

УДК 359.3

DOI: 10.18698/0536-1044-2016-1-27-34

Исследование звукоизоляционных свойств трехслойной пластины при воздействии плоской волны

Н.А. Локтева, Д.О. Сердюк, Д.В. Тарлаковский

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва,
Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3

The Study of Soundproof Properties of a Three-Layer Plate under the Influence of a Plane Wave

N.A. Lokteva, D.O. Serdyuk, D.V. Tarlakovski

Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993, Moscow, Russian Federation,
Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, A-80, GSP-3



e-mail: nlok@rambler.ru, d.serduk55@gmail.com



Исследованы звукоизоляционные свойства бесконечной пластины, окруженной с двух сторон акустическими средами, при воздействии на нее плоской гармонической волны. Пластина имеет сложную трехслойную структуру (несущие слои — упругие изотропные, а наполнитель — ортотропный, сотовой конфигурации). Для описания движения пластины использованы новые уточненные уравнения, учитывающие геометрические параметры пластины, обжатие и сдвиг слоев наполнителя. Для решения задачи применялось экспоненциальное преобразование Фурье, что позволило получить выражение для определения амплитуды давления в прошедшей сквозь преграду волне. Установлена связь между кинематическими параметрами пластины и амплитудами набегающей и прошедших преграду волн, для чего рассмотрена вспомогательная задача об излучении волны от границы полупространства. Приведен параметрический алгоритм моделирования процесса поглощения колебаний бесконечной трехслойной пластиной при воздействии на нее плоской набегающей волны, где в качестве параметров использовались физические и механические свойства материалов трехслойной пластины и акустических сред, а также геометрические параметры несущих слоев и наполнителя. Приведены примеры расчетов.

Ключевые слова: бесконечная трехслойная пластина, сотовый наполнитель, акустические среды, плоская волна, преобразование Фурье, звукоизоляция.



The authors study the soundproof properties of an infinite plate surrounded on two sides by acoustic environments under the effect of a plane harmonic wave. The plate has a complex three-layer structure where the bearing layers are isotropic elastic, and the filler is orthotropic, with honeycomb configuration. To describe the plate motion, new refined equations are used that take into account geometrical parameters of the plate, compression and shear of the filler layers. To solve the problem, the exponential Fourier transform is applied, which yields an expression for determining the pressure amplitude of a wave transmitted through the barrier. The connection between kinematic parameters of the plate and the amplitudes of the incoming and outgoing waves is established considering an auxiliary problem of wave radiation from the half-space boundary. A parametric algo-

rithm is presented for modelling the process of oscillation absorption by an infinite three-layer plate under the effect of a plane incoming wave where the parameters are physical and mechanical properties of the three-layer plate materials and the acoustic environments as well as geometrical parameters of the bearing layers and the filler. Examples of the calculations are given.

Keywords: infinite sandwich plates, honeycomb, acoustic environment, plane wave, Fourier transform, soundproofing.

В настоящее время существует большое количество публикаций по исследованию звукоизоляционных свойств различных элементов конструкций, в которых наиболее полно рассмотрены задачи о свойствах однородных звукопоглощающих препятствий [1–5]. В случае трехслойных элементов, как правило, не учитывается поперечное обжатие и сдвиг слоев [6], что не позволяет достаточно полно отразить истинную картину их деформированного состояния. Оценка влияния этих параметров на характер поведения упругой волны при ее прохождении через трехслойное препятствие важна для авиационной и ракетно-космической техники, а также для других областей машиностроения и строительства. В частности, в авиации пластины сложной конструкций используются для звукоизоляции силовых агрегатов. В данной статье предполагается, используя уточненные модели трехслойных пластин, учесть влияние указанных параметров.

Цель работы — разработка математической модели колебаний и определение параметра звукоизоляции тонкостенного трехслойного препятствия в зависимости от частоты набегающей волны на примере бесконечной пластины в акустической среде.

