АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XX 1974 Вып. 2

УДК 534.833.522 : 699.844

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. Н. Бешенков, Е. Г. Голоскоков, В. П. Ольшанский

Исследована зависимость звукоизоляции трехслойных конструкций от значений коэффициента потерь в материале заполнителя и от соотношения толщин обшивок и заполнителя при постоянном весе панели. Исследуется влияние симметричных колебаний на звукоизоляцию трехслойных конструкций.

В современном авиа- и судостроении, в гражданском строительстве все более широкое применение находят трехслойные конструкции, которые служат для целей звуко- и теплоизоляции. Материалы, применяемые в качестве заполнителей трехслойных конструкций, обладают высокими демпфирующими свойствами и способны значительно снижать передачу колебаний благодаря рассеянию энергии. Кроме того, высокая жесткость трехслойных конструкций при их относительно малом погонном весе позволяет в отдельных случаях уменьшить вес звукоизолирующих ограждений. В связи с этим представляет интерес исследование изученных крайне недостаточно звукоизоляционных свойств трехслойных ограждений.

В работе [1] рассматривалась теория звукоизоляции конструкции, состоящей из двух непроницаемых (для стационарного потока воздуха) слоев, промежуток между которыми заполнен звукопоглощающим материалом. Однако автор ограничился случаем нормального падения звуковых волн. Диффузное падение звука рассматривалось в работе [2]. Средний слой при этом представлялся в виде системы непрерывно и равномерно распределенных по поверхности поперечных и продольных связей.

Нами исследована расчетным путем звукоизоляция трехслойных панелей, движение которых описывалось уравнениями, построенными на основе гипотез, наиболее распространенных в литературе по трехслойным конструкциям.

Рассмотрим прохождение звука через бесконечную трехслойную пластину. Выберем координатные оси таким образом, чтобы волновой вектор падающей звуковой волны лежал в плоскости xoz. Ось z направим вниз. В этом случае все смещения не будут зависеть от координаты y, что дает возможность рассматривать плоскую задачу и использовать одномерные уравнения колебаний трехслойной пластины. Согласно работам [2, 3], падающую, отраженную и прошедшую звуковые волны представим в виде

$$\begin{aligned} p_1&=1\cdot\exp\{-ik_0[(z+h+\delta)\cos\theta+x\sin\theta]+i\omega t\},\\ p_2&=B\exp\{-ik_0[-(z+h+\delta)\cos\theta+x\sin\theta]+i\omega t\},\\ p_3&=A\exp\{-ik_0[(z-h-\delta)\cos\theta+x\sin\theta]+i\omega t\}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $i=\sqrt{-1}$ $k_0=\dfrac{\omega}{c}$ — волновое число воздуха, ω, θ, c — частота, угол падения звуковой волны и скорость звука в воздухе, A и B — амплитуды

прошедшей и отраженной звуковых волн, $2h$, δ — толщина заполнителя и обшивок трехслойной пластины. Слагаемое $(h+\delta)$ при z введено для удобства дальнейших вычислений. Временной множитель $\exp i\omega t$ в дальнейшем будем опускать.

Из выражений (1) определяем значения звуковых давлений, действующих на верхнюю обшивку

$$(p_1+p_2)_{z=-h-\delta}=(1+B)\exp(-ik_0x\cdot\sin\theta) \tag{2}$$

и на нижнюю обшивку

$$(p_3)_{z=+h+\delta}=A\exp(-ik_0x\sin\theta).$$

Разобьем величины этих давлений на симметричную p_c и антисимметричную p_a части

$$\begin{aligned} p_c&=\frac{1}{2}(1+B+A)\exp(-ik_0x\cdot\sin\theta),\\ p_a&=\frac{1}{2}(1+B-A)\exp(-ik_0x\cdot\sin\theta). \end{aligned} \tag{3}$$

