АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXII 1986 Вып. 2

УДК 534.833

АКТИВНАЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПЛАСТИНЫ

Вялышев А. И., Дубинин А. И., Тартаковский Б. Д.

Рассматривается увеличение звукоизоляции пластины, ограниченной в одном направлении, при приложении к ней дополнительной силы. Определяются параметры дополнительной силы, обуславливающей уменьшение коэффициента прохождения звука в заданном направлении и мощности звука, прошедшего через пластину.

Увеличение звукоизоляции пластин на низких частотах является актуальной задачей технической акустики. Экспериментально была показана возможность создания дополнительной звукоизоляции перегородки путем активной компенсации звукового поля, прошедшего через перегородку [1].

В настоящей работе теоретически исследуется зависимость увеличения звукоизоляции пластины при приложении к ней дополнительного источника вибраций («активная звукоизоляция») от параметров источника и критерия достигаемого эффекта. Задача решается методом, описанным в работах [2—3]. В работе [4] было показано, что приложение к колеблющейся пластине дополнительной сосредоточенной силы позволяет существенно уменьшить ее излучение.

Определим изменение коэффициента прохождения звука через ограниченную в одном направлении шарнирно опертую пластину, расположенную в бесконечном абсолютно жестком экране, при приложении к ней линейной силы. Пластина расположена в плоскости $z=0$, имеет по оси x размер l и находится в среде с плотностью ρ и скоростью звука c (фиг. 1). Из полупространства $z<0$ на пластину под углом θ падает плоская монохроматическая с частотой ω звуковая волна. По линии $x=x_к$ к пластине приложена сила $F_к\delta(x-x_к)\exp(-i\omega t)$.

Звуковое давление в полупространстве за пластиной $z>0$ в точке наблюдения $p_2(x_1, z_1)$ будем искать в виде

$$p_2(x_1, z_1)=\frac{\omega\rho}{2}\int_0^l v(x')H_0^{(1)}(kR)\,dx', \tag{1}$$

где $R=[(x'-x_1)^2+z_1^2]^{1/2}$ — расстояние от точки x' до точки наблюдения x_1, z_1, k — волновое число звука в среде, множитель $\exp(-i\omega t)$ здесь и далее опускается.

Разлагая колебательную скорость пластины $v(x)$ и силу $F_к\delta(x-x_к)$ в ряд по собственным формам колебаний шарнирно-опертой пластины в вакууме, получим из уравнения изгибных колебаний пластины [2]

$$Z_m v_m(x)+\sum_{n=1}^{\infty} v_n Z_{mn}=a_m(\theta)+F_к\sin\frac{m\pi x_к}{l}, \tag{2}$$

