

ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНОГО ШУМА ОДНОСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИЕЙ СО СКВОЗНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Рассмотрено прохождение плоской звуковой волны через ограждающую конструкцию из материала со сквозной пористостью. Проведено сравнение расчетных величин с результатами измерений в малых акустических камерах.

Flat sound wave propagation across barrier construction with through porosity is considered. The comparison of calculation values with measured results in small acoustical chambers is given.

Рассмотрим прохождение плоской звуковой волны через однослойное ограждение со сквозной пористостью. Мы будем использовать методику, принятую в работе [1]. Предполагается, что скелет материала ограждения жесткий. Его колебания не учитываются, что допустимо на низких и средних частотах [2].

Пусть на пористую преграду толщиной 2δ падает плоская звуковая волна под углом Θ . Движение воздуха в порах можно описать уравнением [2]

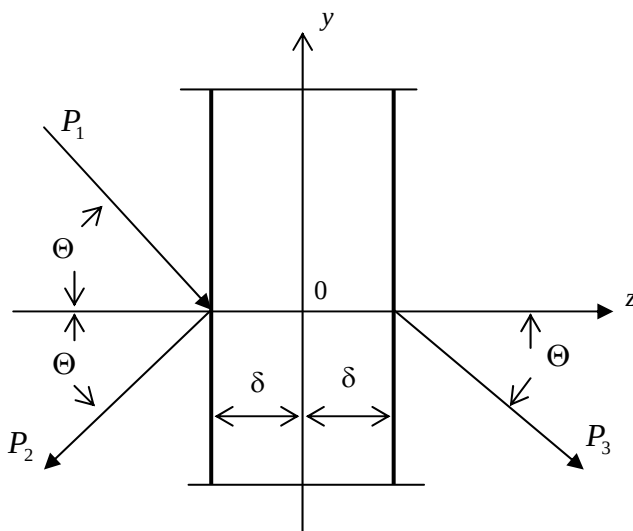


Рис. 1. Расчетная схема ограждения

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\varepsilon\rho_0}{\sigma} \frac{dv}{dt} + rv, \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность воздуха вне ограждения; v — скорость потока воздуха вне ограждения, нормальная к точке падения звуковой волны; σ — сквозная пористость; r — удельное воздушное сопротивление.

Уравнение непрерывности для воздуха в порах имеет вид [2]

$$-\frac{dv}{dz} = \frac{\sigma}{E_0} \frac{dP}{dt}, \quad (2)$$

где E_0 — модуль объемной упругости воздуха вне образца.

При рассмотрении движения воздуха в материале учитываются только сквозные поры. Сквозная пористость равна отношению объема сквозных пор ко всему объему материала.

Поскольку звуковое давление в плоской звуковой волне изменяется по закону $\exp(i\omega t)$, вместо сомножителя d/dt можно записать $i\omega$. Тогда уравнения (1) и (2) будут выглядеть так:

$$-\frac{dP}{dt} = \left(\frac{\epsilon \rho_0 i \omega}{\sigma} + r \right) v, \quad (3)$$

$$P = -\frac{dv}{dz} \frac{E_0}{i \omega \sigma}. \quad (4)$$

Исключив из уравнений (3) и (4) P , получим дифференциальное уравнение относительно колебательной скорости воздуха

$$\frac{d^2 v}{dz^2} + n^2 v = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } n^2 = \frac{\omega}{E_0} (\epsilon \omega \rho_0 - \sigma r i).$$

Решение уравнения (5) будем искать в виде $v = A \cos(nz) + B \sin(nz)$. С помощью выражения (4) получаем

$$P = \frac{E_0 n}{i \omega \sigma} (A \sin(nz) - B \cos(nz)).$$

Постоянные коэффициенты A и B находим из граничных условий:

$$P = P_1 + P_2 \quad \text{при } z = -\delta,$$

$$P = P_3 \quad \text{при } z = +\delta,$$

откуда имеем

$$v = -\frac{i \omega \sigma}{2 E_0 n} \left(\frac{P_1 + P_2 - P_3}{\sin(\delta n)} \cos(nz) + \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\cos(\delta n)} \sin(nz) \right). \quad (6)$$