Будем считать, что в пластине устанавливаются два типа колебаний: антисимметричные (изгибные) и симметричные относительно срединной плоскости. При построении уравнений движения будем учитывать деформации поперечного сдвига и полагать, что распределение тангенциальных перемещений по толщине заполнителя подчиняется линейному закону. Кроме того, будем считать, что обшивки трехслойной панели подчиняются гипотезе Кирхгофа, а деформирование заполнителя по толщине происходит по линейному закону. Тогда в соответствии с работой [4], пренебрегая нелинейными членами, мы получаем одномерные уравнения для антисимметричных и симметричных колебаний трехслойной пластины

$$\begin{aligned} &b_1w_a'''+b_2\ddot{w}_a'+b_3w_a'+b_4\varphi''+b_5\ddot{\varphi}-b_3\varphi=0,\\ &c_1w_a^{IV}+c_2\ddot{w}_a''-b_3w_a''+c_3\ddot{w}_a+b_1\varphi'''+b_2\ddot{\varphi}'+b_3\varphi'=-2p_a; \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &a_1w_c'''+a_2\ddot{w}_c'+a_4w_c'+a_4u''+c_3\ddot{u}=0,\\ &c_1w_c^{IV}+c_2\ddot{w}_c''+a_5w_c''+a_6\ddot{w}_c+a_7w_c-a_1u'''-a_2\ddot{u}'-a_3u'=-2p_c. \end{aligned} \tag{5}$$

Здесь $w_a=(w_1+w_2)/2$, $w_c=(w_1-w_2)/2$ — антисимметричная и симметричная составляющие прогиба трехслойной пластины, w_1, w_2 — прогибы срединных плоскостей верхней и нижней обшивок, φ — поворот плоских сечений заполнителя, u — тангенциальные перемещения срединной плоскости заполнителя. Штрихом и точкой обозначены частные производные по координате и времени. Коэффициенты уравнений (4) и (5) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} &a_1=E_1\delta^2,\quad a_2=-\rho_1\delta^2,\quad a_3=-2\bar{E}\frac{\nu}{1-\nu},\\ &a_4=2E_1\delta+2\bar{E}h,\quad a_5=\frac{2}{3}\bar{G}h,\quad a_6=-2\left(\rho_1\delta+\rho\frac{h}{3}\right),\\ &a_7=-\frac{2\bar{E}}{h},\quad b_1=-a_1h,\quad b_2=-a_2h,\quad b_3=-2\bar{G}h,\\ &b_4=-2h^2\left(E_1\delta+\frac{\bar{E}h}{3}\right),\quad b_5=-a_6h^2, \end{aligned} \tag{6}$$

$$c_1=-\frac{2}{3}E_1\delta^3,\quad c_2=\frac{2}{3}\rho_1\delta^3,\quad c_3=-2(\rho h+\rho_1\delta),$$

$$E_1=\frac{E_1'}{1-\nu_1^2},\quad E=\frac{\overline{E}'(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)},$$

где E_1', ν_1, ρ_1 и $\overline{E}'$, ν, ρ — модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала соответственно несущих слоев и заполнителя, $\overline{G}$ — модуль сдвига заполнителя.

Следуя работе [5], будем пренебрегать затуханием в обшивках и учитывать потери энергии только в заполнителе. С этой целью коэффициенты a_3, a_4, a_5, a_7, b_3 и b_4 представим в комплексной форме

$$a_j=a_{j1}+ia_{j2}\qquad (j=3,4,5,7),$$
$$b_k=b_{k1}+ib_{k2}\qquad (k=3,4), \tag{7}$$