Рассмотрим бесконечное тонкостенное препятствие, окруженное с двух сторон акустическими средами «1» и «2» (рис. 1) с одинаковыми свойствами. Используем декартову систему ко-

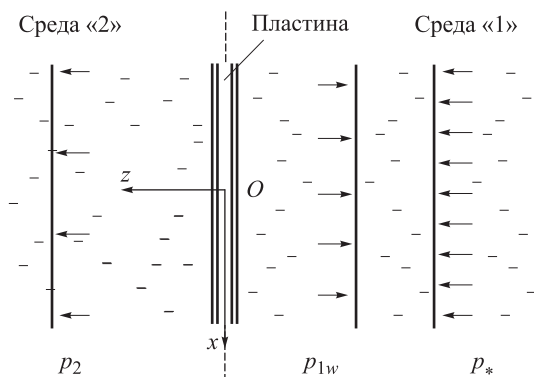


Рис. 1. Тонкостенное препятствие сложной структуры, окруженное акустическими средами

ординат $Oxyz$. При этом предполагаем, что плоскость Oxy для пластины является срединной, а ось Oz направлена в глубь среды «2». В среде «1» на пластину набегающая плоская гармоническая волна с амплитудой давления на фронте p_* и частотой ω . В результате ее взаимодействия с пластиной в окружающих средах возбуждаются давления с амплитудами p_{1w} и p_2 . Суммарное давление в среде «1» определяется по формуле

$$p_1 = p_* + p_{1w}. \quad (1)$$

Звукоизоляционные характеристики преграды будем оценивать коэффициентом звукоизоляции η и параметром звукоизоляции R_p (дБ):

$$\eta = |p_{20}/p_{*0}|; \quad R_p = -20 \lg(\eta); \quad (2)$$

$$p_{20} = p_2|_{z=0}; \quad p_{*0} = p_*|_{z=0}.$$

Связь давлений в средах с перемещениями границ. Амплитуды давлений p_{1w} и p_2 зависят от кинематических параметров границ сред «1» и «2». Для определения этой связи рассмотрим вспомогательную плоскую задачу (все искомые функции не зависят от координаты y), полагая, что на границах сред задано изменяющееся во времени t по гармоническому закону нормальное перемещение w :

$$w|_{z=0} = w_0(x)e^{i\omega t}.$$

Это равенство эквивалентно следующему соотношению относительно амплитуды v нормальной к границе скорости:

$$v|_{z=0} = i\omega w_0(x). \quad (3)$$

Движение сред описывается уравнением Гельмгольца относительно амплитуды Φ потенциала скоростей [7–9]:

$$\Delta\Phi + k^2\Phi = 0; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где $k = \omega/c$ — волновое число; c — скорость распространения волн в среде.

При этом амплитуды давления p и нормальной скорости v определяются следующими выражениями:

$$p = -i\omega\rho_0\Phi; \quad v = \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \quad (5)$$

где ρ_0 — плотность среды.

На бесконечности должно выполняться дополнительное условие, которое укажем ниже.

Для построения удовлетворяющего условиям на бесконечности решения задачи (3), (4) используем экспоненциальное преобразование Фурье [7] по координате x (q — параметр; верхний индекс «F» указывает на изображение). Тогда уравнение (4) и граничное условие (3) преобразуются к следующему виду:

$$\frac{\partial^2\Phi^F}{\partial z^2} + \text{sign}(k-|q|)k_0^2(k^2, q^2)\Phi^F = 0; \quad (6)$$

$$k_0(k, q) = \sqrt{|k-q|};$$

$$v^F\Big|_{z=0} = i\omega w_0^F(q). \quad (7)$$

Для среды «2» (ось Oz направлена в глубь полупространства) при $|q| > k$ решение задачи (6), (7) должно быть ограниченным при $z \rightarrow +\infty$, а при $|q| < k$ с учетом одномерности задачи в пространстве преобразований дополнительное условие (условие Зоммерфельда [7]) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} + ik_0(k^2, q^2)\Phi = o\left(\frac{1}{\sqrt{z}}\right), \quad z \rightarrow +\infty. \quad (8)$$

Удовлетворяющее этим требованиям решение:

$$\Phi^F = C(q)\left[e^{-ik_0(k^2, q^2)z}H(k-|q|) + e^{-k_0(k^2, q^2)z}H(|q|-k)\right],$$

где C — постоянная интегрирования; в точках $q = \pm k$ решение доопределяется соответствующими односторонними пределами; $H(x)$ — функция Хевисайда.

