

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.28

ВЛИЯНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА СРЕДЫ НА АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОМОДОВЫХ РАСШИРИТЕЛЬНЫХ КАМЕР

П. Н. Кравчун, К. В. Чернышев

(кафедра акустики)

Многомодовые расширительные камеры (т. е. участки труб с увеличенным поперечным сечением, размеры которых сравнимы с длиной звуковой волны), применяемые в качестве глушителей шума в каналах, используемых для транспортировки какой-либо среды, обладают сравнительно невысоким гидравлическим сопротивлением и вместе с тем обеспечивают эффективную звукоизоляцию канала в широкой полосе частот. В предшествующих работах, посвященных исследованию акустических свойств многомодовых камер расширения, рассматривались в основном симметричные цилиндрические камеры круглого поперечного сечения, заполненные неподвижной средой (см., например, [1, 2]).

В настоящей работе на основе теории четырехполюсников изучаются акустические свойства многомодовой расширительной камеры, заполненной средой, движущейся с небольшой скоростью (число Маха β потока удовлетворяет условию $\beta \ll 1$), причем приведенное рассмотрение пригодно для различных форм поперечного сечения камеры.

Рассмотрим цилиндрическую камеру расширения с жесткими стенками, считая распределение амплитуд колебательной скорости во входном и выходном отверстиях поршневым. Введем систему координат (ξ, η, z) , в которой направление оси z совпадает с направлением распространения звука, а плоскость координат ξ, η совпадает с плоскостью входа, перпендикулярной оси z (тип координат ξ, η , вообще говоря, криволинейных, определяется формой поперечного сечения камеры).

Если скорость потока достаточно мала, то зоны его неоднородности занимают небольшие области вблизи входного и выходного сечений камеры, а в основном объеме камеры поток является однородным [3]. Поэтому воспользуемся упрощенной моделью стационарного потока в камере, считая его однородным во всем объеме.

Пусть число Маха β_1 потока и частота звука ω_1 в подводящем канале с площадью поперечного сечения S_1 известны. Тогда из принятой модели потока и условия сохранения объемной скорости следует: $\beta = S_1 \beta_1 / S$, $\omega = \omega_1 (1 + \beta) / (1 + \beta_1)$, где β и ω — соответственно число Маха потока и частота звука в камере.

Уравнение для комплексной амплитуды φ потенциала колебательной скорости в однородно движущейся вдоль оси z среде имеет вид

$$(1 - \beta^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \Delta_{\perp} \varphi + 2ik\beta \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k^2 \varphi = 0, \quad (1)$$

где Δ_{\perp} — оператор Лапласа, записанный в «поперечных» координатах (ξ, η) , $k = \omega/c$, c — скорость звука в неподвижной среде, i — мнимая единица. Представляя решение уравнения (1), удовлетворяющее граничным условиям на стенках камеры, в виде суперпозиции нормальных мод, находим выражение для матрицы механических импедансов

линейного четырехполюсника, соответствующего камере с движущейся средой:

$$\|Z\| = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \{F_{mn}\}^2 \times$$

$$\times \left\| \begin{array}{cc} [C_{mn}^{(1)}]^2 [\gamma_{mn} (i\chi_{mn} \operatorname{ctg} \chi_{mn} l + \zeta) - \rho\beta] & -i \frac{C_{mn}^{(1)} C_{mn}^{(2)} \chi_{mn} \gamma_{mn} e^{-\zeta l}}{\sin \chi_{mn} l} \\ i \frac{C_{mn}^{(1)} C_{mn}^{(2)} \chi_{mn} \gamma_{mn} e^{-\zeta l}}{\sin \chi_{mn} l} & -[C_{mn}^{(2)}]^2 [\gamma_{mn} (i\chi_{mn} \operatorname{ctg} \chi_{mn} l - \zeta) + \rho\beta] \end{array} \right\|, \quad (2)$$

где ρ — плотность невозмущенной среды, $\{F_{mn}\}$ — норма «поперечной» собственной функции F_{mn} акустического потенциала, $C_{mn}^{(1)}$ и $C_{mn}^{(2)}$ — коэффициенты Фурье разложения полей колебательной скорости единичной амплитуды соответственно на входе и выходе камеры по функциям F_{mn} , l — длина камеры, $\chi_{mn} = (1-\beta^2)^{-1} [k^2 - k_{mn}^2 (1-\beta^2)]^{1/2}$, $\zeta = k\beta / (1-\beta^2)$, k_{mn} — собственные значения «поперечного» волнового числа, $\gamma_{mn} = \omega\rho / (\chi_{mn}^2 - \zeta^2)$.

Из формулы (2) следует, что стационарный поток среды принципиально изменяет акустические свойства камеры по сравнению со случаем неподвижной среды: наличие потока приводит к появлению реальной части матрицы импедансов, т. е. к утрате камерой свойства реактивности, что связано с «гидродинамическим» переносом энергии звуковой волны потоком. $\operatorname{Re}\|Z\|$ является нечетной, а $\operatorname{Im}\|Z\|$ — четной функцией числа β , т. е. реактивные свойства камеры не зависят от направления потока, в то время как активное сопротивление, связанное с гидродинамическим потоком, изменяет свой знак при изменении направления потока. При $\beta \rightarrow 0$ $\operatorname{Re}\|Z\| \rightarrow 0$, а $i \cdot \operatorname{Im}\|Z\|$ стремится к матрице импедансов камеры без потока. Важно, что активное сопротивление различно для мод разного порядка, т. е. энергия различных мод в камере переносится потоком по-разному. При этом относительный вклад каждой из мод в суммарное звуковое поле на заданной частоте изменяется в зависимости от скорости потока (другими словами, поток изменяет условия распространения различных мод по-разному). Камера с движущейся средой, в отличие от камеры без потока, является невязанным четырехполюсником, вследствие чего $Z_{12} \neq -Z_{21}$.