где

$$a_{31}=-2E\frac{\nu}{1-\nu},\quad a_{32}=a_{31}\eta_1,\quad a_{41}=2(E_1\delta+Eh),$$

$$a_{42}=2Eh\eta_1,\quad a_{51}=\frac{2}{3}Gh,\quad a_{52}=a_{51}\eta_2,$$

$$a_{71}=-\frac{2E}{h},\quad a_{72}=a_{71}\eta_1,\quad b_{31}=-2Gh,$$

$$b_{32}=b_{31}\eta_2,\quad b_{41}=-2h^2\left(E_1\delta+\frac{Eh}{3}\right),\quad b_{42}=-\frac{2}{3}Eh^3\eta_1,$$

$$\overline{G}=G(1+i\eta_2),\qquad \overline{E}'=E'(1+i\eta_1)$$

η_1, η_2 — коэффициенты потерь энергии в материале заполнителя при изгибе и сдвиге. Определим механические импеданцы для каждого из двух типов колебаний по формулам

$$Z_a=\frac{p_a}{v_a},\quad Z_c=\frac{p_c}{v_c} \tag{8}$$

Здесь v_a и v_c — антисимметричная и симметричная составляющие колебательной скорости; p_a и p_c определяются зависимостями (3).

Решение уравнений (4) и (5) примем в виде произведения произвольных постоянных на множитель $\exp(-ik_0x\sin\theta+i\omega t)$. Определяя из уравнений постоянные и учитывая, что для гармонических колебаний $w_a=v_a/i\omega$, $w_c=v_c/i\omega$, получаем следующие выражения для импеданцев колебаний:

$$Z_a=Z_{a1}+iZ_{a2}=\left[-\frac{1}{2}\frac{k^2}{\omega}\frac{B_2B_3-B_1B_4}{B_3^2+B_4^2}\right]+i\left[\frac{1}{2}\left(-c_3\omega+\frac{k^2}{\omega}\frac{B_1B_3+B_2B_4}{B_3^2+B_4^2}\right)\right]$$

$$Z_c=Z_{c1}+iZ_{c2}=\left[-\frac{1}{2}\left(\eta_1\frac{a_{71}}{\omega}+\frac{k^2}{\omega}\frac{A_2A_3-A_1A_4}{A_3^2+A_4^2}\right)\right]+ \tag{9}$$

$$+i\left[\frac{1}{2}\left(-a_6\omega+\frac{a_{71}}{\omega}+\frac{k^2}{\omega}\frac{A_1A_3+A_2A_4}{A_3^2+A_4^2}\right)\right]$$

где

$$B_1=k^4(c_1b_{41}-b_1^2)+k^2b_{31}(b_{41}-\eta_1\eta_2b_{42}+c_1+2b_1)+$$
$$+k^2\omega^2(c_2b_{41}+c_1b_5-2b_1b_2)+\omega^4(b_5c_2-b_2^2)+\omega^2(b_5+c_2+2b_2)b_{31};$$
$$B_2=k^4c_1\eta_1b_{42}+k^2b_{31}(\eta_1b_{42}+\eta_2b_{41}+c_1\eta_2+2b_1\eta_2)+$$
$$+k^2\omega^2c_2\eta_1b_{42}+\omega^2b_{31}(\eta_2b_5+c_2\eta_2+2b_2\eta_2),$$
$$B_3=b_{41}k^2+b_5\omega^2+b_{31},\quad B_4=\eta_1b_{42}k^2+\eta_2b_{31},$$
$$A_1=k^4(c_1a_{41}+a_1^2)-k^2(a_{41}a_{51}-\eta_1\eta_2a_{42}a_{51}+2a_1a_{31})+$$
$$+k^2\omega^2(c_2a_{41}+c_1c_3+2a_1a_2)+\omega^4(c_2c_3+a_2^2)-$$
$$-\omega^2(c_3c_{51}+2a_2a_{31})+a_{31}^2(1-\eta_1^2),$$
$$A_2=k^4c_1\eta_1a_{42}-k^2(\eta_1a_{42}a_{51}+\eta_2a_{51}a_{41}+$$
$$+2a_1\eta_1a_{31})+k^2\omega^2c_2\eta_1a_{42}-\omega^2(c_3\eta_2a_{51}+2a_2\eta_1a_{31})+2\eta_1a_{31}^2,$$
$$A_3=k^2a_{41}+\omega^2c_3,\quad A_4=k^2\eta_1a_{42},\quad k=k_0\sin\theta.$$