Определив постоянную C из граничного условия (7), имеем:

$$\Phi^F = -\frac{\omega w_0^F(q)}{k_0(k^2, q^2)}\left[e^{-ik_0(k^2, q^2)z}H(k-|q|) + ie^{-k_0(k^2, q^2)z}H(|q|-k)\right]. \quad (9)$$

Отсюда с учетом (2) и (5) получим изображение искомого давления на границе полупространства:

$$p_{20}^F = w_0^F(q)\Gamma^F(k, q);$$

$$\Gamma^F(k, q) = \frac{\rho_0\omega^2\varepsilon(k, q)}{k_0(k^2, q^2)}; \quad (10)$$

$$\varepsilon(k, q) = \begin{cases} i & \text{при } |q| < k, \\ -1 & \text{при } |q| > k. \end{cases}$$

Оригинал функции $\Gamma^F(k, q)$ находим с учетом ее четности по q :

$$\Gamma(k, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma^F(k, q)e^{-iqx}dq =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \Gamma^F(k, q)\cos(qx)dq =$$

$$= \frac{\rho_0\omega^2}{\pi} \left[i \int_0^k \frac{\cos(qx)}{\sqrt{k^2 - q^2}}dq - \int_k^{+\infty} \frac{\cos(qx)}{\sqrt{q^2 - k^2}}dq \right]. \quad (11)$$

Определив входящие в (11) интегралы [10]:

$$\int_0^k \frac{\cos(qx)}{\sqrt{k^2 - q^2}}dq = \frac{\pi}{2} J_0(kx),$$

$$\int_k^{+\infty} \frac{\cos(qx)}{\sqrt{q^2 - k^2}}dq = -\frac{\pi}{2} N_0(k|x|),$$

где $J_0(\zeta)$ и $N_0(\zeta)$ — функции Бесселя и Неймана нулевого порядка, получим оригинал функции:

$$\Gamma(k, x) = \frac{1}{2}i\omega\rho_0k \left[J_0(kx) - iN_0(k|x|) \right] = \frac{1}{2}i\omega^2\rho_0H_0^{(2)}(k|x|).$$

Здесь учтена четность функции $J_0(\zeta)$ и связь функции Ханкеля второго рода $H_0^{(2)}(\zeta)$ с функциями Бесселя и Неймана.

Для функции $H_0^{(2)}(\zeta)$ имеет место соотношение [10]:

$$H_0^{(2)}(\zeta) = -\frac{2i}{\pi} \ln \frac{\zeta}{2}, \quad \zeta \rightarrow 0,$$

поэтому при $k=0$ ($\omega=0$) функция $\Gamma(k, x)$ доопределяется следующим образом:

$$\Gamma(0, x) = 0,$$

а при $k > 0$ справедливо асимптотическое представление:

$$\Gamma(k, x) = \frac{\omega^2\rho_0}{\pi} \ln \frac{k|x|}{2}, \quad x \rightarrow 0.$$

Используя теорему о свертке оригиналов [7] из выражения (10), для давления в среде «2» на поверхности полупространства получим следующее представление (знак «*» означает свертку):

$$p_{20}(x) = w_0(x) * \Gamma(k, x). \quad (12)$$

Для среды «1» (ось Oz направлена в сторону, противоположную полупространству) при $|q| > k$ решение задачи (6), (7) должно быть ограниченным при $z \rightarrow -\infty$, а при $|q| < k$ условие (8) заменится следующим соотношением:

$$\frac{\partial \Phi^F}{\partial z} + ik_0(k^2, q^2) \Phi^F = o\left(\frac{1}{\sqrt{-z}}\right), \quad z \rightarrow -\infty.$$

При этом вместо формул (9) и (12) получим следующие выражения:

$$\Phi^F = \frac{\omega w_0^F(q)}{k_0(k^2, q^2)} \left[e^{-ik_0(k^2, q^2)z} H(k-|q|) + e^{ik_0(k^2, q^2)z} H(|q|-k) \right];$$

$$p_{1w0}(x) = -w_0(x) * \Gamma(k, x), \quad p_{1w0} = p_{1w}|_{z=0}. \quad (13)$$