Спектр собственных частот камеры с потоком, приведенный к частоте звука в подводящем канале, включает в себя частоты, определяемые соотношениями $f_{mn} = (1+\beta_1)/(1+\beta) f_{mno}$ и $f_{mnj} = (1+\beta)^{-1} (1+\beta_1) [f_{00j}^2 + (1-\beta^2) f_{mno}^2]^{1/2}$, где $f_{mno} = ck_{mn}/2\pi$, $f_{00j} = cj(1-\beta^2)/2l$ ($j = 1, 2, \dots$).

Значительный интерес представляет вычисление уровня глушения камеры с движущейся средой. Уровень глушения удобно характеризовать величиной

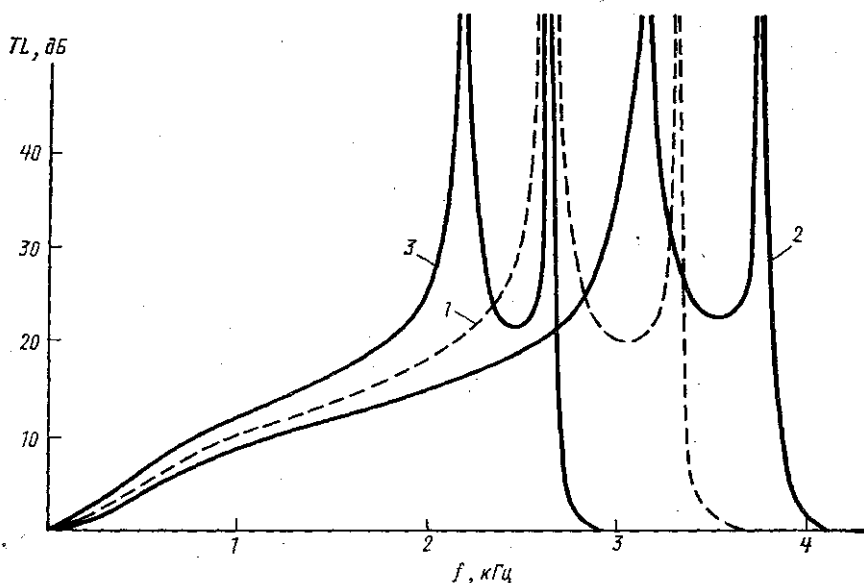
$$TL = 10 \lg \{ |b_{11} + b_{22} S_2 / S_1 - b_{12} (S_1 \rho c)^{-1} - b_{21} S_2 \rho c|^2 / 4 \},$$

представляющей собой ослабление интенсивности звука, вносимое четырехполюсником, нагруженным на сопротивление $S_2 \rho c$ (S_2 — площадь поперечного сечения отводящего канала на выходе, b_{pq} — элементы характеристической матрицы, которые могут быть вычислены, если известна матрица $\|Z\|$ [1]).

Используя формулу (2), можно получить выражения матрицы импедансов для симметричных и несимметричных цилиндрических камер

с различными формами поперечного сечения камеры, входного и выходного отверстий.

На рисунке приведены результаты расчетов на ЭВМ уровня глушения симметричной камеры круглого сечения в зависимости от линейной частоты звука в подводящем канале. Кривые 1—3 соответст-



вуют числам Маха воздушного потока $\beta=0$ (кривая 1), $+0,03$ (2) и $-0,03$ (3). Параметры камеры были выбраны таким образом, что их соотношение было близким к критическому, т. е. обеспечивающему наиболее широкую полосу глушения [1]: $l=5,3$ см, $a=2,5$ см, $b=6,5$ см (a — радиус входного и выходного отверстий, b — радиус поперечного сечения камеры).

Ширина полосы заглушения на уровне 10 дБ превышает 1,5 октавы при всех указанных скоростях потока. Важно отметить, что оба пика на каждой из частотных зависимостей уровня глушения связаны с резонансами взаимной присоединенной массы, существование которой обусловлено взаимным влиянием входного и выходного отверстий камеры. Наличие потока приводит к масштабному («доплеровскому») преобразованию характеристики глушения по оси частот, а также к некоторой деформации ее профиля, заключающейся, в частности, в повышении уровня глушения в седловине между пиками кривой TL и в небольшом сужении относительной ширины полосы глушения на заданном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Егорычев А. В., Прудников А. С., Чернышев К. В. Исследование резонансных свойств некоторых типов неоднородных акустических волноводов.— Акуст. журн., 1973, 19, 3, с. 352—358. [2] El-Sharkawy A. I., Nayfeh A. H. Effect of an expansion chamber on the propagation of sound in circular ducts.— JASA, 1978, 63, 3, p. 667—674. [3] Alfredson R. J., Davies P. O. A. L. Performance of exhaust silencer components.— J. Sound Vib., 1971, 15, 2, p. 175—196.

Поступила в редакцию
12.06.80.