На поверхностях ограждения должны соблюдаться граничные условия:

$$P_1 - P_2 = \frac{\nu \rho_0 c_0}{\cos(\Theta)} \quad \text{при } z = -\delta,$$

$$P = \frac{\nu \rho_0 c_0}{\cos(\Theta)} \quad \text{при } z = \delta.$$

Подставив сюда значение v из выражения (6) получим систему уравнений, из которой найдем коэффициент прозрачности

$$\beta_\Theta = \frac{P_3}{P_1} = \frac{4H}{(4H^2 - 1) \sin(2\delta n) + 4H \cos(2\delta n)},$$

$$\text{где } H = \frac{\rho_0 c_0 \omega \sigma}{2 E_0 n \cos(\Theta)}.$$

Поскольку

$$\delta n = \delta \left(\frac{\omega^2 \varepsilon \rho_0}{E_0} - i \frac{\omega \sigma r}{E_0} \right)^{0,5},$$

то можно ввести обозначение $\delta n = L_1 - iL_2$, где $L_1 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} + 1$;

$$L_1 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - 1; a = \delta \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_0}{E_0}}; b = \frac{\delta \sigma r}{\sqrt{E_0 \varepsilon \rho_0}}.$$

Выражение для коэффициента H перепишем в виде:

$$H = T(iL_1 - L_2), \text{ где } T = \frac{\rho_0 c_0 \omega \sigma \delta}{2E_0(L_1^2 + L_2^2) \cos(\Theta)}.$$

Коэффициент прозрачности будет теперь выглядеть следующим образом:

$$\beta_\Theta = \frac{2T(iL_3 - L_4)}{-\left(T^2 k_1 + Tk_2 + k_3\right) + i\left(T^2 k_4 + Tk_5 + k_6\right)},$$

где $L_3 = 2L_1$; $L_4 = 2L_2$; $k_1 = k_3(L_3^2 - L_4^2) + 2k_6 L_3 L_4$;
 $k_2 = 2(L_3 \sin(L_3) \text{sh}(L_4) + L_4 \cos(L_3) \text{ch}(L_4))$; $k_3 = \sin(L_3) \text{ch}(L_4)$;
 $k_6 = \cos(L_3) \text{sh}(L_4)$; $k_4 = k_6(L_3^2 - L_4^2) - 2k_3 L_3 L_4$;
 $k_5 = 2(L_3 \cos(L_3) \text{ch}(L_4) - L_4 \sin(L_3) \text{sh}(L_4))$.

Обозначим: $T = \frac{q}{\cos(\Theta)}$; $q = \frac{\pi \rho_0 c_0 \sigma \delta f}{E_0(L_1^2 + L_2^2)}$. Тогда можно записать

$$\tau_\Theta = \frac{4(L_3^2 + L_4^2)q^2 \cos(\Theta)^2}{B_1 q^4 + B_2 q^3 \cos(\Theta) + B_3 q^2 \cos(\Theta)^2 + B_4 q \cos(\Theta)^3 + B_5 \cos(\Theta)^4},$$

где $B_1 = k_1^2 + k_4^2$; $B_2 = 2(k_1 k_2 + k_4 k_5)$; $B_3 = k_2^2 + 2k_1 k_3 + 2k_4 k_6 + k_5^2$;
 $B_4 = 2(k_2 k_3 + k_5 k_6)$; $B_5 = k_3^2 + k_6^2$.

Коэффициент передачи звука при диффузном падении плоских звуковых волн на ограждение со сквозными порами определяется по формуле

$$\tau = \int_0^{\pi/2} \tau_\Theta \sin(2\Theta) d\Theta.$$

Подставив сюда выражение для коэффициента τ_Θ , и обозначив $y = \cos(\Theta)$, имеем выражение

$$\tau = 8q^2(L_3^2 + L_4^2) \int_0^1 \frac{y^3 dy}{a_1 + b_1 y + cy^2 + dy^3 + ey^4}, \quad (7)$$

где $a_1 = B_1 q^4$; $b_1 = b_2 q^3$; $c = b_3 q^2$; $d = B_4 q$; $e = B_5$.