Уравнения движения трехслойной пластины. Полагаем, что трехслойная пластина имеет симметричную структуру (рис. 2). Несущие слои являются упругими и изотропными с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν и имеют толщину $2t$. Заполнитель — ортотропный, сотовой конфигурации, с модулями обжатия E_3 и сдвига G_1, G_2 в направлениях осей Ox и Oy соответственно — имеет толщину $2h$. Номера несущих слоев соответствуют номерам соприкасающихся с ними сред. В рассматриваемом далее частном случае трансверсально-мягкого заполнителя модули сдвига заполнителя равны между собой: $G_1 = G_2 = G$.

Для рассматриваемой плоской задачи уравнения движения пластины по гармоническому

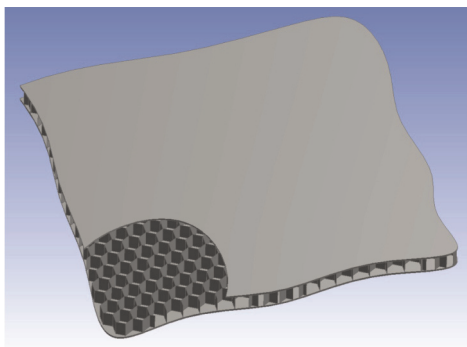


Рис. 2. Структура пластины

закону имеют следующий вид (переменная после запятой в нижнем индексе указывает на производную) [11, 12]:

$$\begin{aligned} B u_{,xx} + \omega^2 \rho_a u + 2q &= 0; \\ -D w_{c,xxxx} + \omega^2 \rho_c w_c + 2k_1 q_{,x} + p_{10} - p_{20} &= 0; \\ -D w_{a,xxxx} + (\omega^2 \rho_{aw} - 2c_3) w_a + p_{10} + p_{20} &= 0; \end{aligned} \quad (14)$$

$$u_1^a - k_1 w_{c,x} - k_2 q_{,xx} + k_3 q = 0,$$

где

$$u = u^{(1)} - u^{(2)}; \quad w_c = w^{(1)} + w^{(2)}; \quad w_a = w^{(1)} - w^{(2)};$$

$$\rho_a = 2\rho_b t; \quad \rho_c = \rho_a + \rho h; \quad \rho_{aw} = \rho_a + \frac{\rho h}{3};$$

$$\rho = \frac{4d\rho_z}{\sin(\alpha)3a}; \quad B = \frac{2Et}{1-\nu^2}; \quad D = \frac{Bt^2}{3}; \quad c_3 = \frac{E_3}{2h};$$

$$k_1 = t + h; \quad k_2 = \frac{h^2}{3c_3}; \quad k_3 = \frac{2h}{G}.$$

Здесь $u^{(j)}$ и $w^{(j)}$ — амплитуды тангенциальных перемещений вдоль оси Ox и прогибов в j -м несущем слое; q — амплитуда постоянных по толщине поперечных касательных напряжений в заполнителе, направленным по оси Ox ; ρ_z и ρ_b — плотность материала заполнителя и несущих слоев соответственно; B и D — жесткости несущих слоев на растяжение-сжатие и изгиб.

Амплитуды p_{10} и p_{20} давлений в уравнениях (14) в соответствии выражениями (1), (12) и (13) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} p_{10}(x) &= p_{*0}(x) + p_{1w0}(x) = \\ &= p_{*0}(x) - \frac{1}{2} [w_c(x) + w_a(x)] * \Gamma(k, x); \end{aligned} \quad (15)$$

$$p_{20}(x) = \frac{1}{2} [w_c(x) - w_a(x)] * \Gamma(k, x).$$

Определение изображения давления в среде «2». К системе уравнений (14) с учетом (15) применим преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} 2q^F - P_1(q^2, \omega^2) u^{aF} &= 0; \\ [P_3(q^2, \omega^2) + \Gamma^F(k, q)] w_c^F - 2iqk_1 q^F &= p_{*0}^F; \\ S_1(q, \omega) w_a^F = p_{*0}^F, \quad u^{aF} - iqk_1 w_c^F + P_2(q^2) q^F &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$P_1(q, \omega) = Bq - \rho_a \omega; \quad P_2(q) = k_2 q + k_3;$$

