\delta Z_{11})^2+(\rho_1\delta Z_{12})^2}{4\rho_2^2 c_2^2}\omega^2 - 5, \tag{6}$$

$$\Delta R_1 = -20\lg\left|1-\frac{i\beta_2 k_2}{k_1^2}\left(1-\frac{\operatorname{ch}\gamma_2\delta}{\operatorname{ch}\gamma_1\delta}\right)\right|, \tag{7}$$

$$\Delta R_2 = 20\lg|\operatorname{ch}\gamma_2\delta| - 10\lg\left[\ln\frac{(1+Z_{21})^2+Z_{22}^2}{(\cos^2\theta_n+Z_{21})^2+Z_{22}^2} + \right. \tag{8}$$

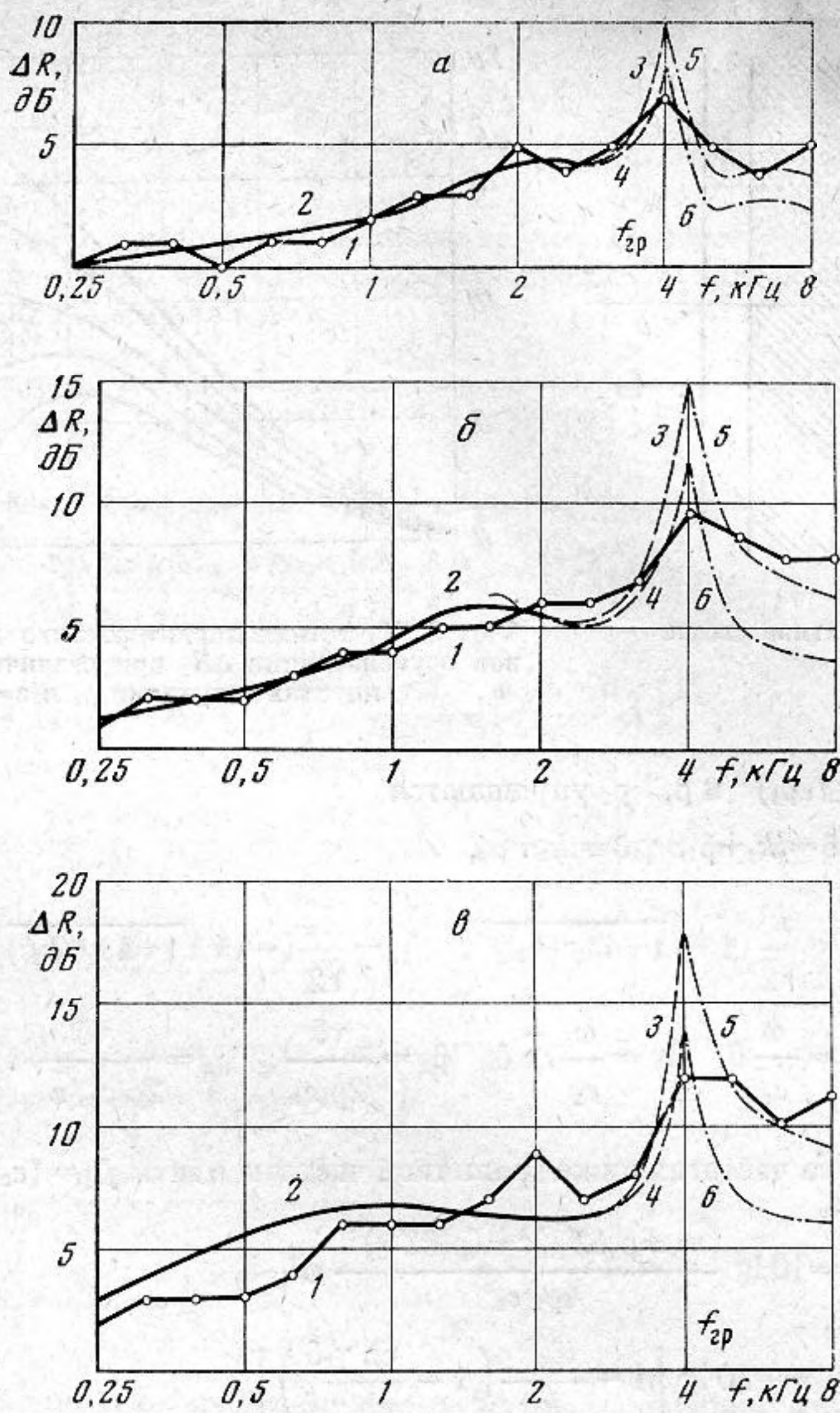
$$\left. + \frac{2Z_{21}}{Z_{22}}\left(\operatorname{arc\,tg}\frac{\cos^2\theta_n+Z_{21}}{Z_{22}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{1+Z_{21}}{Z_{22}}\right)\right] + 5,$$

