и

$$k_2 = ik_b \left\{ 1 + \frac{i}{2k_b L r^3} \sqrt{1-r^4} [\sqrt{1-r^2} - i\sqrt{1+r^2}] \right\},$$

где $$r = \frac{k_b}{k_p}.$$

В результате мы получаем значение податливости для этого случая в виде $Y = Y_1 - Y_2 - Y_3$, где

$$(1) \qquad Y_2 = \frac{\omega}{4k_b^3 D_b} e^{2ik_b y_0 \left[1 + \frac{i}{2k_b L r^3} (\sqrt{1+r^2} - i\sqrt{1-r^2})\right]} \times$$
$$\times \left\{ 1 + \frac{i}{2k_b L r^3} \left[\frac{r^2-3}{\sqrt{1-r^2}} + i \frac{r^2+3}{\sqrt{1-r^2}} \right] \right\},$$

$$(2) \qquad Y_3 = \frac{\omega}{4k_b^3 D_b} e^{-2k_b y_0 \left[1 + \frac{i}{2k_b L r^3} (\sqrt{1-r^2} - i\sqrt{1+r^2})\right]} \times$$
$$\times \left\{ 1 - \frac{i}{2kLr^3} \left[\frac{r^2+3}{\sqrt{1+r^2}} + i \frac{r^2-3}{\sqrt{1-r^2}} \right] \right\}.$$

Выражения (1) и (2) описывают влияние на податливость Y отраженных от границы бегущих и неоднородных волн как в ребре, так и в пластине. Это влияние тем существеннее, чем меньше расстояние до опертой кромки y_0 и больше отношение D_b/D_p. На фиг. 2 изображены зависимости реальной (*а*) и мнимой (*б*) составляющих податливости Y от параметра y_0/L, нормированные относительно Y_1 при $r=0{,}5$. Видно, что реальная и мнимая составляющие Y при изменении параметра y_0/L осциллируют относительно соответственных составляющих Y_1. Частота этих осцилляций определяется параметром k_bL, т. е. частотой возмущающей силы, а огибающая амплитуд осцилляций — параметром y_0/L. Последнее объясняется тем, что с увеличением частоты возмущающей силы колебательная энергия в большей степени концентрируется в ребре жесткости, подкрепляющем пластину.

Авторы благодарят А. С. Никифорова за ценные советы и обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *G. Lamb*. Input Impedance of Beam Coupled to Plate. J. Acoust. Soc. America, 1961, *33*, 5, 628–633.

Поступила
23 декабря 1974 г.
После исправления
25 августа 1975 г.

УДК 534.833

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ В ШИРОКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ НА СТЕНКЕ