$$S_1(q, \omega) = P_4(q^2, \omega^2) + \Gamma^F(k, q);$$

$$P_3(q, \omega) = Dq^2 - \omega\rho_c;$$

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

Решив алгебраическую систему уравнений (16), получим:

$$w_a^F = \frac{p_{*0}^F}{S_1(q, \omega)}; \quad w_c^F = \frac{P_5(q^2, \omega^2)p_{*0}^F}{S_2(q, \omega)},$$

где

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

$$S_1(q, \omega) = 2q^2k_1^2 + [P_3(q^2, \omega^2) + \Gamma^F(k, q)]P_2(q^2);$$

$$S_2(q, \omega) = P_5(q^2, \omega^2)\Gamma^F(k, q) + P_6(q^2, \omega^2);$$

$$P_6(q, \omega) = P_3(q, \omega)P_5(q, \omega) + 2k_1^2qP_1(q, \omega).$$

Используя формулу (15), определим изображение давления на поверхности пластины в среде «2»:

$$p_{20}^F = R(q, \omega)p_{*0}^F; \quad R(q, \omega) = \frac{P_5(q^2, \omega^2)S_1(q, \omega) - S_2(q, \omega)}{2S_1(q, \omega)S_2(q, \omega)}\Gamma^F(k, q). \quad (17)$$

Функцию $R(q, \omega)$ удобно преобразовать следующим образом:

$$R(q, \omega) = \rho_0\omega^2 [R_1(q, \omega)\varepsilon_1(k, q) + \text{sign}(k - |q|)R_2(q, \omega)k_0(k^2, q^2)]k_0(k^2, q^2),$$

где

$$R_1(q, \omega) = -\frac{Q_3(q^2, \omega^2)Q_1(q^2, \omega^2)}{Q(q^2, \omega^2)};$$

$$\varepsilon_1(k, q) = \begin{cases} i & \text{при } |q| < k, \\ 1 & \text{при } |q| > k; \end{cases}$$

$$R_2(q, \omega) = \frac{Q_3(q^2, \omega^2)Q_2(q^2, \omega^2)}{Q(\omega^2, q^2)};$$

$$Q(q, \omega) = Q_1^2(q, \omega) - (\omega/c^2 - q)Q_2^2(q, \omega);$$

$$Q_1(q, \omega) = \rho_0^2\omega^2P_5(q, \omega) - (\omega/c^2 - q)P_4(q, \omega)P_6(q, \omega);$$

$$Q_2(q, \omega) = \rho_0\omega [P_6(q, \omega) + P_4(q, \omega)P_5(q, \omega)];$$

$$Q_3(q, \omega) = [\omega(\rho_c - \rho_{aw}) + 2c_3]P_5(q, \omega) - 2k_1qP_1(q, \omega).$$

Для использования формулы (2) необходимо знать оригинал функции p_{20}^F , который существенно зависит от вида набегающей волны.

Характеристики звукоизоляции. Рассматриваемый вариант плоской набегающей волны наиболее простой, поскольку, как показано в работе [9], амплитуда давления в набегающей волне не зависит от координаты x и имеет вид

$$p_* = \Delta p e^{-ikz}; \quad p_{*0} = \Delta p. \quad (18)$$

Здесь и далее Δp — амплитуда давления на фронте волны при ее касании препятствия.

Соответствующее второму равенству в выражении (18) изображение запишем в следующем виде [7]:

$$p_{*0}^F = \Delta p \delta(q),$$

где $\delta(q)$ — дельта-функция Дирака.

