

Л. Р. Яблоник

ОАО «НПО ЦКТИ»

Россия, 191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, 3/6, e-mail: shum11@ckti.ru

Моделирование акустических свойств диссипативных шумоглушителей

Получена 24.02.2009, опубликована 07.04.2009

Акустические параметры шумоглушителя рассматриваются на базе модельной задачи распространения звука в области, заполненной двумя средами. Первая среда – идеальная сжимаемая жидкость с плотностью ρ и скоростью звука c ; вторая – звукопоглощающий материал (ЗПМ), акустические свойства которого определяются удельным сопротивлением продуванию r . Соответственно, безразмерная частотная характеристика эффективности шумоглушителя при заданной геометрии оказывается зависящей лишь от отношения линейного размера конструкции к характерному масштабу $L = \rho c / r$. В рамках данного подхода построены универсальные расчетные характеристики эффективности протяженных диссипативных пластинчатых глушителей с волокнистым ЗПМ. Выполнен анализ двухпараметрической модели, учитывающей влияние отношения ширины канала к толщине звукопоглощающей панели. Показано, что в ряде случаев возможно использование однопараметрической модели, устанавливающей зависимость безразмерной частотной характеристики от ширины канала при больших толщинах панелей. Применительно к последнему случаю выполнены систематические расчеты как для сотовой, так и для изотропной упаковки ЗПМ в панелях шумоглушителя.

ВВЕДЕНИЕ

Звукоизолирующее действие диссипативных глушителей шума определяется эффектами вязкого поглощения звуковых колебаний в микроканалах звукопоглощающего материала (ЗПМ), ограничивающего тракты прохождения рабочей среды. Значительное распространение получили так называемые пластинчатые шумоглушители [1], в которых ЗПМ размещается в плоских панелях (пластинах), разделяющих рабочий тракт на относительно узкие щелевые каналы. В каналах круглой формы используются также звукопоглощающие кольцевые кассеты.

В инженерной практике выбор конструкции диссипативного шумоглушителя основывается обычно на результатах прямых экспериментальных или расчетных исследований. При этом зачастую вне поля зрения разработчиков остаются важные общие закономерности, связывающие основные параметры конструкции с показателями ее акустической эффективности. Это существенно сужает возможности оперативного предварительного отбора ЗПМ и рабочих схем шумоглушения, в

особенности нужного для больших энергетических шумоглушителей, которые реализуются в двух- и трехступенчатом исполнении.

Необходимые общие соотношения между показателями эффективности и определяющими параметрами конструкции могут быть почерпнуты из приближенных универсальных зависимостей, базирующихся на упрощенных модельных представлениях о процессах распространения звука в элементах шумоглушителя. Задача построения такого рода представлений и зависимостей рассматривается в данной работе.

1. БАЗОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

1.1. Акустика канала

В задачах, связанных с акустическим расчетом пластинчатых шумоглушителей, наибольшую известность получила модель Морса [2], представляющая распространение звука в бесконечном плоском прямом канале постоянной ширины $2H$, ограниченном звукопоглощающими стенками.

Модель [2] основывается на рассмотрении решений уравнения Гельмгольца

$$\Delta\varphi + \frac{\omega^2}{c^2}\varphi = 0 \quad (1)$$

(где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; c — скорость звука в рабочей среде; f — частота) с представлением потенциала скорости φ в форме

$$\varphi = A \cos(\mu y) \cdot e^{-\Gamma x}, \quad (2)$$

где x, y — координаты, направленные вдоль оси канала и по нормали к стенкам соответственно. Параметры μ и Γ удовлетворяют, вследствие (1), равенству

$$\mu^2 - \Gamma^2 = (\omega/c)^2 \equiv k^2. \quad (3)$$

Граничное условие на стенках при $y = \pm H$ приводит в рамках данной модели к дисперсионному уравнению

$$\frac{ctg(\mu_H)}{\mu_H} = -i \frac{z_m}{\rho\omega H} \equiv -i\zeta, \quad (4)$$

где $\mu_H \equiv \mu \cdot H$; z_m — импеданс звукопоглощающей облицовки канала глушителя. При этом, ввиду равенства (2), эффективность достаточно протяженного шумоглушителя определяется значениями корней уравнения (4) по переменной μ_H с наименьшей положительной действительной частью.

Частотно-волновые свойства импеданса z_m зависят от геометрии и физических свойств элементов звукопоглощающей облицовки, формирующей стенки канала. В технических устройствах облицовка как правило включает в себя непосредственно примыкающие к стенке листы перфорированного экрана и защитной ткани, а также слой звукопоглощающего материала. В ряде случаев, при использовании достаточно

тонкой защитной ткани и высокой степени перфорации, защитный слой можно считать звукопрозрачным. При этом частотно-волновые свойства импеданса z_m определяются лишь геометрией и физическими свойствами слоя ЗПМ.