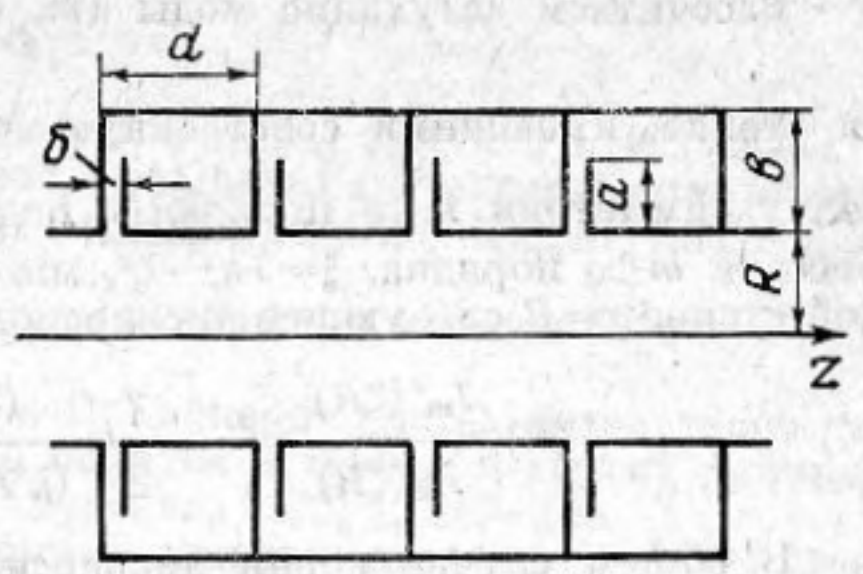
А. Д. Лапин

В работе [1] была рассчитана звукоизоляция в широкой (по сравнению с длиной волны) цилиндрической трубе, имеющей близко расположенные друг от друга резонаторы Гельмгольца на стенке. Этот расчет был выполнен в предположении, что стенку с резонаторами можно охарактеризовать эффективным нормальным импеданцем, не зависящим от структуры звукового поля в трубе. Представляет интерес исследовать звукоизоляцию в цилиндрической трубе с осесимметричными резонаторами на стенке. На практике такие резонаторы часто применяют в качестве отражателей звука в трубах [2, 3].

Определим звукоизоляцию цепочки близко расположенных друг от друга осесимметричных резонаторов в широкой цилиндрической трубе, допустив, что в звуковом поле заданной симметрии (например, порядка m) стенку с осесимметричными

резонаторами можно охарактеризовать эффективным импеданцем Z_m.

Пусть труба радиусом R окружена концентрическим барабаном радиуса $(R+b)$, подразделенным дисками на секции (резонаторные объемы), в каждой из которых добавочный диск внешнего радиуса $(R+a)$ образует круговое горлышко шириной δ, сообщающееся с трубой по всей окружности (фигура). Исследуем звукоизоляцию в этой трубе, считая, что линейные размеры резонаторов в осевом и радиальном направлениях малы по сравнению с длиной волны звука: $d \ll \lambda$, $b \ll \lambda$.



Труба с осесимметричными резонаторами на стенках

Совместим ось z цилиндрической системы координат (r, φ, z) с осью трубы и обозначим через p звуковое давление в среде, заполняющей трубу и резонаторы. При гармонической зависимости от времени t звуковое поле симметрии m-го порядка можно представить в виде $p(r, \varphi, z, t) = P_m(r, z)\cos(m\varphi)\cdot \cdot\exp(-i\omega t)$. Подставляя p в волновое уравнение, мы получим следующее уравнение для P_m:

$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial P_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} + (k^2 - m^2/r^2)P_m = 0, \tag{1}$$

где $k = \omega / c$, c — скорость звука в среде. На стенках трубы и резонаторов производная функции P_m по нормали равна нулю.

В области $k|r-R| \ll 1$, т. е. в резонаторах и в трубе вблизи ее стенок, точное уравнение (1) можно заменить приближенным уравнением

$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial P_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} + (k^2 - m^2/R^2)P_m = 0. \tag{2}$$

Согласно формуле (2) уравнение для P_m при $m \neq 0$ получается из уравнения для P_0 при замене в последнем c на $\tilde{c} = c/\sqrt{1-(m/kR)^2}$. Это означает, что эффективные граничные условия для поля симметрии m-го порядка в трубе приближенно можно получить из эффективных граничных условий для симметричного поля $(m=0)$ в этой трубе при замене в них c на $\tilde{c}$.

В симметричном звуковом поле осесимметричные резонаторы работают как резонаторы Гельмгольца, и поэтому, согласно работам [4, 5], стенку с такими резонаторами можно охарактеризовать эффективным импеданцем Z_0, равным $i\dfrac{2\rho c^2}{\gamma R\omega}\cdot$ $\cdot(1-\omega^2/\omega_0^2)$, где ω_0 – собственная частота резонатора в симметричном поле, $\gamma = \tilde{\Omega}/\Omega$ – отношение погонных объемов резонаторов и трубы, ρ — плотность среды.