Точное решение интеграла (7) весьма громоздко и им неудобно пользоваться. Поэтому был задействован метод численного интегрирования по спо-

собу Гаусса [3]. Собственная звукоизоляция ограждения со сквозной пористостью составит

$$R = -10lq\tau,$$

$$\text{где } \tau = 4q^2(L_3^2 + L_4^2) \left[\frac{1}{2,58a_1 + 2,2b_1 + 2,03c + 1,8d + 1,6e} + \frac{1}{9a_1 + 4,5b_1 + 2,25c + 1,125d + 0,5625e} + \frac{1}{698,57a_1 + 78,25b_1 + 8,87c + d + 0,112e} \right].$$

Для экспериментальных исследований применялись образцы в виде жестких плит из минеральной ваты со связующим составом, прошедшие термообработку. Их толщина составляла 22 и 50 мм. Измерения звукоизоляции проводились в малых акустических камерах. Результаты представлены на рис. 2. При расчетах использовались следующие исходные данные: $\sigma = 0,9$; $\varepsilon = 2$; $r = 90000 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Последняя величина измерена при продувании образцов постоянным потоком воздуха.

R , дБ

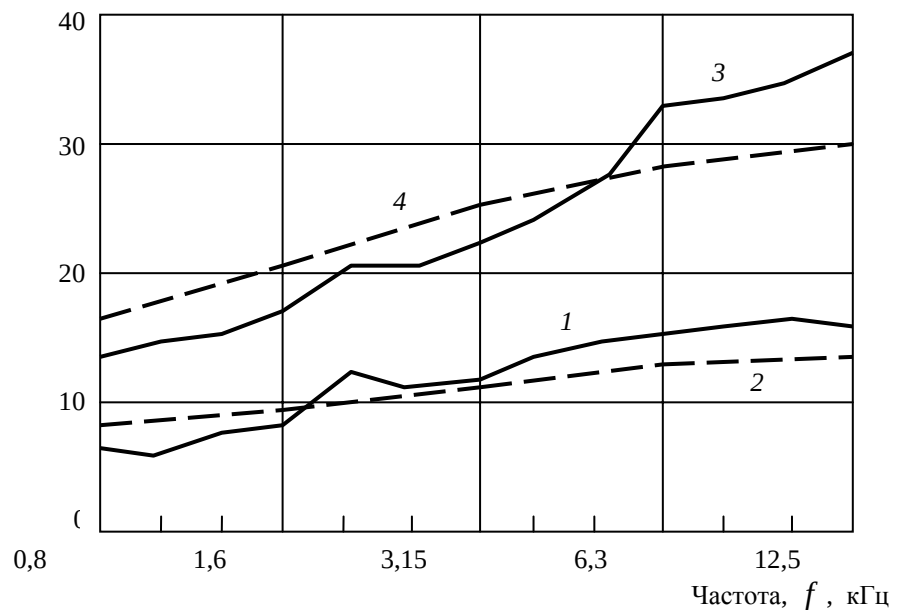


Рис. 2. Собственная изоляция воздушного шума однослойными ограждениями из минеральной ваты со связующим составом, прошедшими термообработку: 1 — измеренная при толщине образца 22 мм; 2 — то же, расчетная; 3 — измеренная при толщине образца 50 мм; 4 — то же, расчетная

На основании исследований собственной изоляции воздушного шума ограждениями со сквозной пористостью можно сделать следующие выводы:

- 1) частотная характеристика звукоизоляции не имеет провалов благодаря отсутствию эффекта волнового совпадения;
- 2) звукоизоляция не зависит от массы 1 м^2 ограждения;
- 3) звукоизоляция возрастает при увеличении толщины ограждения, а также удельного воздушного сопротивления;
- 4) при увеличении структурного фактора σ наклон частотной характеристики звукоизоляции к оси частот уменьшается.

По-видимому, при значительном увеличении толщины ограждения сквозная пористость уменьшается, а структурный фактор возрастает. Это может замедлить рост звукоизоляции. Для получения конструкции с требуемой звукоизоляцией необходимо использовать материалы, имеющие большое удельное воздушное сопротивление и толщину.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заборов В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. М. : Стройиздат, 1969. 185 с.
2. Звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы / Е.Я. Юдин, Г.Л. Осипов, Е.Н. Федосеева и др. М. : Стройиздат, 1966. 248 с.
3. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М. : Наука, 1984. 832 с.

Ретлинг Э.В., 2006