Колебательная скорость верхней обшивки будет равна сумме скоростей антисимметричных и симметричных колебаний, а нижней обшивки — их разности [2, 3]

$$v_1=\frac{p_a}{Z_{a1}+iZ_{a2}}+\frac{p_c}{Z_{c1}+iZ_{c2}}\ \text{при}\ z=-h-\delta,$$
$$v_2=\frac{p_a}{Z_{a1}+iZ_{a2}}-\frac{p_c}{Z_{c1}+iZ_{c2}}\ \text{при}\ z=+h+\delta. \tag{10}$$

Учитывая, что колебательные скорости верхней и нижней обшивок должны быть равны нормальным составляющим колебательных скоростей воздуха, граничные условия можно записать в виде [2, 3]

$$v_1=-\frac{1}{i\omega\rho_0}\frac{\partial(p_1+p_2)}{\partial z}\ \text{при}\ z=-h-\delta,$$
$$v_2=-\frac{1}{i\omega\rho_0}\frac{\partial p_3}{\partial z}\ \text{при}\ z=+h+\delta, \tag{11}$$

где ρ_0 — плотность воздуха.

Подставляя в формулы (11) выражения (1), мы получаем систему уравнений относительно коэффициентов A и B, из которой находим коэффициент звукопроницаемости при падении звуковой волны под углом θ

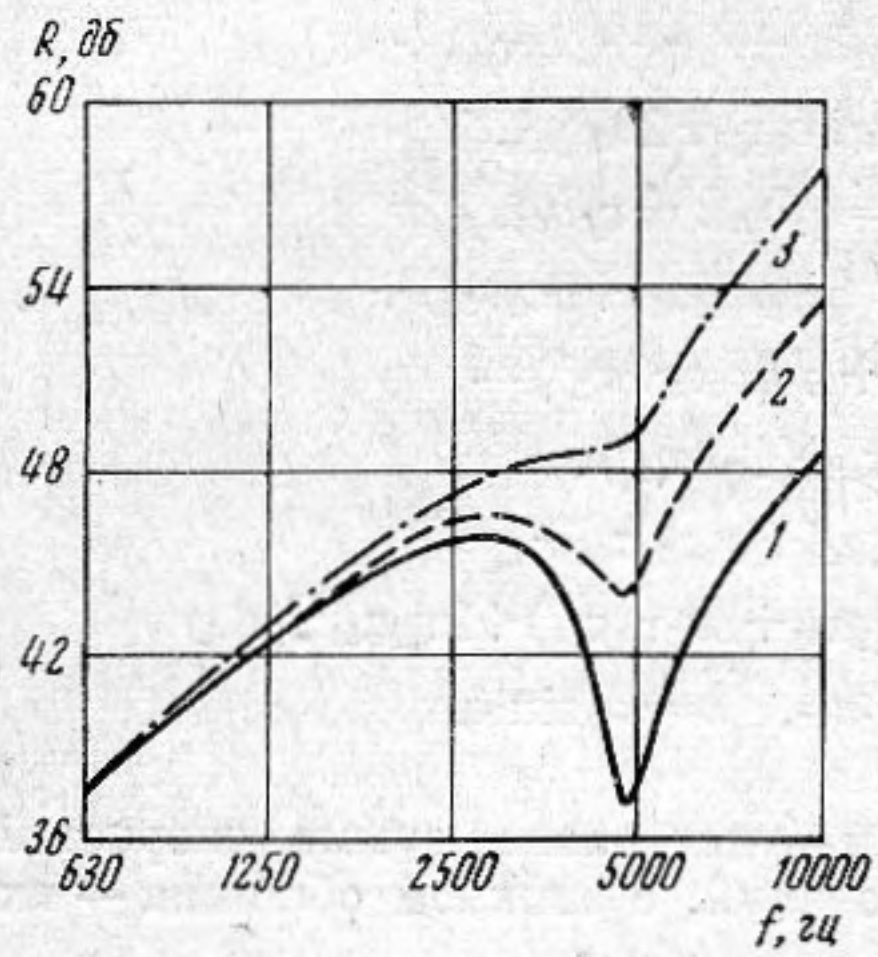
$$\tau_\theta=|A|^2=\frac{Z_0^2[(Z_{c1}-Z_{a1})^2+(Z_{c2}-Z_{a2})^2]}{[(Z_0+Z_{a1})^2+Z_{a2}^2][(Z_0+Z_{c1})^2+Z_{c2}^2]}, \tag{12}$$