1.2. Акустика звукопоглощающей панели

Применительно к рассматриваемой задаче будем рассматривать ЗПМ как однородную изотропную среду, акустические свойства которой характеризуются зависящими от частоты комплексными функциями постоянной распространения $\gamma = i(\omega/c^*)$ (c^* — комплексная скорость звука в материале) и волнового сопротивления W .

Волновое движение в ЗПМ, как и в классической жидкости, определяется уравнением Гельмгольца

$$\Delta\psi - \gamma^2\psi = 0 \quad (1a)$$

для потенциала ψ , связанного с амплитудой p звукового давления равенством

$$p = -\gamma W\psi. \quad (5)$$

Конкретный вид частотных зависимостей γ и W определяется физической структурой ЗПМ, которая, в свою очередь, моделируется набором характерных параметров пористой среды [3]. При этом для случая волокнистых материалов основным, и зачастую единственным, размерным характерным параметром среды служит удельное сопротивление продуванию r , определяемое как перепад давлений, требуемый для продувания слоя материала единичной толщины с единичной среднерасходной скоростью. В последнем случае соображения подобия и размерностей приводят к возможности представления приведенных характеристик γ/k и $W/\rho c$ в виде функции безразмерной частоты $\rho f/r$.

Величина параметра r меняется для различных волокнистых ЗПМ в широких пределах [4] — от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$ кг/м³с.

В дальнейших расчетах для представления параметров γ и W будем использовать обобщенные эмпирические соотношения [5], которые, несмотря на некоторые поправки [6], остаются, в силу своей простоты, наиболее употребительными при оценках эффективности элементов звукопоглощающих конструкций. Согласно этим соотношениям

$$\gamma/k = 0,189(\rho f/r)^{-0,595} + i \cdot [1 + 0,0978(\rho f/r)^{-0,700}]; \quad (6)$$

$$W/\rho c = [1 + 0,0571(\rho f/r)^{-0,754}] - i \cdot 0,0870(\rho f/r)^{-0,732}. \quad (7)$$

Импедансная модель стенки предполагает, что значения импеданса z_m не зависят от волновой структуры звукового поля в канале, и, соответственно, от параметра μ_H в левой части уравнения (4). Такое представление приблизительно соответствует сотовой упаковке ЗПМ. Принимается, что ориентация сот такова, что звуковые волны в

поглотителе могут распространяться лишь по нормали к стенкам канала. При этом характерный размер нормально ориентированной сотовой ячейки панели шумоглушителя должен быть достаточно мал по сравнению с длиной волны.

В рамках данной модели величина импеданса z_m в правой части (4) рассчитывается обычно [1] в предположении, что звуковые волны в слое ЗПМ испытывают полное отражение на глубине, равной полутолщине звукопоглощающей панели шумоглушителя. Такой подход формально оправдан в тех случаях, когда в осевой плоскости панели располагается тонкая жесткая пластина или в соседнем параллельном канале распространяется идентичная волна, взаимодействие с которой приводит к отражению от осевой плоскости.

Выражение для импеданса z_m в таком случае имеет вид:

$$z_m = W \operatorname{cth}(\gamma B), \quad (8)$$

где B — полутолщина панели шумоглушителя.

2. ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛУШИТЕЛЯ

2.1. Предварительный анализ

С учетом последних равенств соотношение (4) нетрудно преобразовать к виду:

$$\frac{\operatorname{ctg} \mu_H}{\mu_H} = -i w(\phi) \frac{\operatorname{cth}[\phi \cdot g(\phi) \cdot \beta]}{\phi \cdot \alpha} \equiv -i \zeta(\alpha, \beta, \phi). \quad (9)$$

Здесь

$$\phi = \rho f / r \quad (10)$$

— безразмерная частота; функции $g(\phi) = \gamma / k$ и $w(\phi) = W / \rho c$ представляются правыми частями равенств (6) и (7) соответственно. Параметры

$$\alpha = (2\pi r / \rho c) H; \quad (11)$$

$$\beta = (2\pi r / \rho c) B \quad (12)$$

характеризуют соответственно безразмерные значения ширины канала и толщины звукопоглощающей панели.

Как известно [3], в случае уравнения (4, 9) с независимой от переменной μ_H правой частью, корень, соответствующий минимальному затуханию, всегда находится на одном из первых двух листов многолистной функции $\operatorname{ctg} \mu_H / \mu_H$. При этом максимальные значения действительной части искомого аргумента в этой области достигаются в точке ветвления, в которой сшиты первый и второй лист рассматриваемой функции. Ввиду (3), данная точка соответствует, при заданной величине $k = \omega / c$, максимальной величине действительной части параметра $\Gamma_H = \Gamma \cdot H$ и, следовательно, наибольшей скорости поглощения распространяемого звука на расстояниях, отнесенных к ширине канала. Значение $\zeta = \zeta_c$ рассматриваемой

функции в точке ветвления (будем называть его здесь критическим импедансом) составляет примерно $\zeta_c = 0,296 - 0,237i$.

Следовательно, естественно ожидать, что наибольшие пиковые значения эффективности шумоглушителей для различных значений безразмерных параметров α и β в (9) должны наблюдаться на тех частотах, на которых частотная характеристика приведенного импеданса $\zeta(\alpha, \beta, \phi)$, представленного правой частью (9), наиболее близко приближается к критическому импедансу.

На рис. 1 показаны значения приведенного импеданса для двух типовых схем пластинчатых шумоглушителей: когда ширина канала равна толщине звукопоглощающей панели ($\alpha = \beta$, рис. 1а) и когда ширина канала в два раза меньше толщины панели ($\alpha = \beta/2$, рис. 1б). Диапазон расчетных значений безразмерной частоты — от $2 \cdot 10^{-4}$ до 10 — выбран применительно к звуковому диапазону частот с реальными значениями сопротивления продуванию r . Рассмотренный диапазон значений параметра β соответствует толщинам пластин примерно от 100 мм до 500 мм при указанных величинах параметра r .

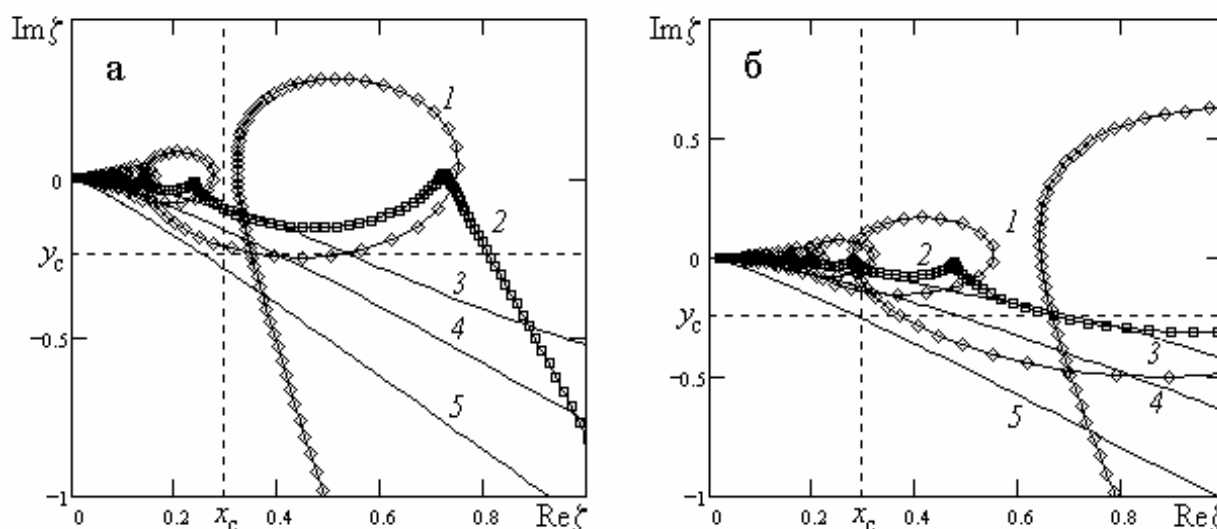


Рис. 1. Карта частотных кривых приведенного импеданса при различных относительных толщинах β звукопоглощающей панели. Варианты: а — $\alpha = \beta$; б — $\alpha = \beta/2$.

Значения β : 1 — 3,08; 2 — 10,7; 3 — 37,0; 4 — 128; 5 — 1540.

Величины x_c и y_c представляют соответственно действительную и мнимую часть критического импеданса ζ_c

В соответствии с формулой правой части (9), во всех случаях при увеличении безразмерной частоты ϕ величина приведенного импеданса стремится к нулю, проходя при этом в относительной близости от критической точки. При этом, как видно из рис. 1, при небольших значениях β параметрическая зависимость $\text{Im}(\zeta)$ от $\text{Re}(\zeta)$ имеет петлеобразный характер, так что в этом случае возможно двух- и более кратное

приближение к критическому импедансу. При значениях β , превышающих $\beta = 10$, кривая $\text{Im}(\zeta)$ от $\text{Re}(\zeta)$ не имеет самопересечений и приближается к точке ζ_c однократно.

Таким образом, из диаграмм рис. 1 следует, что при относительно тонких панелях и малых сопротивлениях продуванию звукопоглощающего материала частотная характеристика шумоглушения может иметь два и более максимумов. Данный эффект может трактоваться в данном случае как проявление резонансных звуковых колебаний поперек слоя ЗПМ. С увеличением толщин и сопротивлений r и соответствующего роста затухания указанных колебаний повышенная эффективность шумоглушения должна обнаруживаться в окрестности лишь одной частоты.

2.2. Результаты расчетов

Численные расчеты корней уравнения (9) с наименьшей положительной действительной частью, выполненные по специально разработанной итерационной схеме, подтверждают представленные выше выводы предварительного рассмотрения.

Результаты расчетов значений параметра звукопоглощения $\Gamma_H = \Gamma \cdot H$ на основании соотношения (9) с учетом равенства (3) приведены на рис. 2. Расчетные кривые показывают снижение пиковой частоты и уровня максимального показателя звукопоглощения по мере увеличения толщины панели и соответствующей ширины канала.

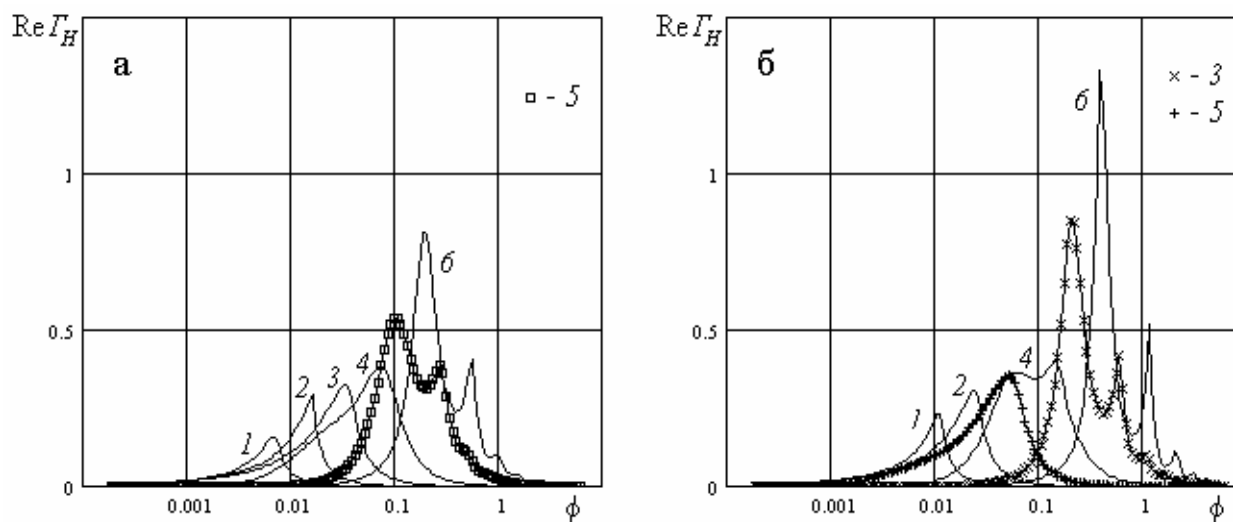


Рис. 2. Частотные характеристики затухания звука при различных относительных толщинах β звукопоглощающей панели. Сотовый каркас.

Варианты: а — $\alpha = \beta$; б — $\alpha = \beta/2$.

Значения β : 1 — 1540; 2 — 444; 3 — 128; 4 — 37,0; 5 — 10,7; 6 — 5,73.

Расчет по уравнению (9)

При относительно малых значениях параметра β наблюдается несколько локальных максимумов на частотной характеристике затухания, наивысший из которых связан с наименьшей из пиковых частот. С увеличением толщины панели преобладающим, а затем единственным, становится соседний, следующий по частоте максимум частотной характеристики затухания.

Область параметров, в которой соседствуют два примерно равновеликих максимума, представляет определенный прикладной интерес, поскольку характеризуется наиболее широким частотным диапазоном значительного затухания звука.

Результаты выполненных расчетов показывают, рис. 3, что, несмотря на заметное различие частотных характеристик, соответствующих разным значениям безразмерной толщины панели β , значения приведенных частот ϕ_m максимального пика звукопоглощения практически зависят лишь от относительной ширины канала α во всем рассмотренном диапазоне параметров.

При этом необходимо отметить, что существование дополнительных максимумов в частотных характеристиках затухания рис. 2, обусловленное, как было показано, петлеобразной формой частотных кривых приведенного импеданса, в решающей мере связано со свойствами функции гиперболического котангенса в правой части (9), так что общий вид частотной характеристики затухания должен существенно зависеть от значения приведенной толщины панели β . В то же время, при относительно больших толщинах панелей, и, соответственно, практически неизменной величине указанной функции, вся частотная характеристика звукопоглощения, имеющая единственный максимум, должна определяться только значением относительной ширины канала α .

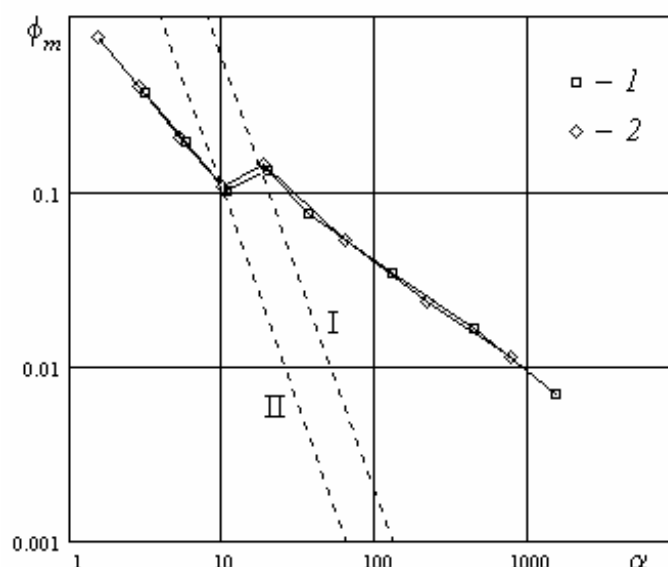


Рис. 3. Расчетная зависимость приведенной частоты максимального звукопоглощения от относительной ширины канала. 1 — $\alpha = \beta$; 2 — $\alpha = \beta/2$. Границы зоны влияния толщины звукопоглощающей панели (формула (14)): I — $\alpha = \beta$; II — $\alpha = \beta/2$

3. ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛУШИТЕЛЯ

Применительно к рассматриваемым приложениям величину гиперболического котангенса можно приближенно принять равной единице, когда действительная часть его аргумента превышает значение 1,5. Следовательно, ввиду (9), поведение частотных кривых затухания должно определяться практически только относительной шириной канала α при условии

$$\phi \cdot \beta \cdot \operatorname{Re} \gamma / k > 1,5, \quad (13)$$

выполняемом, в силу (6), при значениях относительной частоты ϕ , превышающих граничную величину ϕ_b

$$\phi_b = \left(\frac{1,5}{0,189 \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{0,405}}. \quad (14)$$

Данные рис. 3, где зависимость (14) проиллюстрирована кривыми I и II, свидетельствуют, что в исследованном диапазоне параметров частоты максимального звукопоглощения по большей части располагаются в области, удовлетворяющей условию (13), которая соответствует в рамках рассматриваемой схемы поглощению звуковых волн панелью без эффектов взаимодействия с осевой плоскостью.

В связи с последним результатом значительный практический интерес представляет вопрос о затухании звука в канале, ограниченном звукопоглощающими панелями, толщину которых можно принять бесконечной. Данный вопрос мы рассмотрим ниже как в рамках импедансной модели, так и с использованием модели изотропного звукопоглощающего слоя без сотовой упаковки.

В последнем случае волновое движение в ЗПМ представляет собой уходящую от границы канала волну, потенциал ψ которой выражается в виде

$$\psi = B \cdot e^{-i\nu y} e^{-\Gamma x}, \quad (15)$$

где

$$\nu = \sqrt{\Gamma^2 - \gamma^2}. \quad (16)$$

Потенциал звукового поля в канале по-прежнему удовлетворяет равенству (2). Равенство нормальных скоростей по обе стороны пластины эквивалентно условию

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{y=H} = \left. \frac{\partial \psi}{\partial y} \right|_{y=H}, \quad (17)$$

откуда, ввиду (2, 15), получаем условие

$$b = B / A = -i \cdot (\mu / \nu) \cdot \sin(\mu H) \cdot e^{i\nu H}. \quad (18)$$

Соответственно, равенство давлений на границе канала с учетом (2, 5, 15 и 18) приводит к соотношению

$$-i\omega\rho\cos(\mu H) = \gamma W \cdot i \cdot (\mu/\nu)\sin(\mu H), \quad (19)$$

из которого следует дисперсионное уравнение

$$\frac{\operatorname{ctg} \mu_H}{\mu_H} = -\frac{g(\phi)w(\phi)}{\nu_H} \quad (20)$$

($\nu_H \equiv \nu \cdot H$), определяющее затухание в канале, ограниченном достаточно толстыми панелями ЗПМ без сотовой упаковки. Поскольку, ввиду (16, 11 и 6),

$$\nu_H = \sqrt{\Gamma_H^2 - (g(\phi) \cdot \phi \cdot \alpha)^2}, \quad (21)$$

то равенство (20) очевидно устанавливает зависимость параметра затухания Γ_H от значений приведенной частоты ϕ и ширины канала α .

Соответствующее соотношение в рамках импедансной модели по-прежнему представляется равенством (9), в котором функция гиперболического котангенса должна быть заменена единицей:

$$\frac{\operatorname{ctg} \mu_H}{\mu_H} = -i w(\phi) \frac{1}{\phi \cdot \alpha}. \quad (9a)$$

Нетрудно убедиться, что при достаточно малых значениях параметра затухания Γ_H соотношения (20) и (9a) оказываются идентичными.

Результаты численных расчетов показателей наименьшего затухания в канале, ограниченном толстыми звукопоглощающими панелями, представленные на рис. 4, показывают, что частотные кривые поглощения для сотовой и изотропной облицовок имеют много общего.

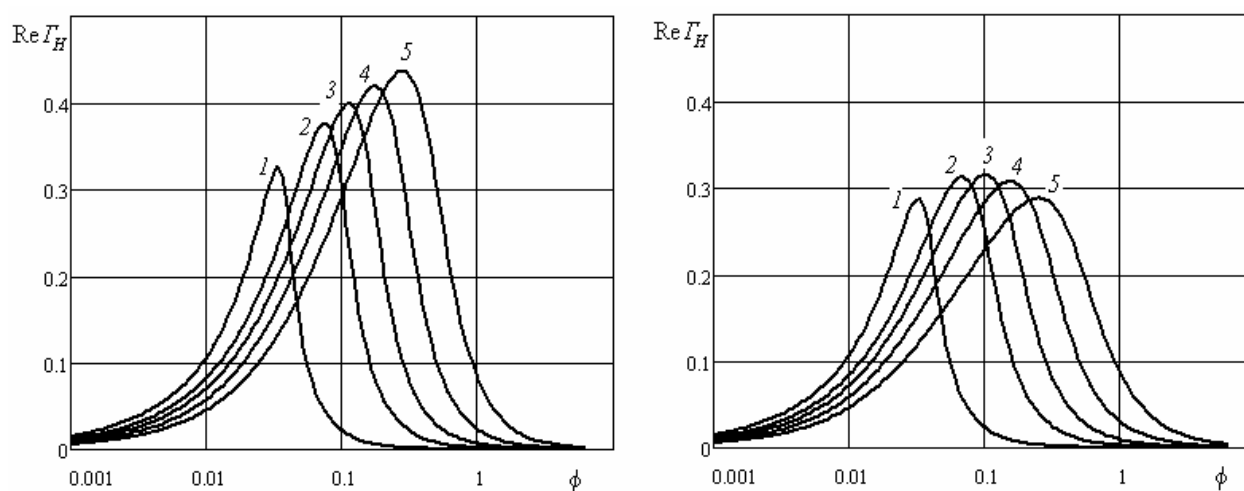


Рис. 4. Частотные характеристики затухания звука при различных значениях относительной ширины α канала. Толстые звукопоглощающие панели.

Варианты: а — сотовый каркас; б — изотропная набивка.

Значения α : 1 — 128; 2 — 37,0; 3 — 19,9; 4 — 10,7; 5 — 5,73.

Расчет по уравнениям (9a, 20)

При небольших уровнях звукопоглощения, когда значения действительной части показателя Γ_H не превышают величину 0,2, соответствующие ветви кривых $\text{Re} \Gamma_H(\phi)$ для вариантов сотового каркаса и изотропной набивки практически идентичны. В зоне максимального звукопоглощения значения показателя $\text{Re} \Gamma_H$ для варианта сотовой облицовки выше на 10...50%.

Основные параметры рассчитанных частотных кривых затухания звука представлены на рис. 5.

