

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЦЫ ПЕРЕХОДА ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ ПЛАСТИН

Н. Н. Морозова

Для определения колебательных характеристик слоистых пластин может быть использована матрица перехода, связывающая напряжения и смещения на одной поверхности слоя с соответственными величинами на другой [1]:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ V_1 \\ \tau_1 \\ P_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ V_2 \\ \tau_2 \\ P_2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $U_{1,2}$ и $V_{1,2}$ — продольные и поперечные составляющие вектора смещения, $P_{1,2}$ и $\tau_{1,2}$ — нормальные и касательные усилия, прилагаемые к поверхностям слоя. Элементы матрицы, относящиеся к одному слою, будем обозначать a_{ik} , а к совокупности слоев — A_{ik} .

С помощью матрицы перехода могут быть найдены коэффициенты отражения и прохождения для плоской волны, импедансы слоистой пластины Z_{ik} , спектр собственных чисел $k = 2\pi/\lambda$ (λ — длина изгибной волны), изгибная жесткость слоистой пластины B , коэффициент потерь η [1, 2]. Путем соответствующего подбора элементов матрицы можно определять оптимальные характеристики слоистой пластины.

Общие выражения элементов матрицы перехода получены в работе [3], однако они являются столь громоздкими, что оказывается чрезвычайно трудно проанализировать влияние тех или иных параметров на колебательные характеристики слоистых конструкций. В случае тонких пластин, для которых $kh \ll 1$ и $h\omega/c_t \ll 1$ (h — толщина слоя, c_t — скорость поперечных волн), элементы матрицы перехода можно разложить по малым параметрам. В работе [2] для анализа колебательных характеристик слоистых пластин использовалось разложение элементов матрицы (1) с точностью порядка kh . Для получения нормальных волн, соответствующих всем возможным типам колебаний тонких пластин (изгибных и продольных), следует учесть члены разложения порядка $(kh)^3$. В этом случае матрица принимает вид

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 - \frac{\omega^2 h^2 \rho}{2(\lambda + 2\mu)} - \frac{k^2 h^2}{2} \cdot \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{12} &= ikh \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} + i \frac{k\omega^2 h^3 \rho}{3} \left(\frac{\mu}{(\lambda + 2\mu)^2} - \frac{1}{2\mu} \right) + i \frac{k^3 h^3}{6} \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{13} &= \frac{\omega kh^2}{2\mu} \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu}, \quad a_{14} = -i \frac{\omega h}{\lambda + 2\mu} + i \frac{h^3 \omega^3 \rho}{6(\lambda + 2\mu)^2} + i \frac{k^2 h^3 \omega}{6} \cdot \frac{\lambda}{\mu(\lambda + 2\mu)}, \\ a_{21} &= ikh - i \frac{kh^3 \omega^2 \rho}{6} \frac{2\lambda + 3\mu}{\mu(\lambda + 2\mu)} + i \frac{k^3 h^3}{6} \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{22} &= 1 - \frac{\rho h^2 \omega^2}{2\mu} + \frac{k^2 h^2}{2} \frac{3\lambda + 4\mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{23} &= -i\omega \frac{h}{\mu} - i \frac{\omega k^2 h^3}{6\mu} \frac{2\lambda + 3\mu}{\lambda + 2\mu} + i \frac{\omega^3 h^3 \rho}{6\mu^2}, \quad a_{24} = \frac{\omega kh^2}{2\mu} \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{31} &= \frac{kh}{2} \left\{ -\frac{1}{\omega} \left(-\rho h \omega^2 \frac{2(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} + \frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} h k^2 \right) \right\}, \\ a_{32} &= \frac{i}{\omega} \left(-\rho h \omega^2 + \frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} h k^2 \right) + i \frac{\omega^3 h^3 \rho^2}{6\mu} + i \frac{2k^2 h^3 \omega}{3} \mu \left(\frac{\mu \rho}{(\lambda + 2\mu)^2} - \frac{5\rho}{4\mu} \right) + \\ &+ i \frac{k^4 h^3}{3\omega} \frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu}, \quad a_{33} = 1 - \frac{\rho h^2 \omega^2}{2\mu} + \frac{h^2 k^2}{2} \frac{3\lambda + 4\mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{34} &= ikh \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} + i \frac{k h^3 \omega^2 \rho}{3} \left(\frac{\mu}{(\lambda + 2\mu)^2} - \frac{1}{2\mu} \right) + i \frac{k^3 h^3}{6} \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{41} &= -i\rho h \omega + i \frac{k^2 h^3 \rho \omega}{6} \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu} - i \frac{2k^4 h^3}{3\omega} \frac{\mu(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} + i \frac{\omega^3 h^3 \rho^2}{6(\lambda + 2\mu)}, \\ a_{42} &= \frac{kh}{2} \left\{ -\frac{1}{\omega} \left(-\rho h \omega^2 \frac{2(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} + \frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} h k^2 \right) \right\}, \\ a_{43} &= ikh - i \frac{kh^3 \omega^2 \rho}{6\mu} \frac{2\lambda + 3\mu}{\lambda + 2\mu} + i \frac{k^3 h^3}{6} \frac{3\lambda + 4\mu}{\lambda + 2\mu}, \\ a_{44} &= 1 - \frac{h^2 \omega^2 \rho}{2(\lambda + 2\mu)} - \frac{k^2 h^2}{2} \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}. \end{aligned} \quad (2)$$