где $Z_0=\dfrac{\rho_0c}{\cos\theta}$. Тогда величина звукоизоляции R трехслойного ограждения, согласно работе [2], будет

$$R=-10\lg\left[\int_0^{80^\circ}\tau_\theta\sin 2\theta\,d\theta\right]. \tag{13}$$

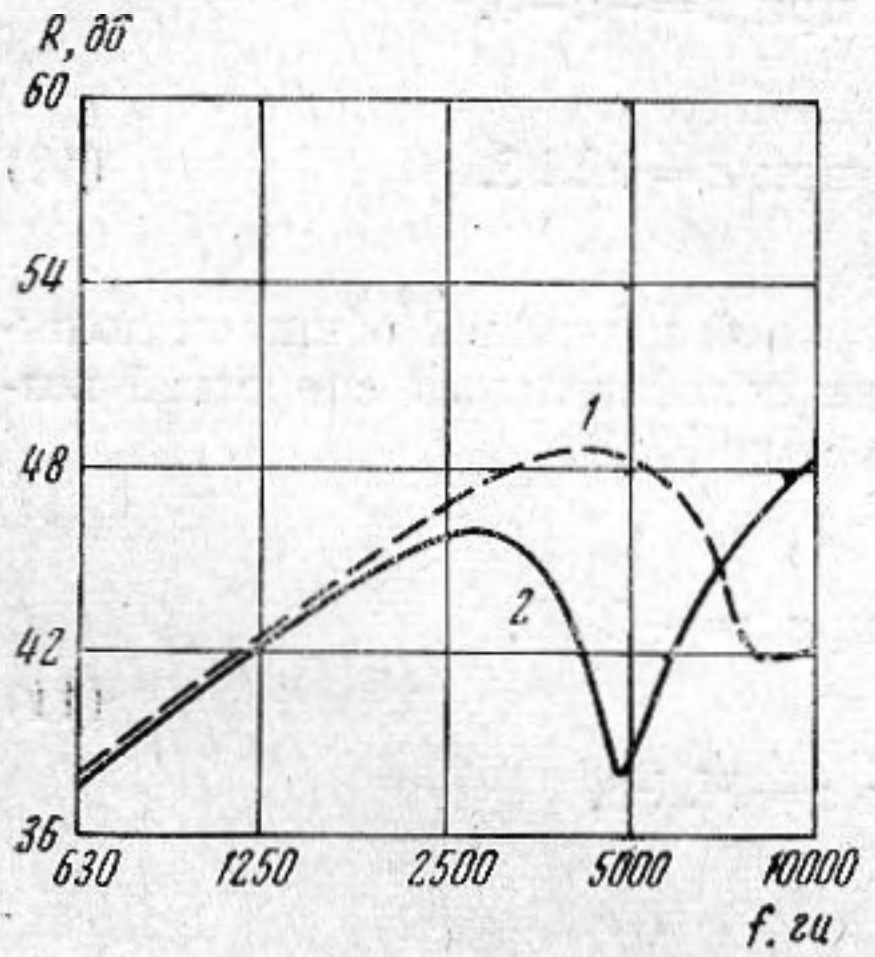
По изложенной теории численным путем были построены кривые звукоизоляции трехслойных ограждений. На фиг. 1 показаны кривые звукоизоляции трехслойного ограждения с обшивками из алюминия толщиной $\delta=3\cdot10^{-3}$ *м* и заполнителем со следующими механическими характеристи-