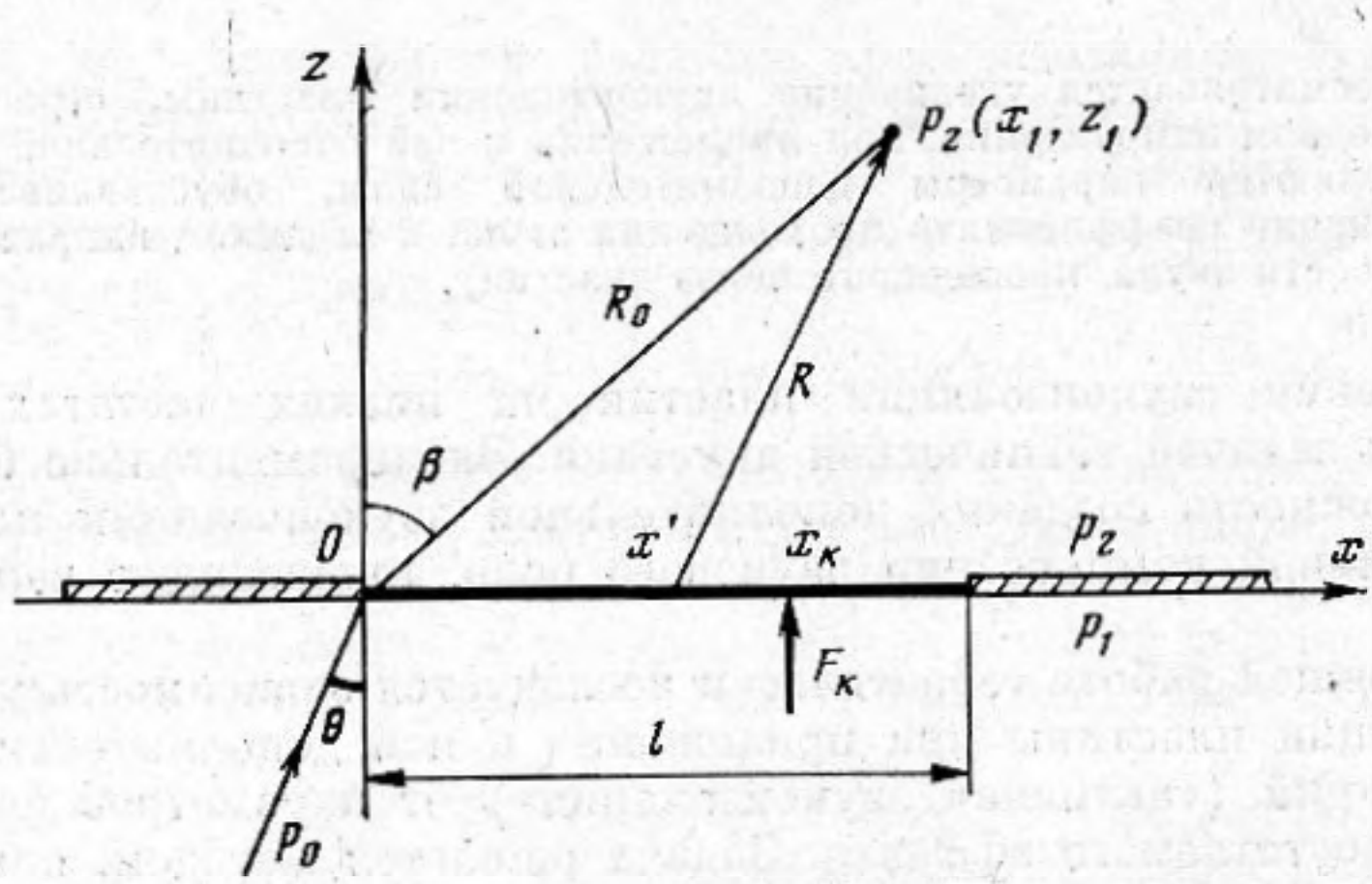
где
$Z_m=-i\omega M(1-(\omega_m^2)/\omega^2)$ — механический импеданс пластины; $\omega_m^2=(B/M)(m\pi/l)^4$ — собственная частота формы колебаний с номером m;

$$a_m(\theta)=\frac{4}{l}\int_0^l \exp(ikx_1\sin\theta)\sin\frac{m\pi x_1}{l}\,dx_1$$

— коэффициенты разложения звукового давления, действующего на пластину, по собственным функциям пластины

$$Z_{mn}=\frac{2\omega\rho}{l}\int_0^l\int_0^l \sin\frac{n\pi x'}{l}\sin\frac{m\pi x'}{l}H_0^{(1)}(k|x'-x_1|)\,dx'\,dx_1$$

— импедансы взаимодействия между различными формами колебаний; Z_{mm} — импеданс излучения для формы с номером m, M — масса пластины на единицу длины, B — изгибная жесткость пластины.