Чтобы найти матрицу перехода слоистой пластины, получаемую путем перемножения матриц, соответствующих каждому входящему в конструкцию слою, необходимо для каждого слоя задать следующие параметры: толщину слоя h , плотность материала ρ , упругие постоянные Ламэ λ и μ .

Если в многослойных конструкциях встречаются слои, для которых коэффициент Пуассона σ близок к 0,5 (высокополимерные вязкоупругие материалы), матрица перехода для них может быть упрощена. Поскольку $\lambda = 2\mu\sigma / (1 - 2\sigma)$, при $\sigma \rightarrow 0,5$ $\lambda \rightarrow \infty$, и матрица принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= 1 - \frac{k^2 h^2}{2}, \quad a_{12} = ikh - i \frac{k\omega^2 h^3 \rho}{6\mu} + i \frac{k^3 h^3}{2}, \quad a_{13} = \frac{\omega k h^2}{2\mu}, \quad a_{14} = i \frac{\omega k^2 h^3}{6\mu}, \\
 a_{21} &= ikh - i \frac{k h^3 \omega^2 \rho}{3\mu} + i \frac{k^3 h^3}{2}, \quad a_{22} = 1 - \frac{\rho h^2 \omega^2}{2\mu} + \frac{3k^2 h^2}{2}, \\
 a_{23} &= -i \frac{\omega h}{\mu} - i \frac{\omega k^2 h^3}{6\mu^2} + i \frac{\omega^3 h^3 \rho}{6\mu^2}, \quad a_{24} = \frac{\omega k h^2}{2\mu}, \\
 a_{31} &= \frac{k h}{2} \left\{ -\frac{1}{\omega} (-2\rho h \omega^2 + 4\mu h k^2) \right\}, \\
 a_{32} &= \frac{i}{\omega} (-\rho h \omega^2 + 4\mu h k^2) + i \frac{\omega^3 h^3 \rho^2}{3\mu} - i \frac{5k^2 h^3 \omega \rho}{6} + i \frac{4k^4 h^3 \mu}{3\omega}, \\
 a_{33} &= 1 - \frac{\rho h^2 \omega^2}{2\mu} + \frac{3h^2 k^2}{2}, \quad a_{34} = ikh - i \frac{k h^3 \omega^2 \rho}{6\mu} + i \frac{k^3 h^3}{2}, \\
 a_{41} &= -i \rho h \omega + i \frac{k^2 h^3 \rho \omega}{2} - i \frac{2k^4 h^3 \mu}{3\omega}, \quad a_{42} = \frac{k h}{2} \left\{ -\frac{1}{\omega} (-2\rho h \omega^2 + 4\mu h k^2) \right\}, \\
 a_{43} &= ikh - i \frac{k h^3 \omega^2 \rho}{3\mu} + i \frac{k^3 h^3}{2}, \quad a_{44} = 1 - \frac{k^2 h^2}{2}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