На основе предыдущих выкладок заключаем, что в звуковом поле симметрии m-го порядка стенка с близко расположенными друг от друга осесимметричными резонаторами эквивалентна стенке с эффективным импеданцем Z_m, определяемым по формуле

$$Z_m = i\frac{2\rho\tilde{c}^2}{\gamma R\omega}\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\frac{c^2}{\tilde{c}^2}\right) = i\frac{2\rho\omega}{\gamma R\tilde{k}^2}(1-\tilde{k}^2/k_0^2), \tag{3}$$

где $k_0 = \omega_0/c$, $\tilde{k} = \omega/\tilde{c} = \sqrt{k^2 - m^2/R^2}$. Согласно формуле (3) импеданц Z_m упругий при $\tilde{k} < k_0$ и массовый при $\tilde{k} > k_0$.

Нормальные волны в широкой цилиндрической трубе с импеданцными стенками были исследованы в работе [1]. В этой работе показано, что при замене абсолютно жестких стенок трубы стенками с массовым импеданцем повышаются критические частоты всех мод. Обозначая критические частоты моды (m, n) в трубах с абсолютно жесткими, с абсолютно мягкими и с массовыми стенками соответственно через $\omega_{mn}^{(ж)}$, $\omega_{mn}^{(м)}$ и ω_{mn}, мы получим соотношение $\omega_{mn}^{(ж)} < \omega_{mn} < \omega_{mn}^{(м)}$. На основании этих результатов можно сделать следующее заключение об оптимальной конструкции осесимметричных изоляторов звука в трубе: для изоляции волн симметрии m-го порядка $(m \neq 0)$ резонаторы следует присоединять к трубе на расстоянии нескольких радиусов R от источников шума; тогда по трубе к резонаторам придут только звуковые волны частот, больших $\omega_{m0}^{(ж)}$. Выбирая собственную частоту ω_0 резонаторов равной $\sqrt{(\omega_{m0}^{(ж)})^2 - (mc/R)^2}$, мы получим массовые стенки при $\omega > \omega_{m0}^{(ж)}$, и поэтому звукоизоляция в трубе будет происходить в полосе $0 < \omega < \omega_{m0}$, где $\omega_{m0} > \omega_{m0}^{(ж)}$.

Рассчитаем затухание моды $(m, 0)$ в трубе с осесимметричными резонаторами на стенке, имеющими собственную частоту $\omega_0 = \sqrt{(\omega_{m0}^{(ж)})^2 - (mc/R)^2}$. Записывая волну симметрии m-го порядка в виде $p = J_m(\zeta r)\cos(m\varphi)\exp(i\xi z)$, где J_m — функция Бесселя m-го порядка, $\xi = \sqrt{k^2 - \zeta^2}$, мы получим из граничного условия на импедансной стенке $r = R$ следующее дисперсионное уравнение для ζ:

$$(\zeta R)\frac{J_m'(\zeta R)}{J_m(\zeta R)} = -\frac{\gamma}{2}\frac{(\tilde{k}R)^2}{(\tilde{k}^2/k_0^2 - 1)}. \tag{4}$$

В общем случае корни дисперсионного уравнения (4) можно найти графическим методом. Их приближенно можно получить и в аналитическом виде, аппроксимируя тем или иным способом левую часть этого уравнения. Исследование дисперсионного уравнения графическим методом показывает, что при изменении частоты звука в полосе $\omega_{m0}^{(ж)} < \omega < \omega_{m0}$ величина $\zeta_{m0}R$ лежит вблизи $\nu_{m0} = \omega_{m0}^{(м)} R/c$; поэтому левую часть этого уравнения можно положить равной $(\zeta_{m0}R)(\zeta_{m0}R - \nu_{m0})^{-1}$. В результате мы получим для ξ_{m0}^2 следующее приближенное выражение:

$$\xi_{m0}^2 = -k^2\left\{\left(\frac{\omega_{m0}^{(м)}}{\omega}\right)^2\left[1 + \frac{2}{\gamma(k_0R)^2}\left(1 - \frac{k_0^2}{\tilde{k}^2}\right)\right]^{-2} - 1\right\}. \tag{5}$$