Тогда из (17) получим

$$p_{20}^F = \Delta p R(0, \omega)\delta(q); \quad p_{20} = \Delta p R(0, \omega).$$

Следовательно, коэффициент поглощения преграды и показатель звукоизоляции (2) имеют следующий вид:

$$\eta = |R(0, \omega)|; \quad R_p = -20 \lg |R(0, \omega)|.$$

Функцию $R(0, \omega)$ находим с помощью равенства (17):

$$R(0, \omega) = i\rho_0\omega c \frac{P_5(0, \omega^2)S_1(0, \omega) - S_2(0, \omega)}{2S_1(0, \omega)S_2(0, \omega)} = i\rho_0c \frac{\omega^2(\rho_{aw} - \rho_c) - 2c_3}{2(\omega^2\rho_{aw} - 2c_3 - i\rho_0\omega c)(i\rho_0c - \omega\rho_c)}. \quad (19)$$

Отсюда следует решение статической задачи, что соответствует $\omega = 0$. Переходя в (19) к пределу $\omega \rightarrow 0$, получим:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |\eta| = \lim_{\omega \rightarrow 0} |R(0, \omega)| = \frac{1}{2}. \quad (20)$$

Для соответствующего показателя имеем такое равенство:

$$R_p = -20 \lg |R(0, \omega)| = 10 \lg 2.$$

Поведение коэффициента поглощения на высоких частотах описывает следующий предел:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |\eta| = \lim_{\omega \rightarrow \infty} |R(0, \omega)| = 0. \quad (21)$$

В качестве примера рассмотрим пластину сотовой структуры (см. рис. 2), окруженную с двух сторон воздухом: $\rho_0 = 1,2041 \text{ кг/м}^3$, $c = 343 \text{ м/с}$. Толщина несущего слоя и полутолщина заполнителя — $t = 0,3 \text{ мм}$, $h = 2 \text{ мм}$ соответственно. Материал несущих слоев и заполнителя — сплав АМц: $E = 71 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,34$;

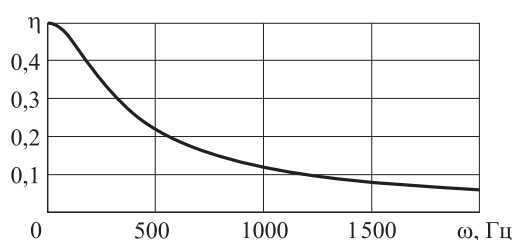


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения η от частоты ω

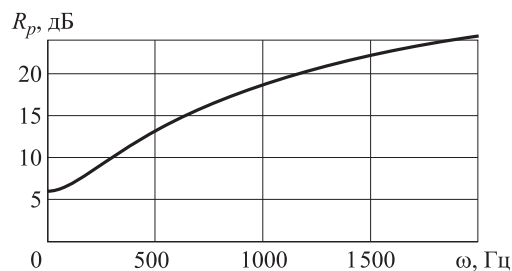


Рис. 4. Зависимость параметра звукоизоляции R_p от частоты

$\rho_b = \rho_z = 2730 \text{ кг/м}^3$. Осредненные характеристики сотового заполнителя из сплава АМц с длиной и толщиной стенки $d_1 = 6,3 \text{ мм}$ и $d_2 = 0,05 \text{ мм}$, а также углом между стенками $\alpha = 120^\circ$ определяются на основании работы [13]: $E_3 = 981 \text{ МПа}$; $G = 202 \text{ МПа}$.

Соответствующие коэффициенты в системе уравнений (14) имеют следующие значения:

$$\rho_a = 1,64; \quad \rho_c = 1,7; \quad \rho_{aw} = 1,66; \quad \rho = 33,35;$$

$$B = 4,82 \cdot 10^7; \quad D = 1,45; \quad c_3 = 2,45 \cdot 10^{11};$$

$$k_1 = 0,0023; \quad k_2 = 5,434 \cdot 10^{-18}; \quad k_3 = 1,98 \cdot 10^{-11}.$$

Результаты расчетов при $\Delta p = -i\omega\rho_0 A_\Phi$ приведены на рис. 3 и 4. Следует отметить, что они

полностью соответствуют предельным значениям (20) и (21).

