

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Л. Б. ЛЕРМАН, А. А. ТКАЧЕНКО

СКТБ Института механики НАН Украины, Киев

Получено 30.07.98

Для расчета звукоизоляции и других акустических характеристик плоских элементов конструкций приводятся необходимые соотношения, полученные при решении связанной задачи акустоупругости для слоистых сред. Эти соотношения положены в основу разработанной методики, реализованной в виде конкретных алгоритмов и вычислительных программ. Ее эффективность иллюстрируется примерами расчета акустических характеристик конкретных слоистых стенок, а достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментальными данными, в том числе, и полученными авторами. Приводится пример синтеза слоистой стенки, обеспечивающей заданный уровень звукоизоляции.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе создания конструкций с улучшенными звукоизолирующими и звукопоглощающими свойствами характерно широкое использование слоистых структур. Построение эффективных методов решения возникающей при этом задачи синтеза акустических систем, обладающих требуемыми характеристиками, представляет собой важную прикладную проблему. Задача синтеза фактически является обратной к задаче определения акустических характеристик при прохождении волн через слоистые преграды, и ее решение можно получить на основании решения прямой задачи. В настоящее время в практике проектирования с этой целью, как правило, используются приближенные методы, основанные на использовании закона массы и других упрощенных подходов [1–4]. Соответствующие соотношения, удобные для анализа звукоизоляции тонких экранов, не позволяют достаточно адекватно описать распространение акустических волн в сложных слоистых структурах. Вместе с тем, применение соотношений общей теории распространения волн в слоистых средах [5, 6], как отмечалось в [7], не нашло широкого распространения в инженерной практике. Это обстоятельство связано, с одной стороны, с отсутствием удобных для анализа формул в тех случаях, когда число слоев становится большим двух–трех, а с другой стороны – недоверием практиков к модели, в которой элемент конструкции конечных размеров заменяется бесконечной стенкой, хотя и известно [7], что при определенных ограничениях на волновой размер поправка к звукоизоляции бесконечной пластины

весьма незначительна (в пределах 3 дБ).

В данной статье задача синтеза слоистых структур решается на основе решения задачи акустоупругости для слоистых сред и метода случайного поиска с использованием ЛП-7 последовательностей [8]. Приводятся основные расчетные соотношения, используемые для решения прямой задачи и составляющие основу разработанных алгоритмов и программ. При этом с помощью введения комплексных модулей реализована возможность учета акустических потерь в составляющих слоях. Для оценки достоверности результатов выполняется сравнение расчетных и экспериментальных данных. Так как при измерениях всегда исследуются преграды конечных размеров, то тем самым обосновывается возможность использования модели бесконечной стенки для расчета акустических характеристик пластин конечных размеров (в конкретных частотных диапазонах). Приводятся некоторые результаты численных экспериментов, выполненных с целью выявления определенных закономерностей звукоизоляции слоистых стенок при диффузном звуке. Эффективность разработанного подхода иллюстрируется примером синтеза слоистых стенок, обеспечивающих требуемый уровень звукоизоляции.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Так же, как и в работах [5, 6], рассматриваются две полубесконечные по оси z акустические среды, которым приписываются номера 1 и $n+1$, между которыми находится $n-1$ слоев с номерами 2, 3, ..., n (рис. 1). В направлениях x, y сре-

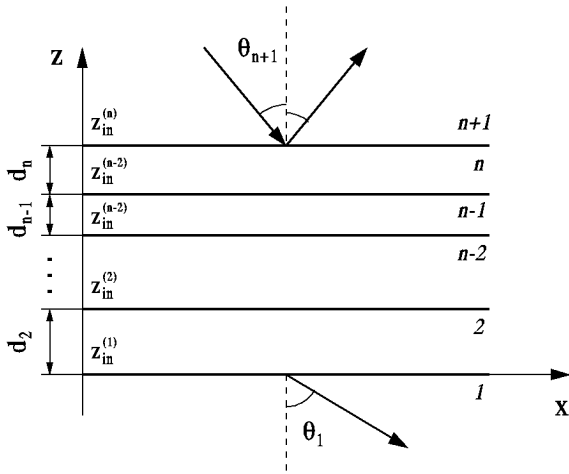


Рис. 1. Схема прохождения плоской звуковой волны через систему плоско-параллельных слоев

ды и слои считаются бесконечно протяженными. Пусть на границу последнего слоя под произвольным углом $\Theta = \Theta_{n+1}$ падает плоская звуковая волна единичной амплитуды с круговой частотой ω , распространяющаяся в плоскости xz . Задача состоит в нахождении амплитуд отраженной волны и волны, прошедшей в среду 1, после чего становится возможным определить все необходимые акустические характеристики.

При рассмотрении данной задачи используют две модели. В первой движение слоев описывается скалярными волновыми уравнениями, когда в каждом из них распространяются только продольные волны (модель слоев “жидкости”). Такая модель, очевидно, имеет ограниченную область применения, однако широко используется на практике в силу своей относительной простоты [1, 2, 4]. Во второй из них для описания движения слоев привлекаются соотношения теории упругости. В этом случае в каждом из слоев распространяется пара продольных волн, (распространяющихся вверх и вниз симметрично по отношению к горизонтальной плоскости) и пара поперечных волн. В нижнем полупространстве возникают только уходящие продольные волны. Различия в результатах, определяемых упомянутыми моделями, возникает при наклонном падении волны, а при нормальном падении, как показано в [5], с помощью предельных переходов из соотношений второй модели можно получить формулы первой. В настоящей работе используются соотношения теории упругости.