На основе формулы (5) можно спроектировать «оптимальный» осесимметричный изолятор, обеспечивающий при минимальном суммарном объеме резонаторов ослабление моды $(m, 0)$ не менее чем в $1/W$ раз в заданном частотном диапазоне $\omega_{m0}^{(ж)} < \omega < \omega_1 < \omega_{m0}$. Эта задача сводится к нахождению минимума величины $(\tilde{\Omega}l)$, при которой выполняется соотношение $\exp\{-|\xi_{m0}(\omega_1)|l\} = W$. Расчеты дают следующие оптимальные значения параметров:

$$l_{opt} = \frac{1}{k_1}\ln\left(\frac{1}{W}\right)\left[\left(\frac{\omega_{m0}^{(м)}}{\omega_1}\right)^{2/3} - 1\right]^{-1/2},$$

$$\gamma_{opt} = \frac{2}{(k_0R)^2}\left(1 - \frac{k_0^2}{\tilde{k}_1^2}\right)\left[\left(\frac{\omega_{m0}^{(м)}}{\omega_1}\right)^{2/3} - 1\right]^{-1},$$

$$(\tilde{\Omega}l)_{min} = \frac{2\pi}{k_1k_0^2}\ln\left(\frac{1}{W}\right)\left(1 - \frac{k_0^2}{\tilde{k}_1^2}\right)\left[\left(\frac{\omega_{m0}^{(м)}}{\omega_1}\right)^{2/3} - 1\right]^{-3/2}, \tag{6}$$

где $k_1 = \omega_1/c$, $\tilde{k}_1 = \sqrt{k_1^2 - m^2/R^2}$.

Сравним минимальные суммарные объемы осесимметричных резонаторов и резонаторов Гельмгольца, дающих ослабление моды $(m, 0)$ не менее чем в $1/W$ раз, в диапазоне $\omega_{m0}^{(ж)} < \omega < \omega_1$. Пользуясь формулой (6) и соответственной формулой из работы [1], получим выражение

$$\frac{(\tilde{\Omega}l)_{min}}{(\Omega l)^{(р.г.)}} = \frac{\mu_{m0}^2(k_1R)^2}{[\mu_{m0}^2 - m^2][(k_1R)^2 - m^2]} > 1$$

где $\mu_{m0} = \omega_{m0}^{(ж)}R/c$. Поскольку величина (k_1R) лежит в интервале $\mu_{m0} < (k_1R) < \nu_{m0}$, то отношение минимальных объемов удовлетворяет неравенству

$$\frac{\mu_{m0}^2\nu_{m0}^2}{[\mu_{m0}^2 - m^2][\nu_{m0}^2 - m^2]} < \frac{(\tilde{\Omega}l)_{min}}{(\tilde{\Omega}l)_{min}^{(р.г)}} < \frac{\mu_{m0}^4}{[\mu_{m0}^2 - m^2]^2}.$$

Например, при $m = 1$ имеем $\quad 1{,}5 < \dfrac{(\Omega l)_{min}}{(\tilde{\Omega}l)_{min}^{(р.г)}} < 2.$

Таким образом, для получения большой звукоизоляции в заданном диапазоне частот осесимметричные резонаторы требуют большего суммарного объема, чем резонаторы Гельмгольца. Однако осесимметричные резонаторы имеют и большое преимущество перед резонаторами Гельмгольца — простоту конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. Д. Лапин.* Звукоизоляция в широких трубах. Акуст. ж., 1976, *22*, 3, 400–405.
2. *D. D. Davis, G. M. Stokes, D. Moore, G. L. Stevens,* Theoretical and experimental investigation of mufflers with comments on engine-exhaust muffler design. NaCA Rep., 1954, 1192.
3. *Е. Я. Юдин.* Исследование шума вентиляторных установок и методов борьбы с ним. Тр. ЦАГИ, вып. 713. М., Оборонгиз, 1958.
4. *М. А. Исакович, В. И. Кашина, В. В. Тютекин.* Применение систем резонаторов для звукоизоляции нормальной волны нулевого порядка в трубах и других длинных линиях. В сб.: Морское приборостроение. Акустика, 1972, 1, 117–125.
5. *М. А. Исакович.* Теория волноводной изоляции в длинных линиях. В сб. VI Всес. симпоз. по дифракции и распространению волн, кн. 2. Ереван, 1973, 105–108.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
1 марта 1976 г.