Фиг. 1. Схема расположения компенсирующей силы $F_к$ на пластине

Пренебрегая при $kl>10$ импедансами взаимодействия Z_{mn} по сравнению с импедансами излучения Z_{mm} [3], получим

$$v_m\approx\frac{a_m(\theta)+F_к\sin\frac{m\pi x_к}{l}}{Z_m+Z_{mm}}. \tag{3}$$

Звуковое давление, излученное пластиной в полупространство $z>0$, с учетом асимптотики функции Ганкеля для дальнего поля

$$p_2(R,\beta)=\frac{\omega\rho l}{8}\left(\frac{2}{\pi kR}\right)^{1/2}\exp\left(ikR-i\frac{\pi}{4}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\left[a_n(\theta)+F_к\sin\frac{n\pi x_к}{l}\right]a_n^*(\beta)}{Z_n+Z_{nn}}, \tag{4}$$

где

$$a_n(\theta)=\frac{4\pi n}{\mu^2\sin^2\theta-(n\pi)^2}\left[(-1)^n\exp(i\mu\sin\theta)-1\right];$$

$$a_n^*(\beta)=\frac{4\pi n}{\mu^2\sin^2\beta-(n\pi)^2}\left[(-1)^n\exp(-i\mu\sin\beta)-1\right];$$

β — угол прохождения звука, $\mu=kl$.

Задача активной звукоизоляции пластины может быть сформулирована различным образом: требуется получить максимальное ослабление звукового давления в заданном угловом направлении $\beta_к$. Величина силы $F_к$, необходимая для компенсации звукового давления в направлении $\beta_к$

$$F_к(\beta_к)=-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{a_n(\theta)a_n^*(\beta_к)}{Z_n+Z_{nn}}\Big/\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin\frac{n\pi x_к}{l}a_n^*(\beta_к)}{Z_n+Z_{nn}}. \tag{5}$$

Определим мощность звука, прошедшего через пластину, интегрируя звуковое давление по полуокружности:

$$W \sim \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |p_2(\beta)|^2 d\beta. \qquad (6)$$

Численный расчет проводился для ограниченной в одном направлении стальной пластины шириной 1 м, толщиной 4 мм на частотах 50 и 200 Гц (не совпадающих с собственными частотами пластины) при нормальном и косом падении звуковой волны на пластину. Коэффициент потерь материала пластины принят равным $\eta=0{,}02$. Сила $F_к$ расположена вдоль центральной линии. При нормальном падении звуковой волны на пластину ($\theta=0°$) определялось угловое распределение звукового давления при силе $F_к$, рассчитанной для максимального ослабления звукового давления в направлении угла $\beta_к=0$ и ослабление мощности звука, прошедшего через пластину.

Эффект компенсации звукового давления для частоты 50 Гц уменьшается для углов $\beta>0$ и при углах β, близких к 90°, эффект компенсации отсутствует (фиг. 2, кривая *2*). Ослабление мощности звука при этом составляет $\approx$3,5 дБ.

При косом падении звуковой волны на пластину ($\theta\neq0$) за угол $\beta_к$ принимаем направление, соответствующее максимуму звукового давления. Увеличение угла падения θ приводит к увеличению угла $\beta_к$. Угловое распределение эффекта компенсации становится при этом более равномерным, чем при нормальном падении. Ослабление мощности звука достигает при угле падения 40° 10÷12 дБ (фиг. 3, кривая *2*). Этот эффект обусловлен тем, что при выборе значения силы $F_к$ из условий компенсации звукового давления по углу $\beta_к>0$ распределение звукового давления, создаваемого силой $F_к$, симметрично относительно $\beta=0$. Так как угловое распределение прошедшей через пластину звуковой волны слабо зависит от угла β при различных углах падения θ, результирующее звуковое поле уменьшается в большей мере, чем в случае $\beta_к=0$.

Полученный эффект, являясь дополнительным к пассивной звукоизоляции пластины, представляет собой «активную звукоизоляцию» пластины.

Требуется получить максимальное ослабление мощности звука, прошедшего через пластину. Минимизируя выражение для мощности прошедшего звука, находим

$$F_к \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |p_к|^2 d\beta + \text{const} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_s = p_к^* d\beta = 0, \qquad (7)$$

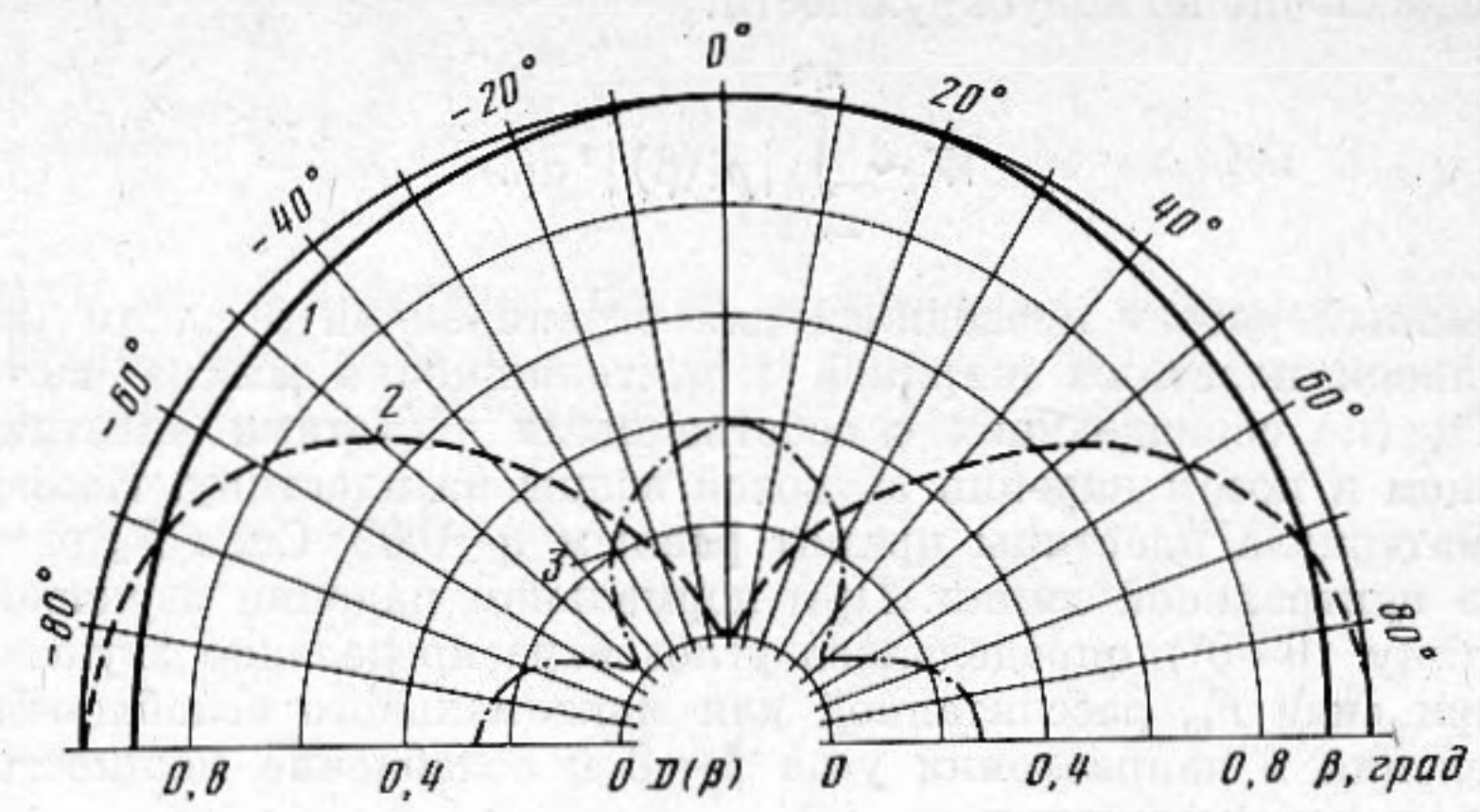
где $p_s=p_2$ при условии $F_к=0$; $p_к=p_2$ при условии $a_n(\theta)=0$.

Расчет по формуле (7) показывает, что для частоты 50 Гц при всех углах падения θ имеет место существенное ослабление мощности звука 9÷12 дБ (фиг. 2, 3, кривые *3*). По мере увеличения угла падения распределение звукового давления за пластиной приближается к распределению, полученному при определении силы $F_к$ для компенсации по заданному углу $\beta_к$.