Вывод

Разработан параметрический алгоритм моделирования процесса поглощения колебаний бесконечной трехслойной пластиной при воздействии на нее плоской набегающей волны. Параметрами являются физические и механические свойства материалов трехслойной пластины и акустических сред, а также геометрические параметры несущих слоев и сотового заполнителя.

Литература

- [1] Алумяэ Н. А. *Теория упругих оболочек и пластинок. Механика деформируемого твердого тела*. Москва, Наука, 1972. 480 с.
- [2] Park J., Mongeau L. Vibration and sound radiation of viscoelastically supported Mindlin plates. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 318, no. 4–5, pp. 1230–1249.
- [3] Picó R., Gautier F. The vibroacoustics of slightly distorted cylindrical shells: A model of the acoustic input impedance. *J. Sound Vib*, 2007, 302, no. 1–2, pp. 18–38.
- [4] Plaut R. H., Cotton S. A. Two-dimensional vibrations of air-filled geomembrane tubes resting on rigid or deformable foundations. *J. Sound Vib*, 2005, 282, no. 1–2, pp. 265–276.
- [5] Ruzzene M. Vibration and sound radiation of sandwich beams with honeycomb truss core. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 277, no. 4–5, pp. 741–763.
- [6] Stamm K., Witte H. *Sandwichkonstruktionen. Berechnung, Fertigung, Ausführung*. Wien–New York, Springer-Verlag, 1974. 337 p.
- [7] Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. *Волны в сплошных средах*. Москва, Физматлит, 2004. 472 с.
- [8] Игумнов Л.А., Локтева Н.А., Паймушин В.Н., Тарлаковский Д.В. Звукоизоляционные свойства одномерной трехслойной пластины. *Математические методы и физико-механические поля*, 2013, т. 56, № 2, с. 86–93.
- [9] Локтева Н.А., Сердюк Д.О., Тарлаковский Д.В. Влияние формы набегающей волны на звукоизоляционные свойства прямоугольной пластины сложной структуры. *Труды МАИ*, 2015, № 82. URL: http://www.mai.ru/upload/iblock/c2b/lokteva_serdyuk_tarlavovski_rus.pdf (дата обращения 15 октября 2015).
- [10] Градштейн И.С., Рыжик И.М. *Таблицы интегралов, сумм, рядов и производений*. Москва, Наука, 1971. 1108 с.
- [11] Иванов В.А., Паймушин В.Н. Уточненная постановка динамических задач трехслойных оболочек с трансверсально-мягким заполнителем численно-аналитичес-

- кий метод их решения. *Прикладная механика и техническая физика*, 1995, т. 36, № 4, с. 147–151.
- [12] Иванов В.А., Паймушин В.Н. Уточнение уравнений динамики многослойных оболочек с трансверсально-мягким наполнителем. *Известия РАН. МТТ*, 1995, № 3, с. 142–152.
- [13] Абрамовиц М., Стиган И. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*. Москва, Наука, 1979. 832 с.