Одним из наиболее общих подходов, применя-

емых для решения данной задачи, является импедансный метод [1–3, 5–7]. В этом случае для нахождения необходимых характеристик требуется определить входной импеданс системы слоев. После его нахождения комплексные коэффициенты отражения V и прозрачности W с учетом выражений для импедансов акустических полупространств

$$Z_1 = \rho_1 c_1 / \cos \Theta_1, \tag{1}$$

$$Z_{n+1} = \rho_{n+1} c_{n+1} / \cos \Theta_{n+1},$$

(где ρ_1, ρ_{n+1} – плотности сред, заполняющих нижнее и верхнее полупространства соответственно; c_1, c_{n+1} – скорости звука в этих же средах), могут быть найдены по формулам (i – мнимая единица):

$$V = \frac{Z_{jn}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{jn}^{(n)} + Z_{n+1}}, \tag{2}$$

$$W = (-2i\omega \rho Z_1 / \rho_1) / ((M_{32} - i\omega Z_1 M_{33}) - (M_{22} - i\omega Z_1 M_{23}) i\omega Z_{n+1}). \tag{3}$$

При этом входной импеданс $Z_{jn}^{(n)}$ системы n упругих слоев определяется выражением

$$Z_{jn} = \frac{i(M_{32} - i\omega Z_1 M_{33})}{\omega(M_{22} - i\omega Z_1 M_{23})}. \tag{4}$$

Входящие в формулы (3), (4) величины M_{ij} выражаются через элементы матричного пропагатора A_{ij} [5, 9, 10], связывающего значения неизвестных на границах раздела сред 1 и 2 с их значениями на границе раздела сред n и $n + 1$, с помощью формул [5]

$$M_{jk} = A_{jk} - A_{j1} A_{4k} / A_{41}, \tag{5}$$

$$(j = 2, 3; \quad k = 2, 3, 4).$$

Таким образом, применение данного подхода связано с нахождением элементов матричного пропагатора. Последний представляет собой квадратную матрицу 4×4 , которая выражается через матрицы перехода $A^{(j)}$ для j -го слоя с помощью соотношения

$$A = A^{(n-1)} \dots A^{(3)} A^{(2)}. \tag{6}$$

Достаточно очевидно, что аналитические выражения для элементов матрицы A даже для небольшого числа слоев становятся весьма громоздкими, поэтому элементы матричного пропагатора, в общем случае, находятся численно.

Матрицы перехода, входящие в (6), широко используются при рассмотрении различных задач теории упругости для слоистых тел [5, 6, 9–12]. Эти матрицы определяют связь между произвольными постоянными при переходах через границы раздела слоев, а их конкретный вид зависит от формулировки условий контакта, а также от представления и выбора основных неизвестных при построении решений уравнений теории упругости. В рассматриваемой плоской задаче на границах раздела упругих слоев требуется непрерывность перемещений u_x , u_z , нормального σ_z и касательного τ_{xz} напряжений (условия жесткого контакта). Поэтому наиболее простой вид матрицы получают, если в качестве основных неизвестных выбран так называемый “вектор смещения” [5], составленный из этих же величин. При этом решения уравнений для бесконечных слоев представляются в виде бегущих волн. Аналогичные матрицы построены и для тел конечных размеров (слоистой полосы [11] и диска [12]), однако в этих случаях в виду наличия границ используются представления решений уже в виде стоячих волн.

2. УЧЕТ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В СЛОЯХ И ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

В приведенных соотношениях не учитываются потери энергии в материалах слоев, что особенно важно при определении звукоизоляции стенки. Наиболее общий подход при учете потерь состоит в использовании комплексных модулей упругости слоев [1, 2, 7]. В этом случае скорости, соответствующие волновые числа и постоянные распространения становятся комплексными, однако все расчетные формулы полностью сохраняют свой вид, если ввести в рассмотрение комплексные модули $E = E_d(1 + i\eta)$, где E_d – динамический модуль упругости; η – коэффициент пространственного затухания [2]. Для реальных материалов $\eta \ll 1$, поэтому с высокой степенью точности для нахождения комплексных скоростей можно использовать формулы

$$c_l = c_l^* \quad (l = i, \eta/2),$$

$$c_t = c_t^* \quad (t = i, \eta/2),$$

где c_l^* , c_t^* – действительные скорости (здесь и далее индексы l и t означают, что данная величина соответствует продольной или поперечной волнам), которые выражаются через упругие характеристики с помощью известных соотношений. При этом из закона Снелла формально следует,

что углы преломления всегда будут комплексными. В практических расчетах этого можно избежать, понимая под скоростями в формулах закона Снелла модули соответствующих комплексных величин. Именно такой подход использован в реализованных алгоритмах.

Приведенные в [5] выражения для элементов матрицы перехода $A^{(j)}$ j -го слоя неудобны при машинной реализации. В связи с этим соответствующие формулы были модернизированы с использованием известных соотношений законов Снелла, и для вычисления элементов матрицы $A^{(j)}$ получены следующие соотношения (для простоты записи индекс слоя j в формулах для вычисления элементов a_{km} ($k, m = 1, 2, 3, 4$), плотностей ρ , скоростей c_l , c_t и углов преломления Θ_l , Θ_t опущен):

$$a_{11} = 2 \sin^2 \theta_t \cos P + \cos(2\Theta_t) \cos Q,$$

$$a_{12} = i[(\sin \Theta_l / \cos(2\Theta_t) \sin P - \sin(2\Theta_t) \sin Q],$$

$$a_{13} = i[\sin \Theta_l (\cos Q - \cos P)] / (\omega \rho c_l),$$

$$a_{14} = \sin^2 \Theta_l / (\omega \rho c_l \cos \Theta_l) + \cos \Theta_t \sin Q / (\omega \rho c_t),$$

$$a_{21} = i[2(c_t/c_l) \sin \Theta_t \cos \Theta_l \sin P - (\sin \Theta_t / \cos \Theta_t) \cos(2\Theta_t) \sin Q],$$

$$a_{22} = 2 \sin^2 \Theta_t \cos Q + \cos(2\Theta_t) \cos P,$$

$$a_{23} = \cos \Theta_l \sin P / (\omega \rho c_l) + \sin \Theta_t \sin Q \sin \Theta_l / (\omega \rho c_l \cos \Theta_t),$$

$$a_{24} = a_{13}, \quad a_{33} = a_{22}, \quad a_{34} = a_{12},$$

$$a_{31} = -2i\omega \rho c_t \sin \Theta_t \cos 2\Theta_t (\cos Q - \cos P),$$

$$a_{32} = -\omega \rho c_l \cos^2 2\Theta_t \sin P / \cos \Theta_l - \omega \rho c_t \sin^2 2\theta_t \sin Q / \cos \Theta_t,$$

$$a_{41} = -\omega \rho c_t [(4c_t/c_l) \sin^2 \Theta_t \cos \Theta_l \sin P + \cos^2 2\Theta_t \sin Q / \cos \Theta_t],$$

$$a_{42} = a_{31}, \quad a_{43} = a_{21}, \quad a_{44} = a_{11}.$$

В формулах (7) $P = \alpha_j(z_j - z_{j-1})$, $Q = \beta_j(z_j - z_{j-1})$, где z_j – координаты верхней границы слоя ($j = 2, \dots, n$); α_j , β_j – постоянные пространства, определяемые для каждого слоя соотношениями

$$\alpha_j = \omega \cos \Theta_{lj} / c_{lj},$$

$$\beta_j = \omega \cos \Theta_{tj} / c_{tj}. \tag{8}$$

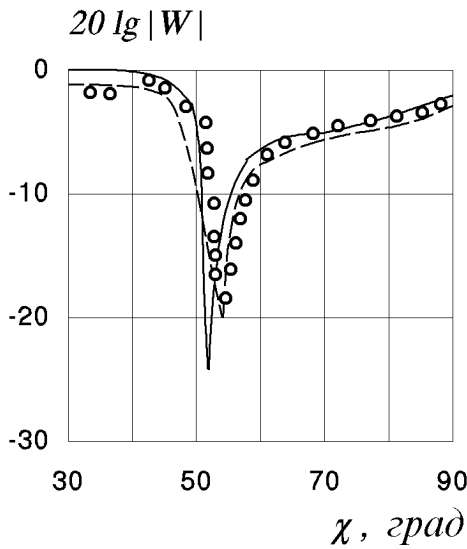


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента прозрачности для пластинки из плексигласа, помещенной в воду, от угла скольжения при $f = 193$ кГц

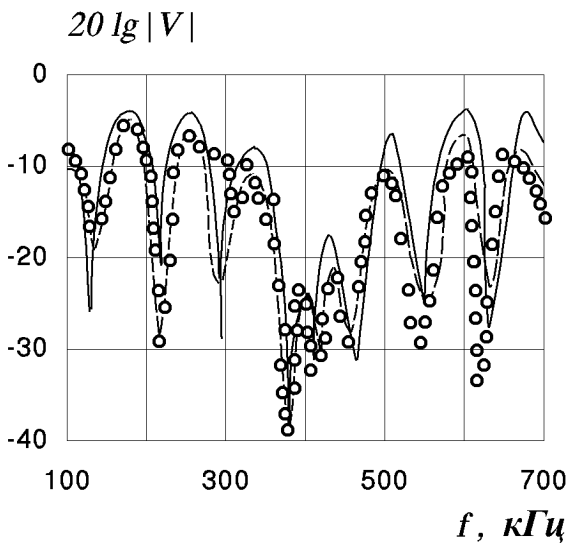


Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения при нормальном падении плоской волны на трехслойную конструкцию, погруженную в воду

При разработке вычислительных алгоритмов, реализующих решение данной задачи, были учтены следующие обстоятельства. Из закона Снелла следует, что если $c_1/c > 1$ и $\sin \theta_l > c/c_1$, то $\sin \theta_l > 1$ и $\sin \theta_l$ оказывается комплексной величиной. В этом случае в [5] рекомендуется использовать переменную ζ , определяемую из равенства $\theta_l = \pi/2 = i\zeta$. Тогда $\sin \theta_l = ch\zeta$, $\cos \theta_l = -ish\zeta$ и соответствующим образом модифицируются фор-

мулы для вычисления углов преломления. Однако если в вычислительных алгоритмах использовать тригонометрические функции комплексного аргумента, то и формулы (7), и соотношения закона Снелла полностью сохраняют свой вид. Такой подход тем более оправдан, что для учета потерь выше в рассмотрение введены комплексные модули упругости и комплексные скорости.