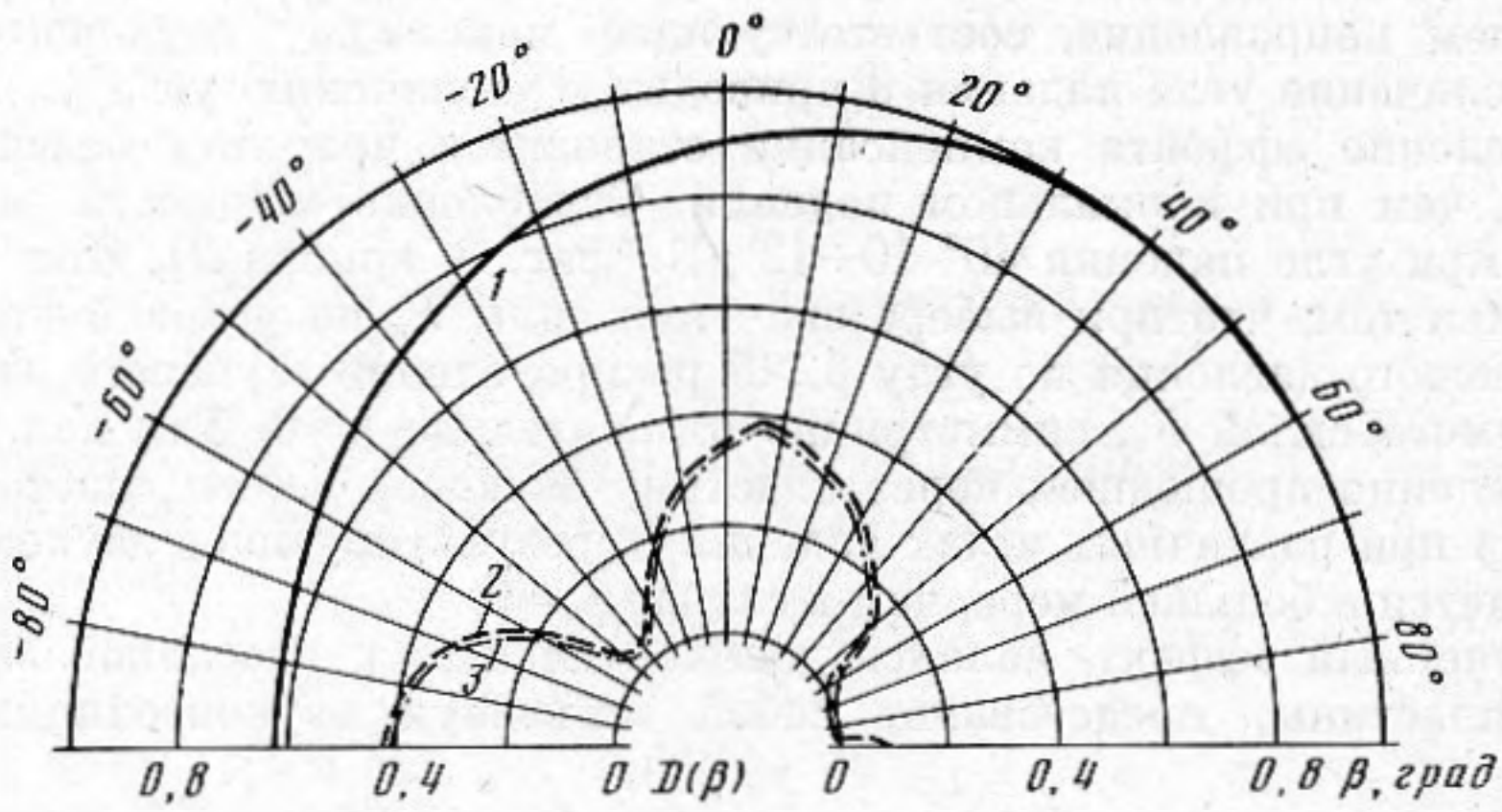
Рассмотрим «активную звукоизоляцию» пластины при звуковом поле, представляющем собой совокупность плоских волн, падающих на пластину по всем угловым направлениям. Достигаемое при приложении компенсирующей силы уменьшение мощности звукового поля, прошедшего через пластину, выраженное в дБ, будем считать величиной активной звукоизоляции (АЗИ)