References

- [1] Alumiaie N. A. *Teoriia uprugikh obolochek i plastinok. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Theory of elastic shells and plates. Fracture Mechanics]. Moscow, Nauka publ., 1972. 480 p.
- [2] Park J., Mongeau L. Vibration and sound radiation of viscoelastically supported Mindlin plates. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, vol. 318, no. 4–5, pp. 1230–1249.
- [3] Picó R., Gautier F. The vibroacoustics of slightly distorted cylindrical shells: A model of the acoustic input impedance. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, vol. 302, no. 1–2, pp. 18–38.
- [4] Plaut R.H., Cotton S.A. Two-dimensional vibrations of air-filled geomembrane tubes resting on rigid or deformable foundations. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 282, no. 1–2, pp. 265–276.
- [5] Ruzzene M. Vibration and sound radiation of sandwich beams with honeycomb truss core. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol. 277, no. 4–5, pp. 741–763.
- [6] Stamm K., Witte H. *Sandwichkonstruktionen. Berechnung, Fertigung, Ausführung*. Wien–New York, Springer-Verlag, 1974. 337 p.
- [7] Gorshkov A.G., Medvedskii A.L., Rabinskii L.N., Tarlakovskii D.V. *Volny v sploshnykh sredakh* [Waves in continuous media]. Moscow, FIZMATLIT publ., 2004. 472 p.
- [8] Igumnov L.A., Lokteva N.A., Paimushin V.N., Tarlakovskii D.V. *Zvukoizolatsionnye svoistva odnomernoi trekhslonnoi plastiny* [Sound Insulation Properties of One-Dimensional Three-Layered Plate]. *Matematicheskie metody i fiziko-mekhanicheskie polia* [Mathematical Methods and Physicomechanical Fields]. 2013, vol. 56, no. 2, pp. 86–93.
- [9] Lokteva N.A., Serdiuk D.O., Tarlakovskii D.V. *Vliianie formy nabegaiushchei volny na zvukoizolatsionnye svoistva priamougol'noi plastiny slozhnoi struktury* [Influence of form rolling wave on a rectangular plate sound insulation properties of complex structure]. *Trudy MAI* [Proceedings MAI]. 2015, no. 82. Available at: http://www.mai.ru/upload/iblock/c2b/lokteva_serdyuk_tarlakovskiy_rus.pdf (accessed 15 October 2015).
- [10] Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, riadov i proizvedenii* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow, Nauka publ., 1971. 1108 p.
- [11] Ivanov V.A., Paimushin V.N. *Utochnennaia postanovka dinamicheskikh zadach trekhslonnykh obolochek s transversal'no-miagkim zapolnitelem chislenno-analiticheskii metod ikh resheniia* [Refined production of dynamic problems of sandwich shells with transversal-soft aggregate numerical-analytical method of solving them]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1995, vol. 36, no. 4, pp. 147–151.
- [12] Ivanov V.A., Paimushin V.N. *Utochnenie uravnenii dinamiki mnogoslonykh obolochek s transversal'no-miagkim zapolnitelem* [Clarification of equations of the dynamics of multi-layer shells with transversally soft filler]. *Izvestiia RAN. MTT* [Mechanics of Solids]. 1995, no. 3, pp. 142–152.
- [13] Abramovits M., Stigan I. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiiam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables]. Moscow, Nauka publ., 1979. 832 p.

Информация об авторах

ЛОКТЕВА Наталья Александровна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопrotивления материалов динамики и прочности машин». Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д.4, А-80, ГСП-3, e-mail: nlok@rambler.ru).

СЕРДЮК Дмитрий Олегович (Москва) — аспирант кафедры «Сопrotивления материалов динамики и прочности машин». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, e-mail: d.serduk55@gmail.com).

ТАРЛАКОВСКИЙ Дмитрий Валентинович (Москва) — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией. Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова (119192, Москва, Российская Федерация, Мичуринский пр-т, 1); зав. кафедрой «Сопrotивления материалов динамики и прочности машин». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, e-mail: tdvhome@mail.ru).

Information about the authors

LOKTEVA Natalia Aleksandrovna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Strength of Materials, Dynamics and Strength of Machines Department. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, A-80, GSP-3, e-mail: nlok@rambler.ru).

SERDYUK Dmitriy Olegovich (Moscow) — Postgraduate, Strength of Materials, Dynamics and Strength of Machines Department. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, A-80, GSP-3, e-mail: d.serduk55@gmail.com).

TARLAKOVSKIY Dmitriy Valentinovich (Moscow) — Doctor of Science (Physics & Math), Head of Laboratory. Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University (119192, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy Prospect, 1); head of Department, Strength of Materials, Dynamics and Strength of Machines. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, A-80, GSP-3, e-mail: tdvhome@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография

**Г.А. Бигуса, Ю.Ф. Даниева, Н.А. Быстровой,
Д.И. Галкина**

«Основы диагностики технических устройств и сооружений»

В монографии приведены основные понятия технической диагностики — области знаний, охватывающей теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Значительное внимание уделено методам неразрушающего контроля, правильное применение которых позволяет получить исходные данные для анализа, проводимого при техническом диагностировании. Изложены элементы теории надежности и методы расчета показателей надежности в приложении к технической диагностике. Рассмотрены вопросы идентификации состояния объекта по измеренным диагностическим параметрам и оценки его ресурса.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru