УДК 534.833

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКАМЕРНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ЗВУКА

А. Д. Лапин

На практике для создания звукоизоляции в одномодальном волноводе часто применяют отражатель звука в виде цепочки расширительных камер [1, 2]. Такой отражатель звука можно рассчитать на основе теории четырехполюсников [3]. Отражатель, имеющий N одинаковых расширительных камер, можно представить в виде цепочки из N одинаковых четырехполюсников. Для упрощения расчета предположим, что эта цепочка нагружена на характеристическое сопротивление. Тогда постоянная передачи цепочки будет равна постоянной передачи четырехполюсника, умноженной на N. В результате мы получим для звукоизоляции многокамерного отражателя следующее приближенное выражение:

$$D=20\,N\lg\{|B|+\sqrt{B^2-1}\}=8{,}69\,N\operatorname{Arch}|B|, \tag{1}$$

где

$$B=\frac{1}{2}\left\{\left[1+\frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\right]\cos[k(L+l)]+\left[1-\frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\right]\cos[k(L-l)]\right\}. \tag{2}$$

В этих формулах $k=\omega/c$ – волновое число, L – длина камеры, m – коэффициент расширения, равный отношению площади S поперечного сечения камеры к площади S_0 поперечного сечения волновода, l – длина трубы, соединяющей соседние камеры. Цепочка одинаковых расширительных камер создает звукоизоляцию в тех диапазонах частот, где $|B(\omega)|>1$. Величина D принимает максимальное значение

$$D_{\max}=8{,}69N\operatorname{Arch}\left[\frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\right]$$

при частотах, удовлетворяющих соотношению

$$\cos(k(L+l)]\cos[k(L-l)]=-1.$$

Формулы (1) и (2) получены при том условии, что поперечные размеры трубы и камер малы по сравнению с длиной волны звука и не учитывают влияние присоединенных масс, обусловленных изменениями поперечного сечения волновода [4]. Расчет камерного отражателя при учете присоединенных масс дан в работе [5].

По формулам (1), (2) можно рассчитать звукоизоляцию многокамерного отражателя при заданных значениях параметров k, l, L, m и N. Однако до сих пор не была решена задача о проектировании оптимального отражателя, обеспечивающего при минимальном суммарном объеме камер ослабление звука не менее чем на D *дб* в заданном частотном диапазоне. Ниже дано решение этой задачи и найдены параметры оптимального отражателя.

Выберем длины L и l такими, чтобы величина D достигала значения $D_{\max}$ в самом низкочастотном диапазоне запирания. Из этого требования получим $L=l$ и тогда величину B можно привести к виду

$$B=\left\{\cos^2(kl)-\frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\sin^2(kl)\right\}. \tag{3}$$

Модуль этой величины превышает единицу лишь в окрестностях точек $k=k_q=\frac{(2q-1)\pi}{2l}$, где $q=1, 2, 3...$ Частотные диапазоны (полосы запирания) определяются из соотношения

$$|\operatorname{tg}[(k-k_q)l]|<\frac{(m-1)}{2\sqrt{m}},$$

откуда получаются следующие приближенные выражения:

$$|k-k_q|<\frac{(m-1)}{2\sqrt{m}\,l}\quad\text{при}\quad\frac{(m-1)}{2\sqrt{m}}\ll1,$$

$$|k-k_q|<\left[\frac{\pi}{2l}-\frac{2\sqrt{m}}{(m-1)l}\right]\quad\text{при}\quad\frac{(m-1)}{2\sqrt{m}}\gg1.$$

Согласно формулам (1), (3), звукоизоляция D принимает максимальное значение $D_{\max}$ в середине ($\omega = ck_q$) полосы запирания и монотонно убывает до нуля при приближении частоты ω к границам этой полосы.

Предположим, что выполнено неравенство $m \gg 1$. Тогда цепочка камер обеспечивает звукоизоляцию в частотных диапазонах

$$|k-k_q| < \left[\frac{\pi}{2l} - \frac{2}{\sqrt{m}\, l} \right],$$

и звукоизоляция вычисляется по формуле

$$D = 8{,}69 N \operatorname{Arch} \left| \cos^2(kl) - \frac{m}{2} \sin^2(kl) \right|. \tag{4}$$

При частотах, лежащих внутри полос запирания вблизи их границ, эту формулу можно преобразовать к виду

$$D \approx 17{,}4\, N \sqrt{\sqrt{m}\, |k-k_{\text{г}}|\, l}, \tag{5}$$

где $k_{\text{г}}$ – волновое число на границе полосы запирания, $|k-k_{\text{г}}| \ll \dfrac{2}{\sqrt{m}\, l}$.

Пусть требуется ослабить звук не менее чем на D *дб* в заданном диапазоне $\omega_1 < \omega < n\omega_1$. Это можно осуществить следующим образом. Параметры l и m цепочки выберем такими, чтобы заданный частотный диапазон находился внутри первой полосы запирания симметрично относительно ее середины

$$\frac{2c}{\sqrt{m}\, l} < \omega_1 < \frac{\pi c}{2l} = \frac{(n+1)}{2} \omega_1 < n\omega_1 < \left(\frac{\pi c}{l} - \frac{2c}{\sqrt{m}\, l} \right).$$

Эти параметры получим по формулам

$$l = \frac{\pi c}{(n+1)\omega_1}, \qquad m > \left[\frac{2}{\pi} (n+1) \right]^2.$$

На границах заданного диапазона ослабление звука найдем по приближенной формуле (5)

$$D(\omega_1) = D(n\omega_1) = 17{,}4 N \sqrt{\frac{\pi}{(n+1)} \sqrt{m} - 2}. \tag{6}$$

Внутри этого диапазона ослабление звука будет бóльшим, чем на его границах, и может быть вычислено по формуле (4).