ками $E=25\cdot10^8$ *нм*$^{-2}$; $\rho=1{,}5\cdot10^3$ *кг м*$^{-3}$; $\nu=0{,}4$ толщиной $2h=2\cdot10^{-2}$ *м* для различных значений коэффициента потерь. Последнему придавались значения $\eta_1=\eta_2=0{,}1$; 0,3; 0,6 (кривые *1*, *2*, *3*). Граничная частота этого ограждения, формулы для которой получены в работе [6] из уравнений движения, аналогичных (4), равна 4600 *гц*. Анализ результатов показывает, что увеличение коэффициента потерь материала заполнителя приводит к росту звукоизоляции трехслойного ограждения на частотах близких к граничной, на граничной частоте и выше граничной. На частотах, значительно меньших граничной, влиянием потерь энергии на величину собственной звукоизоляции можно пренебречь.

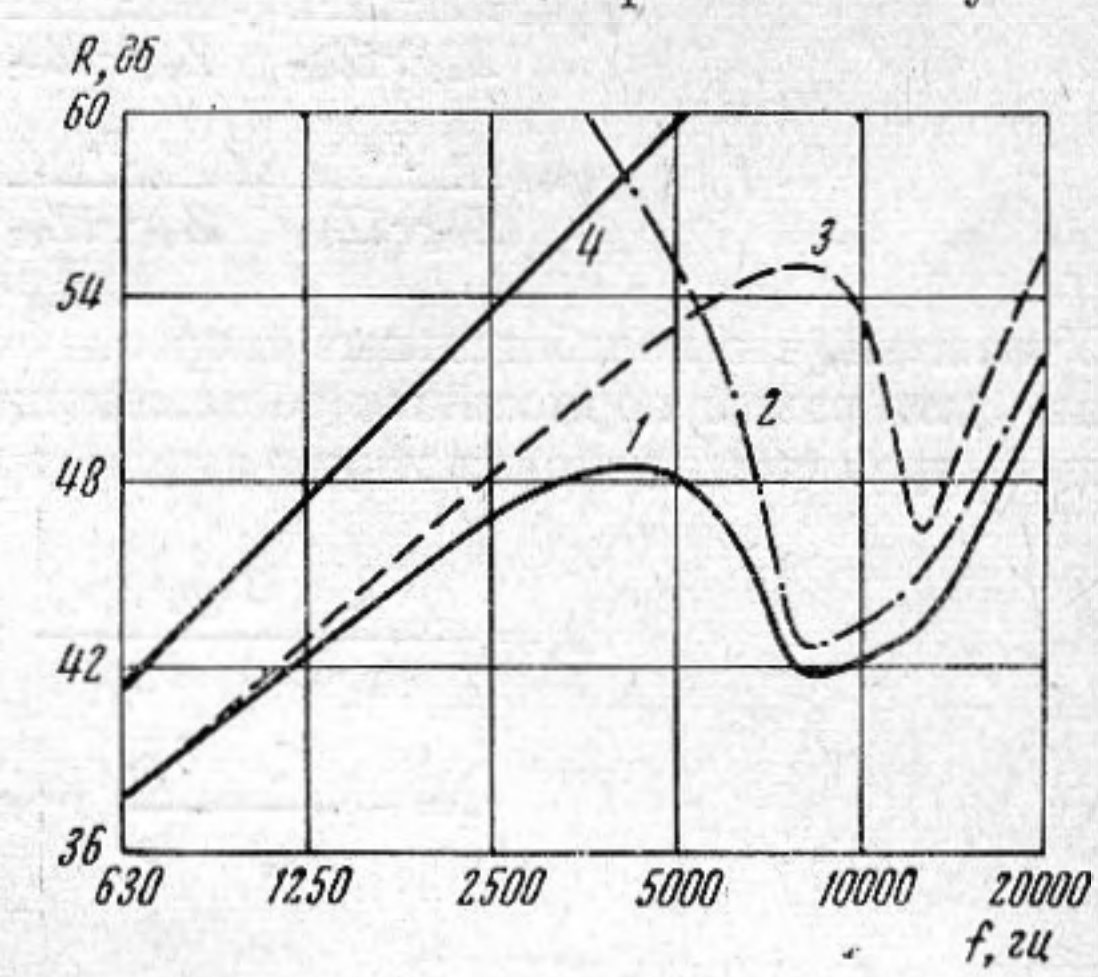


Фиг. 1

На фиг. 2 показаны кривые звукоизоляции трехслойных ограждений с равными коэффициентами потерь $\eta_1=\eta_2=0{,}1$ и равным погонным весом, но с разными отношениями толщин обшивок и заполнителя. Кривая *1* получена