где

$$Z_{11} = \frac{1}{k_1}\frac{\sin 2k_1}{\operatorname{ch}2\beta_1+\cos 2k_1}; \quad Z_{12} = \frac{1}{k_1}\frac{\operatorname{sh}2\beta_1}{\operatorname{ch}2\beta_1+\cos 2k_1},$$

$$Z_{21}+iZ_{22} = \frac{ik_2\operatorname{th}\gamma_2\delta}{\sqrt{\varepsilon}(\bar{\beta}_2+i\bar{k}_2)}.$$

Как следует из формулы (6), влияние массы пористого материала убывает с ростом частоты. Значение ΔR_1 является существенным лишь на собственных частотах колебаний скелета $f_n = c_1(1/2+n)/2\delta$, $n=0, 1, 2, \ldots$ и при условии, что импеданс его $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2\sqrt{\varepsilon}$. Величина ΔR_1 также убывает с ростом частоты. На частотах $f > c_2/32\delta\sqrt{\varepsilon}$ дополнительная звукоизоляция оп-



Фиг. 3. Дополнительная звукоизоляция пористого слоя из материала АТИМСС толщиной 25 *мм* (*а*), 50 *мм* (*б*) и 100 *мм* (*в*) при $\nu=5000$ *Нс/м*^{4}, $\varepsilon=1{,}5$; *1* – измеренные значения; *2* – вычисленные значения ΔR_2 по формуле (8); *3* – дополнительная звукоизоляция из формулы (5); *4* – ΔR_2 из формулы (5); *5* – $\Delta R_2+\Delta R_0$ по формулам (9) и (10); *6* – ΔR_2 по формуле (9)

ределяется в основном затуханием волны в воздухе пор и равна ΔR_2 (фиг. 2). При $\beta_2 \ll 1$ максимальное значение дополнительной звукоизоляции достигается на резонансных частотах колебаний воздуха в порах $f_n=c_2(^1/_2+n)/2\delta\sqrt{\varepsilon}$. Если $\beta_2>1$ и $\varepsilon=1$, то на частотах $f>3\nu/4\pi\rho_2\varepsilon$