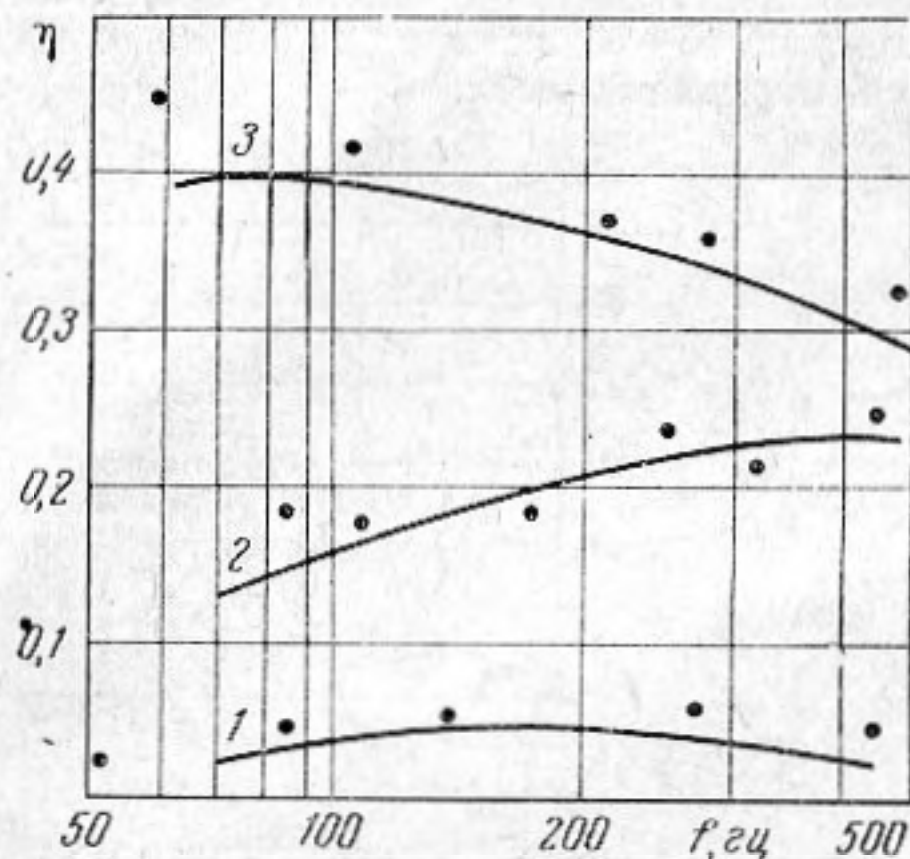
Таким образом, при определении матрицы перехода для вязкоупругого слоя необходимо задавать лишь один упругий параметр — комплексный модуль сдвига μ .

Полученные выражения элементов матрицы перехода с точностью порядка $(kh)^3$ позволяют с помощью ЭВМ определять колебательные характеристики слоистых конструкций и достаточно просто анализировать влияние входящих в матрицу перехода параметров на физические характеристики пластины. Так, например, на ЭВМ «Урал-2» была налажена программа расчета коэффициентов потерь двухслойных и трехслойных пластин с вязкоупругими слоями. Метод определения коэффициента потерь заключается в нахождении комплексных значений волнового числа k путем решения трансцендентного уравнения $Z = 0$. Для слоистой несимметричной пластины в воздухе уравнение $Z = 0$ принимает вид

$$A_{32}A_{41} - A_{31}A_{42} = 0. \tag{4}$$

Расчет коэффициентов потерь матричным методом дал удовлетворительное совпадение с экспериментом. На фигуре сопоставлены расчетные и экспериментальные значения коэффициентов потерь η двухслойной пластины (кривая 1) и двух вариантов трехслойных пластин (кривые 2 и 3). Максимальное отклонение от экспериментальных значений коэффициента потерь составляет 15% и определяется точностью задания параметров матрицы перехода. При расчетах было показано, что изменение коэффициента Пуассона вязкоупругого слоя от 0,45 до 0,5 изменяет расчетное значение коэффициента потерь слоистой пластины на 1%, что подтверждает возможность применения для вязкоупругого слоя матрицы перехода в виде (3). Расчет колебательных характеристик пластин из четырех или более слоев с помощью матрицы перехода в виде (2) и (3) не представляет принципиальных трудностей.

В заключение автор выражает благодарность С. А. Рыбаку за руководство данной работой и Н. П. Жуковой за помощь в проведении расчетов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957, 57—63.
2. С. А. Рыбак, Б. Д. Тартаковский. Некоторые применения матрицы перехода к теории плоских волн в системе упругих слоев. Акуст. ж., 1962, 8, 1, 119—123.
3. W. T. Thomson. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. J. Appl. Phys., 1950, 21, 2, 89—93.

Москва

Поступило в редакцию
31 января 1968 г.