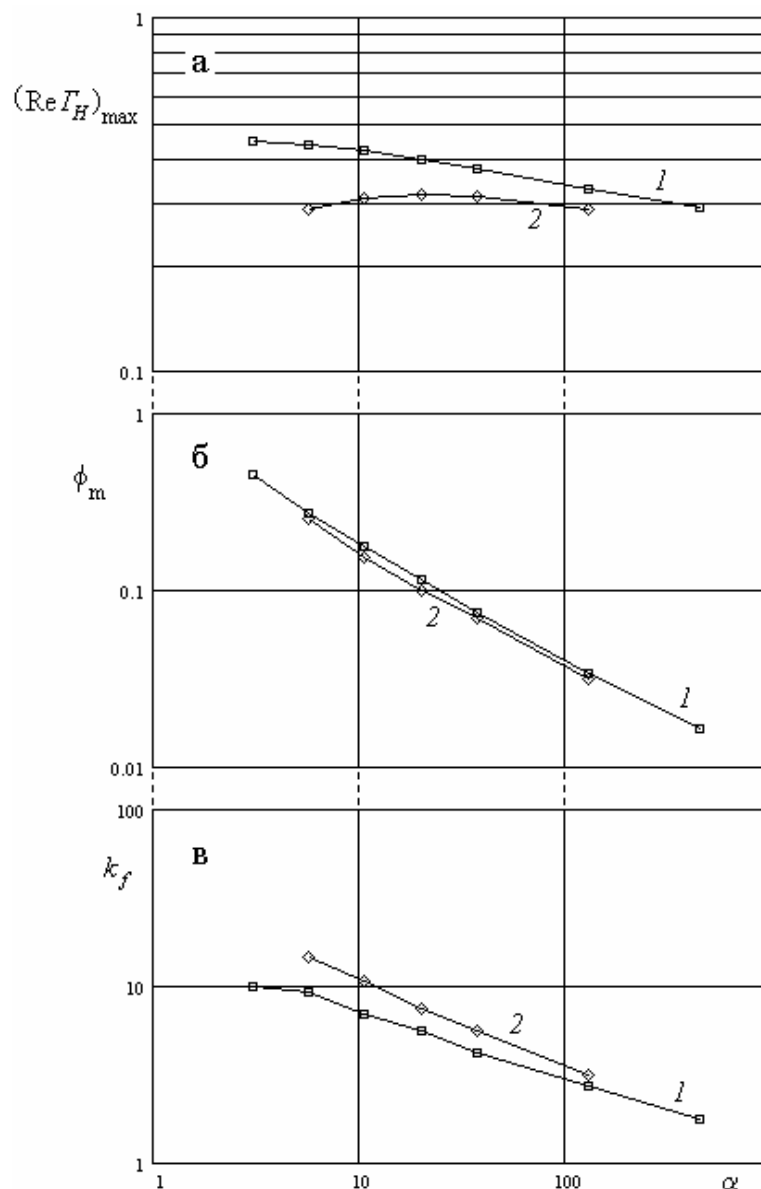


Рис. 5. Основные характеристики затухания звука в зависимости от относительной ширины α канала. Толстые звукопоглощающие панели.
а — максимальные значения показателя звукопоглощения; б — приведенные пиковые частоты; в — относительная ширина частотной полосы затухания.
Кривые: 1 — сотовый каркас; 2 — изотропная набивка

Помимо максимальных значений показателя звукопоглощения (рис. 5а), показаны соответствующие им приведенные пиковые частоты ϕ_m (рис. 5б), а также величины относительной ширины k_f частотной полосы затухания (рис. 5в). В качестве последней принято отношение частот, ограничивающих частотный диапазон, внутри которого значения показателя звукопоглощения превышают половину его максимального значения.

Представленные результаты показывают, в частности, что в типовом случае изотропной набивки максимальное значения D_{mH} снижения шума по ходу щелевого канала шумоглушителя на расстоянии калибра (ширины канала) практически не зависит от характеристик ЗПМ и составляет примерно

$$D_{mH} = 40 \lg e (\operatorname{Re} \Gamma_H)_{\max} \approx 5,2 \text{ дБ}. \quad (22)$$

Зависимость приведенной пиковой частоты от относительной ширины канала в рассматриваемом случае хорошо аппроксимируется соотношением

$$\phi_m = 0,8 \alpha^{-2/3}; \quad (23)$$

аналогичное приближенное выражение для относительной ширины частотной полосы затухания имеет вид:

$$k_f = 35 \alpha^{-1/2}. \quad (24)$$

Граничные относительные частоты ϕ' , ϕ'' полосы затухания могут быть оценены равенствами:

$$\phi' = \phi_m / \sqrt{k_f}; \quad \phi'' = \phi_m \sqrt{k_f}. \quad (25)$$

Раскрывая последние соотношения с учетом (10, 11), нетрудно представить полученные обобщенные зависимости в форме размерных соотношений, связывающих характеристики звукопоглощения в канале с его шириной и сопротивлением продуванию используемого ЗПМ. Простые оценки, в частности, показывают, что при заданной ширине канала и, следовательно, фиксированной величине максимального снижения шума на единицу его длины уменьшение сопротивления r продуванию приводит к снижению пиковой частоты f_m по закону $f_m \approx r^{1/3}$. Граничные частоты f' , f'' расширяющейся при этом полосы затухания изменяются по закону: $f' \approx r^{7/12}$; $f'' \approx r^{1/12}$.

4. О ВЛИЯНИИ ЗАЩИТНОЙ ТКАНИ

Представленные расчетные результаты получены в предположении звукопрозрачности защитного слоя. Между тем, защитные покрытия, отделяющие слой ЗПМ от рабочей среды на граничных поверхностях тракта способны оказывать значительное влияние на характеристики затухания звука в каналах диссипативных шумоглушителей. В особенности это относится к тканевым покрытиям, импеданс Z_t

которых, зависящий от поверхностной массовой плотности m_t и сопротивления продуванию R_t , может быть представлен выражением [1]

$$Z_t = \left[\frac{1}{R_t} + \frac{1}{i\omega m_t} \right]^{-1}. \quad (26)$$

Суммарный импеданс стенки канала в данном случае определяется как сумма импеданса покрытия (26) и импеданса слоя ЗПМ, который в рамках импедансной модели определяется выражением (8).

Влияние тканевого покрытия практически всегда связывается со снижением эффективности звукопоглощения в канале. Действительно, как показывают данные расчетов, рис. 1, почти все кривые приведенного импеданса слоя ЗПМ, непосредственно контактирующего с рабочей средой, за исключением случая очень широких каналов, проходят выше точки наибольшего звукопоглощения. Добавление покрытия смещает точки этих кривых еще более вверх и вправо, поскольку как действительная, так и мнимая часть импеданса Z_t положительны.

Продemonстрируем это сравнением безразмерных импедансов тканевого покрытия и толстого слоя ЗПМ. Безразмерный импеданс $w = W / \rho c$ последнего определяется равенством (7). Безразмерная форма выражения для импеданса тканевого покрытия $z_t = Z_t / \rho c$ вследствие (26) имеет вид

$$z_t = r_t \left[1 - \frac{i}{\phi_t} \right]^{-1}. \quad (27)$$

Здесь

$$r_t = R_t / \rho c; \quad (28)$$

безразмерная частота ϕ_t равна

$$\phi_t = \omega m_t / R_t. \quad (29)$$

На рис. 6 показаны карты частотных кривых безразмерных импедансов w и z_t . Кривые для ткани представляют собой дуги окружностей диаметра r_t , диапазон значений которого соответствует обычно используемым тканым защитным покрытиям [1]. Суммарное значение импеданса зависит от взаимного расположения точек на кривой 1 и одной из кривых 2...6.

С учетом значения критического импеданса следует ожидать, что воздействие тканевого покрытия на показатели снижения шума в частотной полосе эффективного звукопоглощения будет невелико, если на пиковой частоте f_m значение приведенного импеданса ткани, равное отношению z_t к произведению $k \cdot H = \phi_m \alpha$, окажется малым по сравнению с единицей. Данное условие с использованием (27) может быть записано в виде:

$$\frac{r_t}{\alpha} \frac{K_{tf}}{\sqrt{1 + \phi_m^2 K_{tf}^2}} \ll 1. \quad (30)$$

Величина коэффициента K_{tf} равна отношению характерных частот ЗПМ и ткани, так что

$$K_{tf} = (r / \rho) / (R_t / m_t) . \quad (31)$$

Из условия (30) с учетом (23) в частности следует, что влияние защитного покрытия на показатели звукопоглощения несколько снижается при увеличении ширины канала. Данный эффект объясняется возрастанием инерционной проводимости покрытия вследствие соответствующего уменьшения пиковой частоты звукопоглощения.

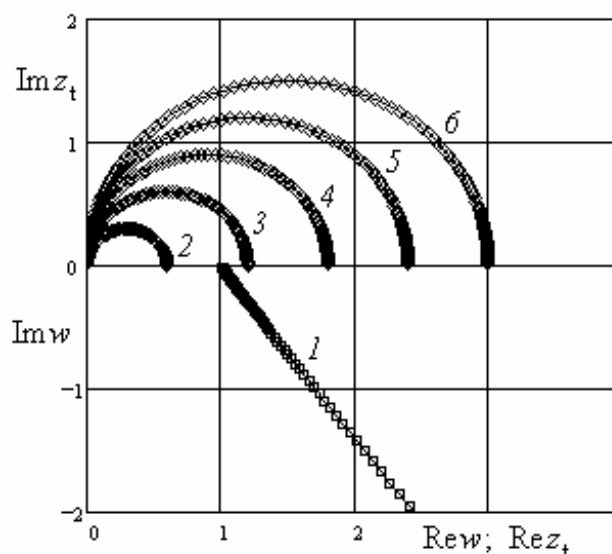


Рис. 6. Карта частотных кривых безразмерных импедансов защитной ткани и ЗПМ.

1 – слой ЗПМ бесконечной толщины; 2...6 — защитные ткани со значениями r_t : 2 — 0,6; 3 — 1,2; 4 — 1,8; 5 — 2,4; 6 — 3,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьян Ф. Е., Перцовский Е. А. Расчет и проектирование глушителей шума энергоустановок. Л. «Энергия», 1980.
2. Морз Ф. Колебания и звук. М., Л., ГИТТЛ, 1949.
3. Mechel F. P. (Ed.). Formulas of Acoustics. Berlin Heidelberg, «Springer», 2004.
4. Справочник по технической акустике. Под редакцией Хекла М. и Мюллера Х. А. Л., «Судостроение», 1980.
5. Delany M. E., Bazley E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics v.3, 1970, pp. 105–116.
6. Takeshi Komatsu. Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. Acoust. Sci. & Tech. 29, 2 (2008), pp. 121–129.