Согласно формуле (6), заданное ослабление звука можно получить путем выбора числа ячеек цепочки (при данном m) или выбора коэффициента расширения (при данном N). Рассчитаем параметры оптимальной цепочки, обеспечивающей при минимальном суммарном объеме камер ослабление звука не менее чем на D *дб* в диапазоне $\omega_1 < \omega < n\omega_1$. Эта задача сводится к нахождению минимума величины $V \equiv (NSl)$, при которой выполняется соотношение (6). Расчеты дают следующие оптимальные значения параметров:

$$m_{opt} = \left[\frac{8}{3} \frac{(n+1)}{\pi} \right]^2, \qquad N_{opt} = 0{,}07D, \tag{7}$$

$$V_{\min} = N_{opt} m_{opt} S_0 l = 0{,}025\, (n+1) \lambda_1 S_0 D, \tag{8}$$

где λ_1 – длина волны звука на частоте ω_1.

В работе [6] была решена задача о распространении звука в узкой трубе, имеющей близко расположенные друг от друга резонаторы Гельмгольца на стенках, и были найдены параметры оптимальной цепочки таких резонаторов. Сравним минимальные суммарные объемы цепочки расширительных камер и цепочки резонаторов Гельмгольца, дающих ослабление звука не менее чем на D *дб* в диапазоне $\omega_1 < \omega < n\omega_1$. Пользуясь формулой (8) и соответственной формулой из работы [6], получим соотношение

$$\frac{V_{\min}^{(p)}}{V_{\min}} = 1{,}5 \frac{(n-1)}{n}.$$

Из этого соотношения следует, что при $n > 3$ цепочка расширительных камер требует меньшего суммарного объема, чем цепочка резонаторов Гельмгольца.

Для примера рассчитаем параметры оптимальной цепочки, обеспечивающей в трубе радиусом 3 *см* ослабление звука не менее чем на 40 *дб* в диапазоне от 330 до 990 *Гц*; $c=3{,}3\cdot10^4$ *см/сек*. Пользуясь формулами (7) и (8), получим следующие оптимальные значения:

$$m_{opt}=11, \quad R_{opt}=\sqrt{m_{opt}S_0/\pi}=10\ см,$$
$$N_{opt}=3, \quad V_{min}=1{,}1\cdot10^4\ см^3, \quad l=12\ см.$$

При этих значениях параметров можно не учитывать неоднородные волны в расширительных камерах, так как даже первая из них при частоте 990 *гц* затухает в e^4 раз на длине l.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шапиро Б. К.* Основы расчета глушителей шума выхлопа. М., Оборонгиз, 1943.
2. *Клюкин И. И.* Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л., Судпромгиз, 1961.
3. *Харкевич А. А.* Основы радиотехники. М., Связьиздат, 1962.
4. *Ржевкин С. Н.* К вопросу о присоединенной массе в неоднородных акустических волноводах. Акуст. ж., 1965, *11*, 4, 371–379.
5. *Егорьичев А. В., Прудников А. С., Чернышев К. В.* Исследование резонансных свойств некоторых типов неоднородных акустических волноводов. Акуст. ж., 1973, *19*, 3, 352–358.
6. *Исакович М. А.* Теория волноводной изоляции в длинных линиях. В сб. VI Всесоюзный симпозиум по дифракции и распространению волн, кн. 2, Ереван, 1973, 105–108.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
13 декабря 1976 г.
После доработки
29 июня 1977 г.

УДК 534.231.1–16

ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Е. А. Лобанов, В. Е. Лямов, И. Ю. Солодов

Известно, что при распространении поверхностных акустических волн малой амплитуды в изотропном твердом теле структура волны достаточно сложна. Еще более сложной структурой обладают поверхностные волны, распространяющиеся вдоль поверхности анизотропного кристалла, особенно вдоль несимметричных направлений. В нелинейной кристаллоакустике структура поверхностных волн будет определяться либо динамическими эффектами для волн конечной амплитуды, либо статическими эффектами для волн бесконечно малой амплитуды при внешних воздействиях на кристалл. К динамическим эффектам мы будем относить эффекты самовоздействия и взаимодействия волн. Статические эффекты – это эффекты, связанные с влиянием медленных внешних воздействий на распространение упругостных волн. Это могут быть механические напряжения и деформации в кристаллах, либо внешние электрические или магнитные поля. Как и в случае объемных волн, статические эффекты приводят к изменению фазовой скорости волны. Однако если в случае объемных волн влияние поля может изменить поляризацию волны [1], то в случае поверхностных изменяется их структура. Численные оценки изменения фазовой скорости поверхностных акустических волн представляют интерес при разработке и исследовании таких устройств обработки сигнальной информации, как фазовращатели, корреляторы, устройства свертки и пр. [2, 3], а также для устройств измерения давления [4].

Рассмотрим пьезоэлектрик, занимающий полупространство $x_1>0$. Поверхностные акустические волны, распространяющиеся вдоль направления x_3, удовлетворяют уравнениям движения

$$\rho_0\frac{\partial U_j}{\partial t^2}=\frac{\partial P_{ij}}{\partial x_i}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathcal{D}_i}{\partial x_i}=0 \tag{2}$$