$$\text{АЗИ}=10\lg\frac{W_0}{W_к}, \qquad (8)$$

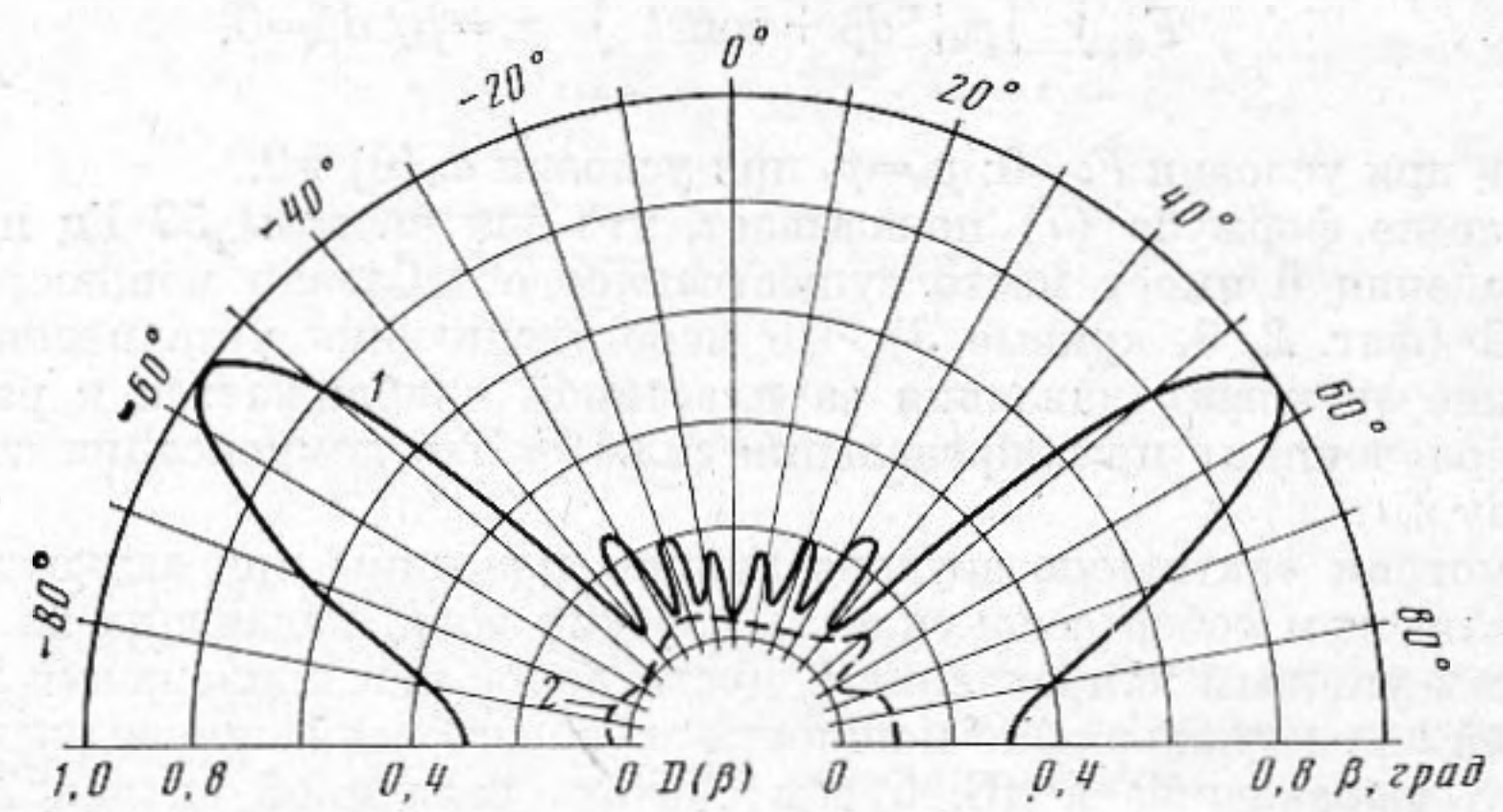
где W_0 — мощность звука, прошедшего через пластину, при $F_к=0$, $W_к$ — мощность звука, прошедшего через пластину, при включении $F_к$.