Приведенные в предыдущем разделе соотношения позволяют определить коэффициенты отражения и прозрачности в зависимости от характеристик слоев при фиксированных значениях частоты и угла падения волны. На практике для оценки акустических характеристик изолирующей стенки, а также для сравнения с экспериментальными данными необходимо знание величин, усредненных в полосе частот и диапазонах углов падения волны. Приведем необходимые в этих случаях расчетные формулы для звукоизоляции (остальные характеристики определяются аналогично).

В полосе частот $\Delta f = f_2 - f_1$ средняя звукоизоляция R_f находится методом обычного интегрального усреднения [1]:

$$R_f = 10 \lg \left[\Delta f / \int_{f_1}^{f_2} |W|^2 df \right], \quad (9)$$

где $W = W(f, \theta)$ – комплексный коэффициент прохождения.

При нахождении характеристик диффузного поля, где звук распространяется во всевозможных направлениях, звукоизоляция преграды определяется по формуле [1, 2, 7]

$$R_{dif} = 10 \lg \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} |W|^2 \cos \theta \sin \theta d\theta}, \quad (10)$$

где θ_{lim} – предельный угол падения волны, который на практике берется немного меньшим $\pi/2$. Интегрирование в формулах (9), (10) выполняется численно ввиду весьма сложной зависимости коэффициента прохождения от частоты и углов падения. При этом, как показывают расчеты, с необходимой в инженерной практике точностью, достаточно ограничиться простейшими квадратными или трапециидальными формулами типа формул прямоугольников или трапеций.

3. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЛОИСТЫХ СТЕНОК

На основании приведенных соотношений выполнен ряд расчетов, как с целью проверки правомочности использования разработанных программ, так и с целью выявления некоторых закономерностей звукоизоляции слоистых стенок. Некоторые результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 2–8. На рис. 2 представлена зависимость модуля коэффициента прозрачности для пластинки из плексигласа ($c_l = 2650$ м/с, $c_t = 1160$ м/с, $d = 0.325$ см, $\rho = 1.19$ г/см³), помещенной в воду, от угла скольжения $\chi = \pi/2 - \rho$ для плоской волны с частотой 193 кГц, а на рис. 3 – зависимость модуля коэффициента отражения от частоты при нормальном падении плоской волны на трехслойную конструкцию, помещенную в воду. Конструкция состояла из двух одинаковых слоев пластмасы с параметрами $c_l = 2100$ м/с, $\rho = 1.08$ г/см³, $d_2 = d_4 = 0.254$ см, щель между которыми размером $d_3 = 0.706$ см была заполнена водой ($c = 1500$ м/с, $\rho = 1.0$ г/см³). В последнем случае сдвиговые волны не возникают, и результаты расчетов по первой и второй моделям, упомянутых в разделе 2, совпадают. На рис. 2, 3 сплошными линиями показаны результаты расчета, приведенные в [5], штриховыми – результаты расчета по предлагаемой методике, кружочками отмечены экспериментальные результаты, заимствованные из [5].

На рис. 3 четко проявляются эффекты интерференции волн, отраженных на отдельных границах. Они ответственны в частности за повторяющиеся после 126 кГц через каждые 84 кГц максимумы коэффициента отражения. В целом наблюдается вполне удовлетворительное соответствие между расчетными кривыми и экспериментальными данными, а также между результатами, приведенными в [5], и полученными с помощью разработанных алгоритмов. Как отмечалось в [5], наблюдаемые расхождения между расчетными и экспериментальными данными в первую очередь объясняются погрешностью задания скорости поперечных волн, к значению которой коэффициенты отражения и прозрачности оказываются весьма чувствительными (при некоторых значениях угла скольжения наблюдается изменение модуля коэффициента прозрачности на 10 дБ и больше), а также сложностью моделирования в эксперименте плоской монохроматической волны. Приведенные результаты подтверждают достоверность используемой методики и разработанных вычисли-

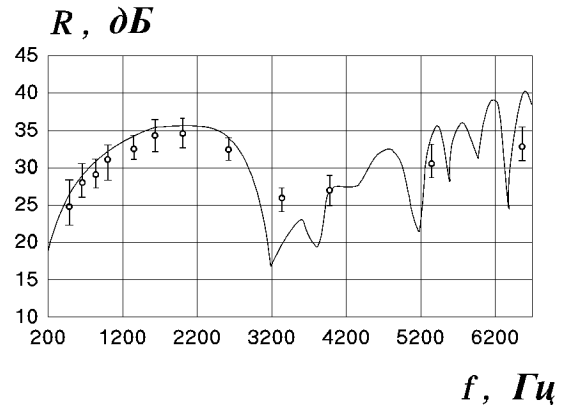


Рис. 4. Частотная зависимость звукоизоляции для дюралевой пластины толщиной 4 мм

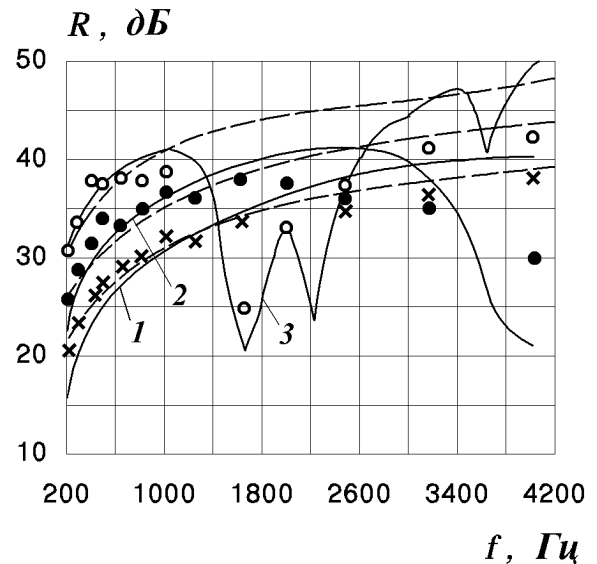


Рис. 5. Частотные зависимости звукоизоляции для стальных пластин различной толщины при угле диффузности 80°

тельных алгоритмов для фиксированных значений углов падения и частоты.

Для оценки достоверности получаемых результатов в случае диффузного звука использованы некоторые экспериментальные данные, приведенные в [2]. Расчетные (сплошные кривые) и экспериментальные зависимости звукоизоляции от частоты приведены на рис. 4, 5: на рис. 4 для дюралевой пластины толщиной 4 мм (возле каждой экспериментальной точки показан диапазон погрешности измерений), а на рис. 5 – для стальных пластин различной толщины (цифрами 1, 2, 3 обозначены результаты, соответствующие значениям толщины 1.5, 3.0 и 7.0 мм соответствен-

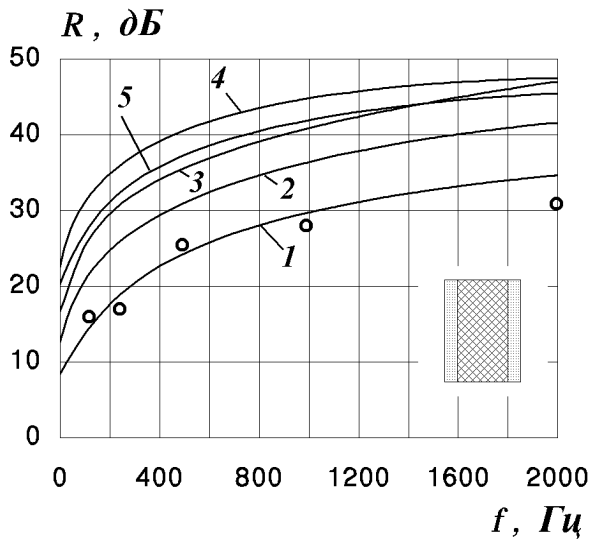


Рис. 6. Влияние наружных слоев на звукоизоляцию трехслойной симметричной структуры

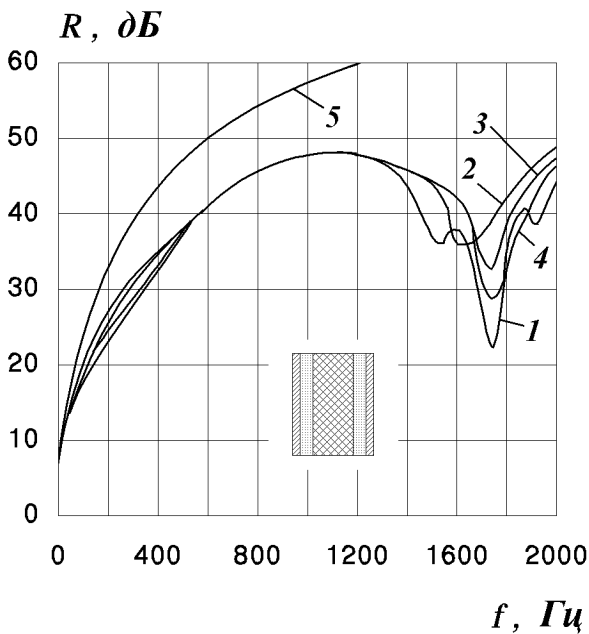


Рис. 7. Влияние внутреннего слоя на звукоизоляцию многослойной симметричной структуры

но). Для дюралюминия при расчетах были приняты следующие значения параметров: $\rho = 2.8 \text{ г/см}^3$, $E = 72.8 \text{ МПа}$, $\nu = 0.33$; потери учитывались с помощью комплексного модуля упругости при коэффициенте потерь, равном 0.0004. Для стальных пластин потери не учитывались и принимались следующие значения остальных параметров: $\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$, $E = 210 \text{ МПа}$, $\nu = 0.3$. В первом слу-

чае угол диффузности звука был принят равным 80° , а во втором – 86° . Из представленных результатов следует, что и в случае диффузного звука расчетные данные согласуются с экспериментальными значениями. Некоторое отличие можно объяснить тем, что в принятой модели не учитываются конечные размеры пластин, а также тем, что предельные углы диффузности звука для различных диапазонов частот могут несколько отличаться, так как зависят от размеров источника звука, размещения и конструкции измерительной камеры.

