

- хорошие показатели звукопроницаемости;
  - экологичность. Солома — возобновляемый ресурс.
- Недостатки/необходимые условия:
- строительство требует тщательного соблюдения технологий и мер противопожарной безопасности;
  - после укладки солома должна быть надёжно закрыта от пламени (заштукатурена) как снаружи, так и внутри дома;
  - солома должна быть очень сухой. Блоки должны быть плотно спрессованы; располагать их следует так, чтобы волокна находились поперёк движению тепла наружу.
  - при внутренней отделке нельзя использовать материалы, перекрывающие движение пара (ценную штукатурку, пароизоляционную плёнку). Лучше подходит глиняная или глиняно-цементная штукатурка.

УДК 539.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОДНОМЕРНОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Н. А. ЛОКТЕВА, Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация*

В. Н. ПАЙМУШИН

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,  
Российская Федерация*

Д. О. СЕРДЮК

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Российская Федерация*

Рассматривается пластина сложной структуры, состоящая из двух несущих слоев и заполнителя и окруженная с двух сторон акустическими средами «1» и «2». Используется прямоугольная декартова система координат  $Oxyz$ . При этом предполагается, что плоскость  $Oxy$  для пластины является срединной, а ось  $Oz$  направлена в глубь среды «1».

На пластину набегают цилиндрическая гармоническая волна с амплитудой давления на фронте  $p$ , и частотой  $\omega$ . В результате ее взаимодействия с пластиной в окружающих средах возбуждаются давления с амплитудами  $p_1$  и  $p_2$  соответственно. Целью является показатель звукоизоляции, измеряемый в децибелах (дБ):

$$R_p = 20 \cdot \lg |p_2/p_*|_{z=0} \quad (1)$$

Математическая постановка задачи включает в себя задание давления  $p_*$ , краевую задачу для пластины, а также связь давлений  $p_1$  и  $p_2$  с кинематическими параметрами пластины. Амплитуда давления  $p_1$  представляется как сумма давлений в набегающей  $p$ , и отраженной  $p_{1w}$  волнах. Амплитуда первого из них определяется как:

$$p_* = -i\omega\rho_1 A H_0^{(2)} \left( k\sqrt{x^2 + d^2} \right). \quad (2)$$

Система уравнений, описывающих движение пластины, выглядит следующим образом [1,2]:

$$\begin{aligned}
 & B u_{1,xx}^a + \omega^2 \rho_a u_1^a + 2q^1 = 0, \\
 & -D w_{c,xxxx} + \omega^2 \rho_c w_c + 2k_1 q_x^1 + p_1 - p_2 = 0, \\
 & -D w_{a,xxxx} + (\omega^2 \rho_{aw} - 2c_3) w_a + p_1 + p_2 = 0, \\
 & u_1^a - k_1 w_{c,x} - k_2 q_{,xx}^1 + k_{31} q^1 = 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь  $\rho, \rho_{(k)} = \rho_b$  – плотности материалов заполнителя и внешних слоев;  $q^1$  и  $q^2$  – постоянные по толщине поперечные касательные напряжения в заполнителе, направленные по осям  $Ox$  и  $Oy$  соответственно;  $B$  и  $D$  – жесткости несущих слоев на растяжение-сжатие и изгиб. Через  $u_1^{(k)}$  и  $u_2^{(k)}$  обозначаются тангенциальные перемещения вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  соответственно, а через  $w^{(k)}$  – прогиб в  $k$ -м несущем слое.

Граничные условия записываются так:

$$w_c \Big|_{x=0,l} = w_a \Big|_{x=0,l} = 0, \quad u_{1,x}^a \Big|_{x=0,l} = 0, \quad q_{,x}^1 \Big|_{x=0,l} = 0, \quad w_{c,xx} \Big|_{x=0,l} = w_{a,xx} \Big|_{x=0,l} = 0 \tag{4}$$

Искомые функции представляются в виде тригонометрических рядов, удовлетворяющих условиям (4):

$$\begin{aligned}
 w_c &= \sum_{n=1}^{\infty} w_{cn} \sin \lambda_n x, \quad w_a = \sum_{n=1}^{\infty} w_{an} \sin \lambda_n x, \\
 u_1^a &= \sum_{n=0}^{\infty} u_n \cos \lambda_n x, \quad q^1 = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \cos \lambda_n x, \quad \lambda_n = \pi n / l.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Амплитуда давления в набегающей волне  $p_*$  также раскладывается в тригонометрический ряд:

$$p_* = \sum_{n=1}^{\infty} p_{*n} \sin \lambda_n x, \tag{6}$$

Коэффициенты этого ряда зависят от вида падающей волны и с учетом (2) для цилиндрической волны имеют следующий вид ( $\rho_1 = \rho_0$ ):

$$p_{*n} = -\frac{2i\omega\rho_0 A}{l} \int_0^l H_0^{(2)}(k\sqrt{x^2+d^2}) \sin \lambda_n x dx. \tag{7}$$