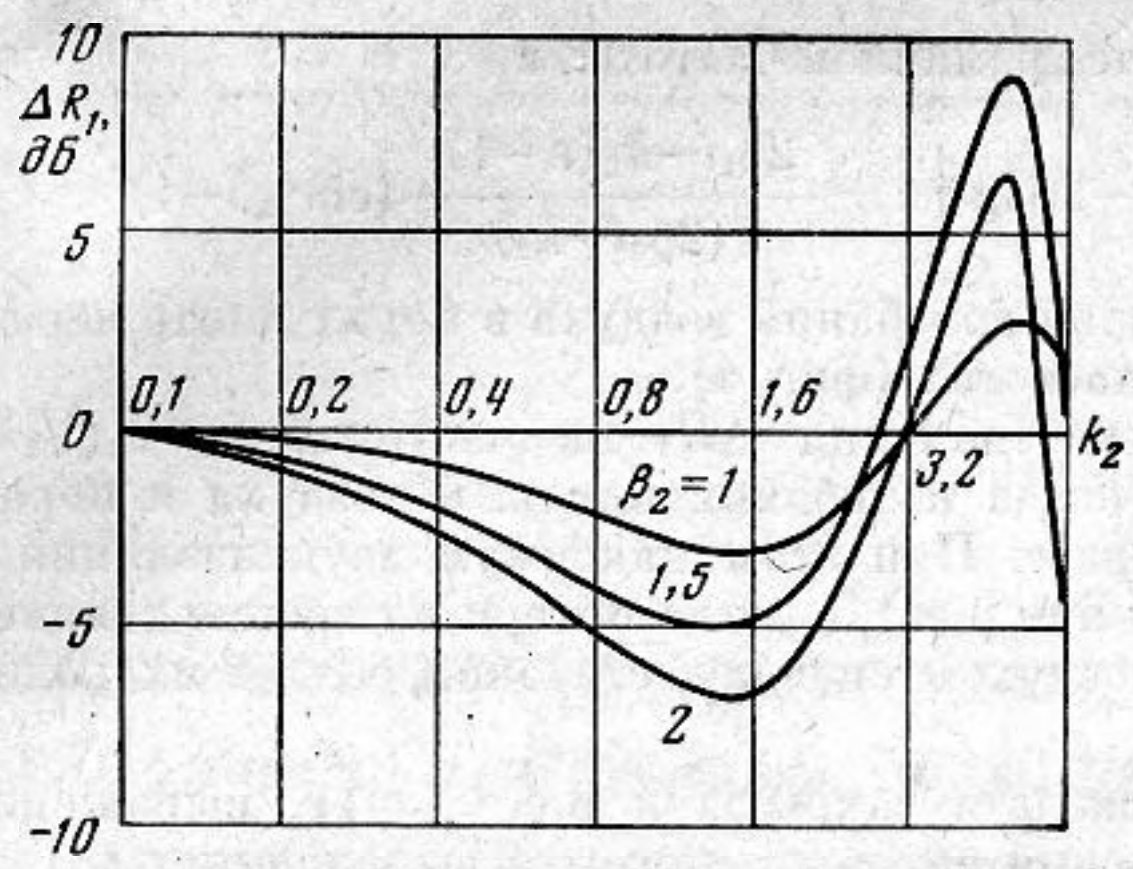
$$\Delta R_2=8{,}7\beta_2+3.$$

Пусть теперь $f>f_{гр}$. Интегрируя выражение $|A|^2$ в малой окрестности угла совпадения, найдем

$$R_0=R_{01}+\Delta R_0,$$

где R_{01} – звукоизоляция плиты,

$$\Delta R_0 = 10\lg\left[1+\frac{\rho_1\delta Z_{12}}{m_0\eta}\right]$$



Фиг. 4. Частотная характеристика дополнительной звукоизоляции ΔR_1 при различных коэффициентах затухания β_2 и $\varepsilon=1$

на частотах

$$f>\frac{\rho_2 c_2}{2\pi m_0 \eta},$$

$$\Delta R_2=20\lg|\operatorname{ch}\gamma_2\delta|+20\lg\left|1+\frac{ik_2\operatorname{th}\gamma_2\delta}{\sqrt{\varepsilon(1-f/f_{\text{гр}})}\,(i\bar{k}_2+\bar{\beta}_2)}\right|, \tag{9}$$

а ΔR_1 — совпадает с выражением (7) и, как правило, им можно пренебречь на частотах выше граничной.

В этом случае повышение звукоизоляции при наличии пористого слоя происходит как вследствие затухания звуковой волны в порах, определяемое выражением ΔR_2, так и вследствие действия скелета на плиту, которое характеризуется значением ΔR_0. На частотах

$$f>\frac{c_2}{2\pi\delta}(\beta_2^2-1)^{1/2} \quad \text{и} \quad \varepsilon=1$$

$$\Delta R_2=8{,}7\bar{\beta}_2+10\lg\left[\left(1-\frac{k_2\bar{k}_2}{k_2^2+\bar{\beta}_2^2}\right)^2+\left(\frac{k_2\bar{\beta}_2}{\bar{k}_2^2+\bar{\beta}_2^2}\right)^2\right]-6.$$

При $f>3\nu/4\pi\rho_2$ получаем $\Delta R_2=8{,}7\beta_2$.