Фиг. 2



Фиг. 3

для панели с толщиной обшивок $\delta=1{,}5\cdot10^{-3}$ *м*, кривая *2* соответствует толщине $\delta=3\cdot10^{-3}$ *м*. В результате уменьшения отношения толщин обшивок и заполнителя граничная частота оказалась равной 12 000 *гц*. Таким образом, изменяя отношение толщин обшивок и заполнителя при сохранении общего веса панели, можно сдвинуть граничную частоту за нормируемый диапазон частот (10^4 *гц*) и тем самым избавиться от нежелательного явления волнового совпадения. Однако при этом возрастает влияние симметричных колебаний, что может привести к понижению звукоизоляции трехслойной конструкции на высоких частотах (см. фиг. 2).

Влияние симметричных колебаний на величину звукоизоляции показано на фиг. 3. Кривая *1* дает звукоизоляцию трехслойного ограждения с учетом симметричных и антисимметричных колебаний, кривая *2* — с учетом только симметричных, кривая *3* — с учетом только антисимметричных колебаний. Из фигуры видно, что простое приближение, согласно которому передача звука осуществляется только изгибными колебаниями, дает для трехслойных конструкций значительную погрешность в области средних и высших частот. Вносимая при этом погрешность зависит не

только от толщины ограждения, но и в значительной мере от жесткостных характеристик заполнителя и соотношения толщин обшивок и заполнителя. С увеличением последних двух величин погрешность уменьшается. Кривая *4* дает звукоизоляцию трехслойного ограждения, рассчитанную по закону массы [2]. Сравнение кривых *1* и *4* позволяет сделать вывод о том, что расчет собственной звукоизоляции трехслойного ограждения по закону массы может дать большую погрешность в приведенном диапазоне частот. К аналогичному выводу приводят результаты экспериментальных исследований [7], проведенных для трехслойных панелей с заполнителем в виде сот.

Отметим также, что результаты расчетов подтверждают вывод Авферонка [7] об отсутствии провалов звукоизоляции на частотах волнового совпадения обшивок. В связи с этим при замене пределов интегрирования в формуле (13) узкой окрестностью вблизи угла волнового совпадения обшивок, как это сделано в работе [2], возможно внесение значительной погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957.
2. В. И. Заборов. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. М., Стройиздат, 1969.
3. Е. Л. Шендеров. Волновые задачи гидроакустики. Л., «Судостроение», 1972.
4. А. И. Холод. Большие прогибы трехслойных оболочек с жестким заполнителем. Сб. тр. Днепропетровск. инж.-строит. ин-та, вып. 31, 1963, 36—41.
5. В. П. Ольшанский, А. П. Филиппов. О расчете на удар трехслойных пластин и балок с вязко-упругим заполнителем, Строительная механика и расчет сооружений, 1970, № 6, 53—55.
6. Е. Г. Голоскоков, В. П. Ольшанский, С. Н. Бешенков. Определение зон пониженной звукоизоляции трехслойных ограждений. В сб.: Влияние вибраций различных спектров на организм человека и проблемы виброзащиты, М., «Наука», 1972, 314—317.
7. Э. И. Авферонок. Экспериментальное исследование звукоизоляции панелей с сотопластовым заполнителем. С сб.: Борьба с шумом на судах. Л., «Судостроение», 1970, 108—115.

Харьковский политехнический институт
им. В. И. Ленина

Поступила
25 ноября 1972 г.