Фиг. 2. Угловое распределение звукового давления за пластиной на частоте 50 Гц и угле падения 0° (*1* – без компенсации; *2* – при компенсации в направлении β=0°; *3* – при компенсации по мощности звука)



Фиг. 3. Угловое распределение звукового давления за пластиной на частоте 50 Гц и угле падения 40° (*1* – без компенсации; *2* – при компенсации в направлении β=40°; *3* – при компенсации по мощности звука)



Фиг. 4. Угловое распределение звукового давления за пластиной на частоте 782 Гц и угле падения 56° (*1* – без компенсации; *2* – при компенсации)

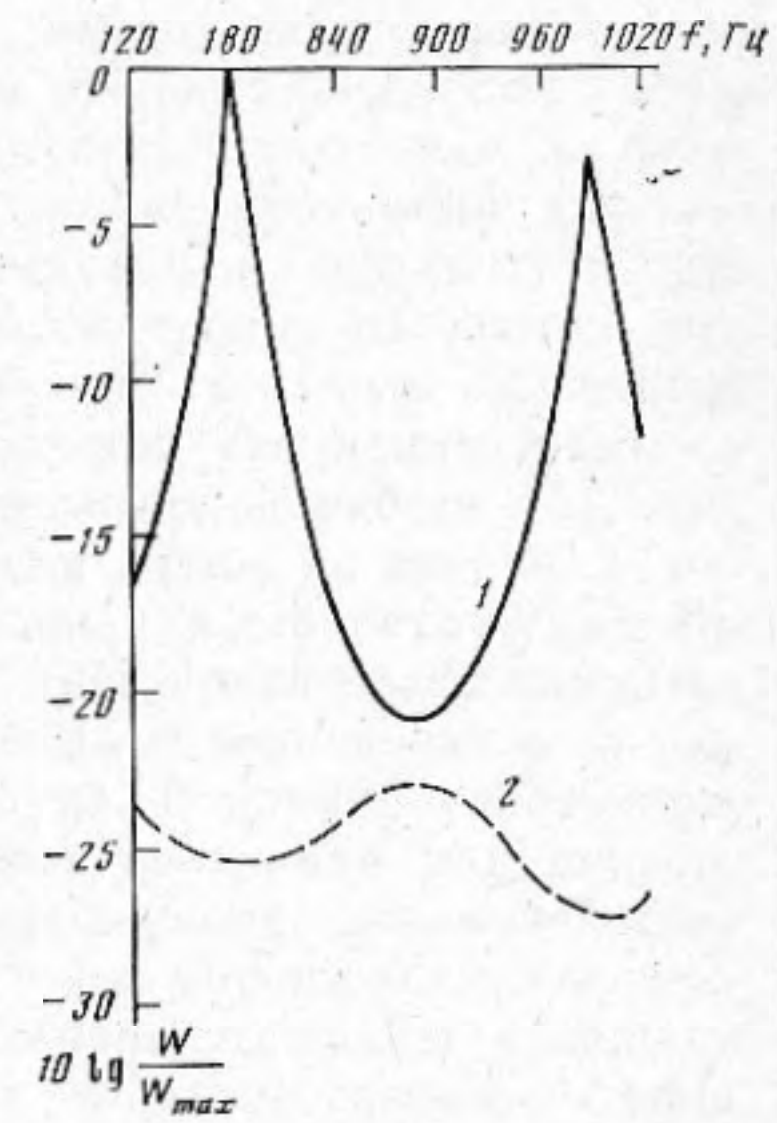
Величина силы $F_к$ должна определяться из условия (7), где p_s вычисляется по формуле (4) с заменой $a_n(\theta)$ на интеграл

$$\bar{a}_n = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} a_n(\theta)\, d\theta.$$

Для рассматриваемой стальной пластины при частоте 50 Гц, АЗИ составляет 8÷11 дБ.