УДК 534.78

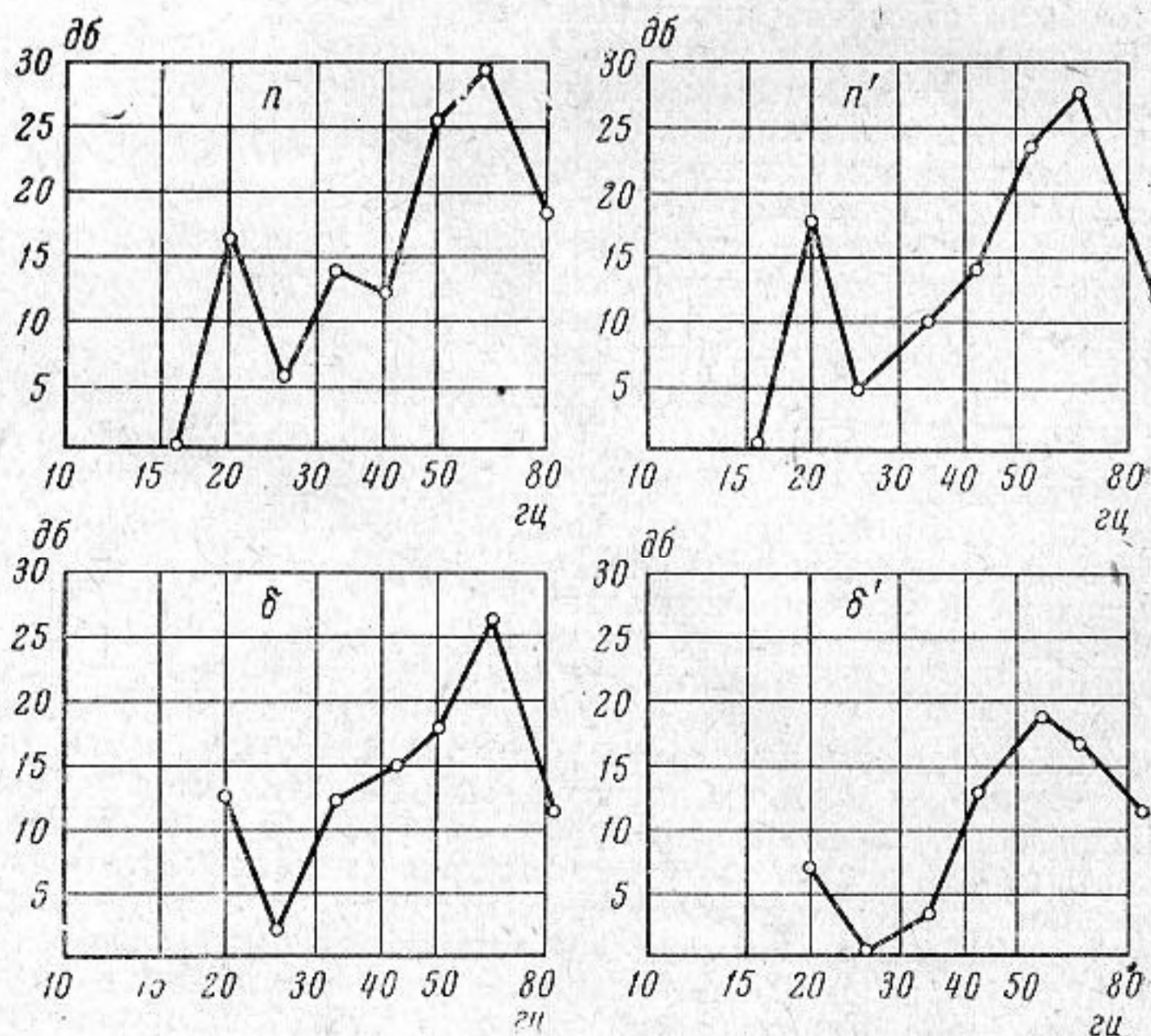
ИНФРАЗВУКОВЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЗВУКОВ РЕЧИ

Л. Л. Мясников, Е. Н. Мясникова, М. Я. Пекельный,
А. И. Трилесник

Во многих задачах технической фонетики, таких, как автоматическое распознавание, членение и синтез звуков речи — существенное значение имеет установление новых физических признаков, которые могут служить для различения звуков. В настоящей работе проведены поиски особенностей звуков речи в инфразвуковом частотном диапазоне, который в этом отношении до сих пор не был исследован.

По техническим причинам (из-за значительного уровня фона инфразвуковых помех и малой интенсивности сигнала) наблюдения в частотном диапазоне от 5 до 12 гц не дали определенных результатов. На более высоких частотах вплоть до 80 гц были обнаружены инфразвуковые компоненты, принадлежащие взрывным (*с*) смычным согласным звукам $n, n', t, t', k, k', b, b', d, d', g, g'$, (штрихи обозначают мягкие палатализованные звуки). В этом диапазоне (12—80 гц) гласные звуки не обладают заметными компонентами. Из двух согласных только шипящие дают слабые низкочастотные составляющие.

Для звуков n, n', t, t' и других взрывных обнаружены составляющие в окрестности 60 гц, а также инфразвуки с частотами около 20 гц. Такие частоты находятся в соответствии со средними продолжительностями шумовых импульсов (взрывов) порядка 15—20 мсек и, вероятно, с переходной областью, продолжительность которой порядка 50 мсек.



Фиг. 1