Значение дополнительной звукоизоляции ΔR_0 существенно при $\rho_1 c_1>\rho_2 c_2$. Если $\beta_1\ll 1$ и $f>3\pi c_1/\delta$, то, усредняя величину Z_{12} не менее чем в третьоктавных полосах частот, получим

$$\Delta R_0=10\lg\left[1+\frac{\nu\delta}{m_0\eta\omega}\right]. \tag{10}$$

При $\beta_1\geqslant 1$

$$\Delta R_0=10\lg\left[1+\frac{\rho_1 c_1}{m_0\eta\omega}\right]$$

и не зависит от толщины слоя.

На фиг. 3 представлены экспериментальные [4] и расчетные значения дополнительной звукоизоляции при наличии пористого слоя, лежащего на стальной плите толщиной 3 *мм*. Расчетные значения даны без учета ΔR_1, поскольку в указанном на фигуре диапазоне частот $\Delta R_1\approx 0$.

При жестком скелете R_0 есть звукоизоляция плиты поверхностной плотностью $m_0+\rho_1\delta$, ΔR_2 определяется выражениями (8) и (9) соответ-

ственно до и после граничной частоты, а

$$\Delta R_1 = -20 \lg \left| 1 + \frac{2\beta_2 i - k_2(\varepsilon - 1)}{\varepsilon(2\beta_2 i - k_2)} (\operatorname{ch} \gamma_2 \delta - 1) \right|,$$

связано с передачей колебаний воздуха в порах плите через скелет и справедливо на всех частотах (фиг. 4).

Экстремальные значения ΔR_1 на частотах $f_n = c_2(^1/_2 + n)/2\delta$ соответствуют случаю, когда колебания плиты и воздуха в порах происходят в фазе и противофазе. При этом максимум звукоизоляции достигается на частоте $f = 3c_2/4\delta$ при $\beta_2 \approx 1{,}5$, когда потери на трение велики, но связь между скелетом и воздухом еще недостаточна, чтобы их колебания происходили совместно.

Если поры скелета закрыты и $\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2 \sqrt{\varepsilon}$, выражение для коэффициента прохождения звука совпадает с выражением (3). Таким образом, при малом импеданце скелета безразлично, открыты или закрыты его поры. Применение пористых материалов с закрытыми порами и большим импеданцем скелета ($\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2 \sqrt{\varepsilon}$) оказывается неэффективным ввиду того, что в этом случае звуковая волна передается в основном по скелету с малым затуханием.

Анализ результатов показывает, что мягкие пористые материалы с открытыми порами повышают звукоизоляцию однослойных ограждений на частотах $f > c_2/16\delta \sqrt{\varepsilon}$, но наиболее сильно — в области граничной частоты плиты. Пористый материал с жестким скелетом эффективен в окрестности частот $f_n = c_2(^3/_4 + n)/\delta$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Заборов В. И.* Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. М., Стройиздат, 1969.
2. *Stöbe H. D.* Die Verbesserung der Schallisolation von Trennwänden durch Anbringen poröser Materialien. Hochfrequenztechnik und Electroakustik, 1970, *79*, 6, 209–216.
3. *Цвиккер К., Костен К.* Звукопоглощающие материалы. М., Изд-во иностр. лит., 1952.
4. *Боголепов И. И., Авферонок Э. И.* Звукоизоляция на судах. Л., «Судостроение», 1970.

Всесоюзный научно-исследовательский институт охраны труда и техники безопасности черной металлургии, Челябинск

Поступила 21 июня 1977 г.
После исправления 26 октября 1977 г.