С увеличением частоты достигаемый эффект компенсации по звуковому давлению и по мощности звука, прошедшего через пластину, уменьшается. Так, для звуковых волн с частотой 200 Гц АЗИ уменьшается до 1÷3 дБ. Однако на более высоких частотах метод активной компенсации может быть использован для ослабления эффекта пространственно-частотного резонанса ($k \sin\theta = k_n$, $\omega \approx \omega_n$), при котором коэффициент прохождения звука через пластину принимает максимальное значение. Рассмотрим в качестве примера прохождение звука через стальную пластину шириной 2 м, толщиной 20 мм при углах волнового совпадения ($k \sin\theta = k_n$), на частотах, совпадающих с собственными частотами пластины.

Для частоты 782 Гц (собственной частоты 8-й формы колебаний пластины) угол волнового совпадения $\theta = 56°$. Компенсирующая сила приложена в точке с координатой $x_к = (l/2) + (l/16)$, соответствующей пучности 8-й формы колебаний. В угловом распределении звукового поля за пластиной наблюдаются два резко выраженных максимума, обусловленных пространственно-волновым резонансом (фиг. 4, кривая *1*). Включение силы $F_к$, вычисленной по формуле (7) для $\beta_{max} = 56°$, приводит к полной компенсации звукового давления в направлении $\beta = 56°$, уменьшению на 35 дБ в направлении $\beta = -56°$ (фиг. 4, кривая *2*) и ослаблению мощности звука, прошедшего через пластину на 25,8 дБ.



Фиг. 5. Частотная характеристика мощности звука, проходящего через пластину при критическом угле падения (*1* – без компенсации; *2* – при компенсации)

Аналогичная ситуация наблюдается для частоты 990 Гц, соответствующей 9-й форме колебаний пластины при угле падения $\theta = 48°$.

На частотах, не совпадающих с резонансными, включение силы также приводит к полной компенсации звукового давления в заданном угловом направлении $\beta_к$. Однако вследствие увеличения звукового давления по другим угловым направлениям мощность звука, прошедшего через пластину, уменьшается мало. Так, для частоты падающей звуковой волны $f_8 < f < f_9$, $f = 886$ Гц и угла падения $\theta = 52°$ мощность звука, прошедшего через пластину, изменяется в зависимости от критерия компенсации на величину ±2 дБ.

На фиг. 5 представлена частотная зависимость мощности звука, прошедшего через пластину при условии $k \sin\theta = k_{изгиба}$ до и после включения силы $F_к$, рассчитанной для каждой частоты по формуле (7). Включение силы $F_к$ устраняет максимумы в частотной характеристике мощности звука, прошедшего через пластину, и во всем частотном диапазоне обеспечивает эффект ослабления 23–27 дБ.

Таким образом, активная звукоизоляция позволяет существенно увеличить общую звукоизоляцию пластины, что особенно важно в области низких частот, когда величина пассивной звукоизоляции мала. В области более высоких частот активная звукоизоляция позволяет уменьшить про-

хождение звука, связанное с пространственно-частотным резонансом. Заметим, что полученное дополнительное уменьшение коэффициента прохождения звука через пластину можно также трактовать как увеличение импеданса пластины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акользин А. Н., Паникленко А. П., Тартаковский Б. Д.* Об активных методах увеличения звукоизоляции помещений.– Тез. докл. VII Всесоюз. Акуст. Конф. Л.: Тр. кораблестр. ин-та, 1971, с. 137.
2. *Лямшев Л. М.* Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
3. *Шендеров Е. Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Изд-во Судостроение, 1972.
4. *Вялышев А. И., Тартаковский Б. Д.* Компенсация излучения изгибно-колеблющейся пластины на докритических частотах.– Акуст. журн., 1976, т. 22, № 5, с. 679–685.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
29.X.1984