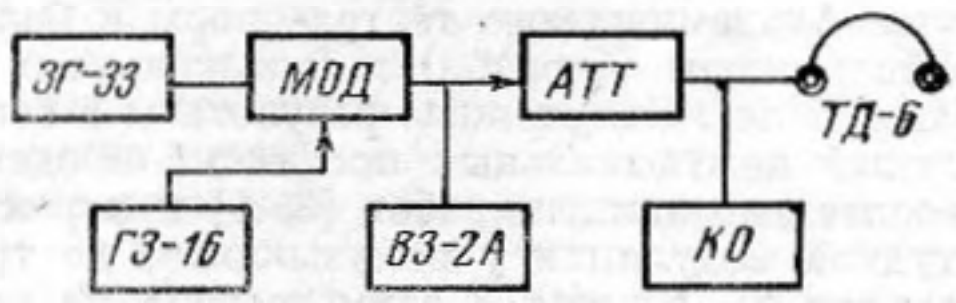
УДК 612.86:612.789:781.1

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ЗВУКА ЛЮДЬМИ С ПРОФЕССИОНАЛЬНО МУЗЫКАЛЬНО-ТРЕНИРОВАННЫМ СЛУХОМ

В. П. Морозов, Т. В. Черниговская

Известно, что пороги восприятия амплитудной модуляции (АМ) звука у человека зависят от частоты модуляции. В диапазоне частот модуляции 0,1—100 *гц* наблюдается избирательно-повышенная чувствительность слухового анализатора человека к частотам модуляции 3—5 *гц*, практически не зависящая от частоты несущей [1—4]. В этой области (3—5 *гц*) слух тренированных испытуемых обнаруживает амплитудную модуляцию глубиной 0,8—0,4 *дб*. По мере уменьшения или увеличения частоты модуляции пороги ее обнаружения слухом человека повышаются.

Авторами настоящей работы была высказана гипотеза [3—5] об обусловленности данного феномена высокой тренированностью слуха человека к восприятию речи как наиболее важного для человека звукового сигнала. В пользу гипотезы говорят



Фиг. 1. Блок-схема опытной установки ЗГ-33 – звуковой генератор, МОД – модулятор, ГЗ-16 – генератор модулирующей частоты, ВЗ-2А – ламповый вольтметр, АТТ – аттенюатор, ТД-6 – головные телефоны испытуемого, КО – контрольный осциллограф

такие экспериментальные факты: а) наличие в речевом сигнале ярко выраженной амплитудной модуляции с наиболее вероятной частотой 4—6 *гц*, обусловленной работой органов слоговой артикуляции; б) незначительное снижение порогов обнаружения амплитудной модуляции при тренировке операторов на частотах 4—6 *гц* и значительное уменьшение порогов на крайних частотах, приводящее к уплощению кривой избирательности к частоте модуляции; в) недавно экспериментально обнаруженный Т. В. Черниговской факт отсутствия избирательности к восприятию амплитудной модуляции у людей, практически не слышащих речи, но обладающих остатками слуха, позволяющими воспринять амплитудную модуляцию при достаточном усилении звука [5].

В свете высказанной гипотезы можно было предполагать, что у людей музыкальных профессий, чья трудовая деятельность связана с тонким слуховым анализом частотно-временных и динамических оттенков звука, и, следовательно, обладающих высокой профессиональной тренированностью слуха, обнаружатся определенные особенности восприятия амплитудной модуляции звука. Изучение этого вопроса представляет также общий интерес с точки зрения определения предельных возможностей слухового анализатора человека.