При вычислении давлений  $p_{1w}$  и  $p_2$  пренебрегаем дифракцией на концах пластины и представляя их в виде:

$$p_{1w} = \sum_{n=1}^{\infty} p_{1n} \sin \lambda_n x, \quad p_2 = \sum_{n=1}^{\infty} p_{2n} \sin \lambda_n x. \tag{8}$$

Коэффициенты рядов (8) определяются формулами:

$$p_{1wn} = -\frac{1}{2}(w_{cn} + w_{an})\Gamma_n(k), \quad p_{2n} = \frac{1}{2}(w_{cn} + w_{an})\Gamma_n(k), \tag{9}$$

где

$$\Gamma_n(k) = \frac{\rho_0 \omega^2 \varepsilon(k, \lambda_n)}{\sqrt{|k^2 - \lambda_n^2|}} = \frac{\Gamma_{n0}(k)}{k_{n0}(k)}, \quad k_{n0}(k) = \sqrt{|k^2 - \lambda_n^2|}, \quad \Gamma_{n0}(k) = \rho_0 \omega^2 \varepsilon(k, \lambda_n).$$

При этом имеют место формулы:

$$p_1 - p_2 = \sum_{n=1}^{\infty} [p_{*n} - w_{cn} \Gamma_n(k)] \sin \lambda_n x, \quad p_1 + p_2 = \sum_{n=1}^{\infty} [p_{*n} - w_{an} \Gamma_n(k)] \sin \lambda_n x. \quad (10)$$

В выражение (3) подставляем ряды (5) и (10) и в результате получаем значения для амплитуды давления в волне, прошедшей преграду:

$$p_{2n} = R_n(\omega) p_{*n}, \quad R_n(\omega) = \frac{P_5(\lambda_n^2, \omega^2) \tilde{S}_{1n}(\omega) - \tilde{S}_{2n}(\omega)}{2 \tilde{S}_{1n}(\omega) \tilde{S}_{2n}(\omega)} \Gamma_{n0}(k), \quad (11)$$

$$\tilde{S}_{2n}(\omega) = P_5(\lambda_n^2, \omega^2) \Gamma_{n0}(k) + k_{n0}(k) P_6(\lambda_n^2, \omega^2),$$

$$\tilde{S}_{1n}(\omega) = k_{n0}(k) P_4(\lambda_n^2, \omega^2) + \Gamma_{n0}(k),$$

где введены следующие обозначения:

$$P_1(q, \omega) = Bq - \rho_a \omega, \quad P_2(q) = k_2 q + k_{31},$$

$$P_3(q, \omega) = Dq^2 - \omega \rho_c, \quad P_4(q, \omega) = Dq^2 - \omega \rho_{aw} + 2c_3,$$

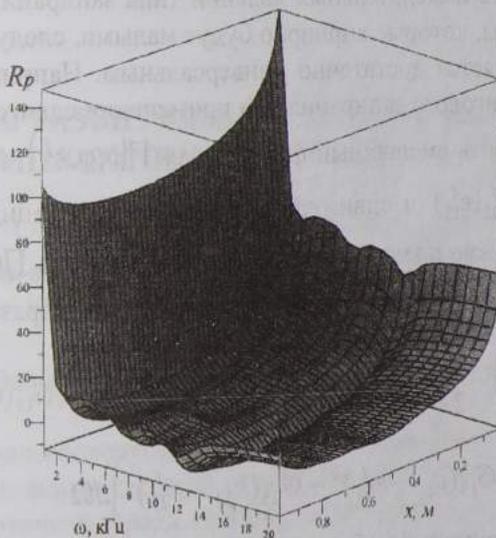
$$P_5(q, \omega) = 2 + P_1(q, \omega) P_2(q),$$

$$P_6(q, \omega) = P_3(q, \omega) P_5(\omega, q) + 2k_1^2 q P_1(q, \omega).$$

Тогда показатель звукоизоляции преграды (1) определяется так:

$$R_p = -20 \cdot \lg |p_2/p_*| = -20 \cdot \lg \left| \frac{1}{p_*} \sum_{n=1}^{\infty} R_n(\omega) p_{*n} \sin \lambda_n x \right|. \quad (12)$$

В качестве примера рассматривается пластина длиной  $l = 1 \text{ м}$ . Расчет производится для диапазона частот набегающей волны от 20 Гц до 20 кГц, что соответствует слышимому диапазону. Соответствующие результаты представлены на рисунке:



Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 12-08-31099, 13-08-90435).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов, В. А. Уточнение уравнений динамики многослойных оболочек с трансверсально-мягким наполнителем / В. А. Иванов, В. Н. Паймушин. — Изв. РАН. МТТ, 1995. — № 3. — С. 142–152
- Волны в сплошных средах: учеб. пособ. для вузов / А. Г. Горшков [и др.] — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 472 с.