Достигнутое совпадение расчетных и экспериментальных данных позволило провести численные эксперименты для оценки влияния некоторых параметров на звукоизоляцию слоистых стенок. В частности, результаты, показанные на рис. 6, позволяют проследить зависимость звукоизоляции слоистой стенки от толщины наружных слоев, на рис. 7 – влияние плотности среднего слоя (скорости продольных волн), а на рис. 8 – влияние потерь в звукопоглощающем слое на изоляцию слоистой структуры в целом. В первом случае рассматривалась трехслойная стенка с наполнителем из пенопласта и несущими слоями из фанеры (кривые 1–3 на рис. 6 для толщин фанеры 1.5 мм, 5 мм и 10 мм соответственно при толщине пенопласта 22 мм и кривая 4 для фанеры толщиной 10 мм и слоя пенопласта в 50 мм) и из стали толщиной 1.5 мм при толщине пенопласта 50 мм (кривая 5). Кружками показаны экспериментальные значения, заимствованные из [1]. Во втором случае рассматривалась пятислойная стенка симметричного строения с наружными слоями из алюминия (1 мм), примыкающих слоев березовой фанеры (10 мм) и средним слоем пенопласта, толщиной 100 мм. Цифрами 1–5 на рис. 7 обозначены кривые, построенные для различных значений отношения E/ρ пенопласта, равных 4.4, 2.4, 1.3, 0.67 и 44 МПа·м³/кг соответственно. В третьем случае также рассматривалась пятислойная стенка, составленная из стальных наружных слоев, толщиной 2 мм, и двух внутренних слоев хлоропренового каучука ($\rho = 1.3 \text{ г/см}^3$, $E = 4.0 \text{ МПа}$, $\nu = 0.5$), толщиной 10 мм с воздушным зазором между плотными слоями в 50 мм. Цифрами 1–3 обозначены кривые, полученные при значениях коэффициента потерь в каучуке, равном 0, 0.1 и 0.2 соответственно. Во всех расчетах угол диффузности принимался равным 80° и расчеты проводились в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц.

Из представленных данных, в частности, следует, что для трехслойной стенки кривые звукоизоляции имеют монотонный характер, и с ро-

стом толщины наружных слоев звукоизоляция повышается во всем рассмотренном диапазоне частот. Нетрудно заметить, что в данном случае с высокой точностью выполняется закон массы. Анализ влияния свойств промежуточного слоя на звукоизоляцию пятислойной структуры показывает, что в области высоких частот имеют место весьма значительные провалы звукоизоляции, которые не компенсируются учетом потерь, однако для более жестких заполнителей (кривая 5 на рис. 7) эти провалы исчезают, и качественно зависимость звукоизоляции от частоты пятислойной стенки повторяет аналогичную зависимость для трехслойной структуры. Для пятислойной структуры другого типа (кривые на рис. 8) наличие потерь в промежуточных слоях существенно изменяет звукоизоляцию, начиная с области средних частот (800–1000 Гц). По сравнению с кривой 1 (без потерь) в области 1900 Гц полностью убирается резонансный минимум для обоих значений коэффициента потерь, причем при увеличении коэффициента потерь вдвое звукоизоляция, начиная с 1200 Гц, увеличивается в среднем на 20 дБ. Вместе с тем в области низких частот (от 20 Гц до 400 Гц) учет потерь практически не изменяет кривых звукоизоляции, для которых характерно наличие нескольких резонансных минимумов.

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СЛОИСТЫХ СТЕНОК

Задача выбора структуры звукоизолирующей стенки с определенными акустическими и физико-механическими свойствами относится к классу многокритериальных оптимизационных задач для функций с многими переменными и ее решение связано с серьезными трудностями [8, 13]. Вместе с тем, практический интерес представляет не столько отыскание глобального экстремума, сколько нахождение классов структур, обладающих требуемыми свойствами. Поэтому к решению данной задачи можно подойти следующим образом.

Накладываемые ограничения задаются обычно в виде системы неравенств, решения которых определяют некоторую область (области) в N -мерном пространстве (N – число переменных) допустимых значений параметров. Для отыскания ее границ ввиду большой размерности задачи целесообразно использовать метод случайного поиска, причем объемы вычислений удается существенно сократить, используя вместо обычных случайных чисел так называемые ЛП-7 последовательности [8]. В процессе вычислений од-

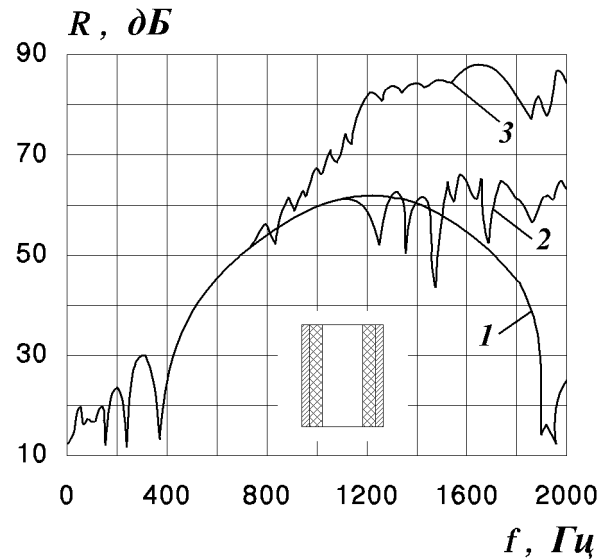


Рис. 8. Влияние потерь звукопоглощения на звукоизоляцию пятислойной структуры с воздушным зазором

новременно находятся и значения функций, подлежащих оптимизации, поэтому, получив набор допустимых значений, уже нетрудно выбрать те из них, которые доставляют экстремальные значения. Такой подход позволяет, в принципе, подобрать конструкцию стенки, удовлетворяющей заданным ограничениям и обладающей дополнительными экстремальными свойствами, например, минимальной массой, максимальной жесткостью и т. п. В простых случаях конструкционные материалы слоев можно выбрать заранее, например, на основе результатов, полученных в [13]. Так как при этом значения физико-механических характеристик фиксируются, то тем самым уменьшается размерность задачи и объемы вычислений существенно сокращаются.

Эффективность реализованного подхода удобно продемонстрировать на конкретном примере синтеза стенки в выбранном классе материалов. С этой целью рассматривалась трехслойная стенка с несущими слоями из алюминия и березовой фанеры (слои 1 и 3) с заполнителем из пенопласта типа ПХВ (слой 2). В качестве основного ограничения – критерия, характеризующего структуру стенки, принималось значение средней звукоизоляции для диффузного звука в некоторых диапазонах частот и отыскивалась структура минимальной массы.

Поиск оптимальной структуры стенки осуществлялся в области изменения допустимых размеров слоев от 0 до 4 мм, от 50 мм до 100 мм и от 0

Табл. 1. Средняя звукоизоляция в диапазоне частот от 40 до 2000 Гц

Значение $R_{ср}$, дБ	Толщина слоя, мм			Общая толщина, мм	Масса 1 м^2 , кг
	1	2	3		
39.9	3.13	89.1	13.1	105	26.5
39.3	3.81	93.0	7.81	105	24.4
39.3	2.31	86.7	15.3	104	25.9
39.6	2.56	96.1	11.6	110	24.3
39.6	2.75	90.6	16.2	110	28.1
39.8	2.50	96.9	13.7	111	19.9
39.8	6.25	99.8	19.1	109	23.1
39.9	3.44	97.7	18.4	120	32.3
40.0	1.63	95.3	15.6	113	25.0

Табл. 2. Средняя звукоизоляция в диапазоне частот от 40 до 1000 Гц

Значение $R_{ср}$, дБ	Толщина слоя, мм			Общая толщина, мм	Масса 1 м^2 , кг
	1	2	3		
31.5	3.69	82.0	14.7	100	28.7
31.6	3.81	93.0	7.81	105	24.4
31.6	0.63	89.8	19.1	109	23.1
31.7	3.13	89.1	13.1	105	26.5
31.9	2.56	96.1	11.6	110	24.3
31.9	3.88	79.7	19.4	103	32.7
32.1	1.63	95.3	15.6	113	25.0
32.2	2.75	90.6	16.2	110	28.1
33.4	3.44	97.7	18.4	120	32.3

Табл. 3. Средняя звукоизоляция в диапазоне частот от 1000 до 2000 Гц

Значение $R_{ср}$, дБ	Толщина слоя, мм			Общая толщина, мм	Масса 1 м^2 , кг
	1	2	3		
46.9	1.94	91.4	10.9	104	21.8
46.9	2.75	90.6	11.0	110	28.1
46.9	0.69	94.5	9.7	105	17.6
46.9	2.38	98.4	6.9	108	20.3
47.0	2.56	96.1	11.6	110	24.3
47.3	0.56	81.3	17.5	99	22.3
47.6	1.63	95.3	15.6	113	25.0
47.7	0.07	89.2	19.1	109	23.1
47.9	0.25	96.2	13.7	111	19.9

до 20 мм для алюминия, пенопласта и фанеры соответственно в диапазоне частот от 40 до 2000 Гц. Независимо поиск производился для низкочастотного (от 40 до 1000 Гц) и высокочастотного (от 1000 до 2000 Гц) участков данного диапазона.

Результаты расчетов по выбору лучших (с точки зрения звукоизоляции) структур приведены в табл. 1–3. Из приведенных результатов прежде всего следует, что примерно одну и ту же среднюю звукоизоляцию в состоянии обеспечить стенки совершенно различного строения, весьма существенно различающиеся по массе. В то же время для различных участков рассмотренного частотного диапазона наилучшую звукоизоляцию обеспечивают стенки различной структуры. При этом обращает на себя внимание тот факт, что в диапазоне до 1000 Гц лучшие варианты связаны с присутствием в структуре относительно толстых слоев алюминия, в то время как для более высоких частот эффективным оказывается применение и более тонких слоев. Вместе с тем имеются варианты, присутствующие во всех таблицах. Таким образом, обеспечить средний уровень звукоизоляции диффузного звука около 40 дБ во всем заданном диапазоне оказывается возможным стенкой с минимальной массой 19.9 кг/м^2 (см. табл. 1).

Разработанная методика также была использована при проектировании слоистого экрана, предназначенного для защиты человека от воздействия электромагнитных и акустических излучений в широком диапазоне частот (часть структуры в данном случае задавалась заранее, так как она обеспечивала электромагнитные свойства).

На рис. 9 приведены результаты расчетного и экспериментального определения звукоизоляции найденной структуры несимметричного строения, состоящей из шести слоев различных материалов (алюминий, линолеум, звукопоглощающий материал типа БЗМ, фанера, войлок и декоративный слой типа кожезаменителя). Сплошной кривой показаны результаты расчета, а кружками показаны экспериментально измеренные значения. Испытания проводились по стандартной методике [2] в безэховой камере, и приведенные экспериментальные значения соответствуют усредненным по трем измерениям данным. Из этих данных следует, что в данной конкретной конструкции достигнут весьма высокий уровень средней звукоизоляции в широком диапазоне частот (свыше 35 дБ, начиная с 200 Гц), причем расчетные значения подтверждены экспериментальными измерениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенное выше позволяет заключить, что разработанные подходы позволяют практически осуществить решение задачи синтеза слоистых стенок, обеспечивающих определенный уровень звукоизоляции при одновременном обеспечении некоторых дополнительных свойств. Результаты выполненных численных экспериментов показывают, что правильное описание процесса прохождения акустических волн в слоистых структурах возможно получить только при учете их дискретного строения. При этом проведенное сравнение с экспериментальными данными показывает, что в данном случае оказывается достаточным ограничиться моделью бесконечно протяженных слоев. Вместе с тем следует иметь в виду, что для возможности использования полученных результатов при оценке акустических характеристик слоистых стенок конечных размеров при распространении звука в замкнутых объемах необходимы дополнительные исследования.

1. *Авиационная акустика. В 2-х частях. Часть 2. Шум в салонах самолетов* / Мунин А. Г., Ефимцов Б. М., Кудисова Л. Я. и др. Ред. А. Г. Мунина. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.
2. *Боголепов И. И. Промышленная звукоизоляция.* – Л.: Судостроение, 1986. – 368 с.
3. *Борьба с шумом на производстве. Справочник* / Ред. Е. Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
4. *Самойлюк Е. П., Сафонов В. В. Борьба с шумом и вибрацией в промышленности.* – К.: Вища школа, 1990. – 167 с.
5. *Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред.* – М.: Наука, 1989. – 416 с.
6. *Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики.* – Л.: Судостроение, 1972. – 349 с.
7. *Борисов Л. П., Гужас Д. Р. Звукоизоляция в промышленности.* – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
8. *Соболь И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями.* – М.: Наука, 1981. – 111 с.
9. *Фокин А. В. К расчету матричным методом характеристик термоупругого акустического возмущения, возбуждаемого в слоистой среде источником тепла* // Акуст. ж. – 1998. – 44, N 4. – P. 538–547.
10. *Bozoki Z., Miklos A., Glorieux C., Troen J., Bicanic D. Modelling of thermo-elastic response of composite media by a transfer matrix approach* // J. De Physique IV. – 1994. – Colloque C7. Suppl. III, 4. – P. C7-579–C7-582.
11. *Лерман Л. Б. Применение уравнений плоской задачи теории упругости к исследованию колебаний протяженных слоистых плит с внутренними линейными опорами* // Прикл. мех. – 1994. – 30, N 6. – С. 66–69.
12. *Bottega W. J. An axisymmetric solution for the transient problem of a multilayered elastic solid of finite extent* // Mech. research communicat. – 1988. – 15, N 1. – P. 11–20.
13. *Гусев Е. А. Качественные закономерности оптимальной структуры конструкций в задачах оптимального синтеза акустических систем* // Акуст. ж. – 1997. – 43, N 5. – С. 705–708.

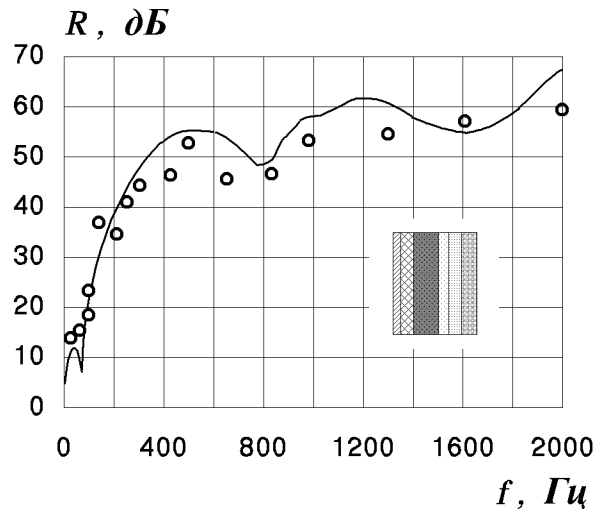


Рис. 9. Результаты расчетного и экспериментального определения звукоизоляции несимметричной шестислойной структуры