АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 1, с. 146 - 152

УДК 534.2.532

РАСШИРЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСЫ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ ОБЛИЦОВОК СИЛОВЫХ УСТАНОВОК САМОЛЕТОВ

© 1995 г. А. Ф. Соболев, Н. М. Соловьева, Р. Д. Филиппова

Государственный научно-исследовательский Центр ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского

107005 Москва, ул. Радио, 17

Поступила в редакцию 18.11.93 г.

После окончательной доработки 07.04.94 г.

Рассмотрены акустические характеристики комбинированных резонансных ЗПК, позволяющих обеспечить снижение шума в широком диапазоне частот. Широкополосность достигается выполнением ЗПК в виде повторяющихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях блоков, включающих несколько резонаторов, настроенных на отличающиеся друг от друга частоты. Решены прямая и обратная задачи: определение импеданса подобных ЗПК по их геометрическим параметрам и определение параметров ЗПК, обеспечивающих в заданном диапазоне частот максимальный коэффициент звукопоглощения или максимально возможное снижение шума в канале, облицованном комбинированной ЗПК. Сравнение результатов экспериментальных исследований и расчетов импедансных характеристик комбинированных ЗПК дало весьма хорошее их соответствие.

В настоящее время в каналах силовых установок самолетов с ТРДД, как правило, используются однослойные сотовые звукопоглощающие конструкции (ЗПК) резонансного типа. Эти конструкции работают в условиях высоких уровней звука (до 150 - 160 дБ) и высокоскоростного воздушного потока ($M = 0.3 - 0.5$), при которых весьма существенными становятся нелинейные эффекты. Геометрические параметры этих ЗПК (высота сотового заполнителя h, процент перфорации F, диаметр отверстий d и толщина лицевой панели δ) выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное снижение шума на частоте следования лопаток рабочего колеса вентилятора ($1.5 < f < 3.0$ кГц), определяющей шумность самолета на местности. Однако по мере подавления этой составляющей, основную роль приобретают ее гармоники, что требует расширения полосы звукопоглощения облицовки в область более высоких частот (до 5 - 6 кГц) без увеличения имеющейся площади ЗПК.

Одно из возможных направлений расширения полосы звукопоглощения заключается в усложнении самой конструкции. Примером этого являются хорошо известные двухслойные конструкции [1]. Они имеют большее число степеней свободы, чем однослойные, управляя которыми можно расширить полосу звукопоглощения. В настоящее время возможность практического использования таких конструкций в каналах ТРДД с большой степенью двухконтурности весьма тщательно изучается и может служить темой отдельного рассмотрения. Известна работа [2], где рассматривается звукопоглощающая система, состоящая из набора осцилляторов с непрерывным распределением собственных частот в заданном частотном диапазоне. В такой системе реализуется механизм поглощения типа линейного затухания Ландау в плазме. К сожалению, в такой системе требуется большая концентрация резонаторов в заданном частотном диапазоне, и поэтому реализовать такой метод в каналах ТРДД практически невозможно.

В данной работе для расширения полосы звукопоглощения предлагаются комбинированные ЗПК. Они представляют собой поглощающую поверхность, состоящую из повторяющихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях блоков, включающих несколько резонаторов, настроенных на отличающиеся друг от друга частоты. В целом импеданс такой комбинированной конструкции определяется средним импедансом блока. Настройка на разные частоты резонаторов в блоке осуществляется изменением в соседних ячейках блока процента перфорации или объема. Если провести аналогию с двухслойной конструкцией, импеданс которой определяется как последовательное соединение импедансов составляющих ее элементов, то импеданс рассматриваемой комбинированной конструкции можно представить как параллельное соединение входящих в блок элементов. Важно подчеркнуть, что обеспечение наиболее равномерной частотной характеристики поглощения в широкой полосе частот требует специального выбора геометрических параметров ячеек, составляющих блок, с учетом из взаимного влияния друг на друга.

В связи с этим представляет интерес решение как прямой задачи – определения импеданса комбинированной конструкции по геометрическим параметрам, так и обратной – определение геометрических параметров комбинированной конструкции, обеспечивающей максимальный коэффициент звукопоглощения α или максимальную величину затухания ΔL в канале в заданном диапазоне частот. В настоящей работе дано решение как прямой, так и обратной задачи. Точное определение импеданса комбинированной конструкции, состоящей из нескольких разнонастроенных резонаторов, является весьма сложной дифракционной задачей, требующей решения волнового уравнения при наличии периодически неоднородной поверхности, что в настоящее время не представляется возможным за исключением частных случаев типа прямоугольных канавок на импедансной поверхности [3]. В связи с этим импеданс комбинированной конструкции определяется приближенно.

Рассмотрим прямоугольную трубу, в поперечном сечении которой установлены два различных резонатора. Для определенности каждый из резонаторов представляет собой прямоугольный объем с отверстием на грани, обращенной к падающему звуку. Предполагается, что поперечный размер трубы много меньше длины звуковой волны. Импеданс составной конструкции определяется на некоторой воображаемой поверхности вблизи отверстий резонаторов $Z = p/v$, где p – акустическое давление на этой поверхности, v – осредненная по этой поверхности акустическая скорость. Из условия непрерывности объемной скорости имеем

$$vS = v_1\sigma_1 + v_2\sigma_2, \tag{1}$$

где S – площадь поперечного сечения трубы, $v_1(v_2)$ – скорость в отверстиях первого (второго) резонатора, $\sigma_1(\sigma_2)$ площадь отверстия первого (второго) резонатора. Подставив (1) в выражение для входного импеданса, получим

$$Z = pS/(v_1\sigma_1 + v_2\sigma_2). \tag{2}$$

Пусть Z_1 – импеданс однородной конструкции, состоящей из резонаторов первого типа, Z_2 – импеданс конструкции, состоящей из резонаторов второго типа. Тогда легко можно показать, что

$$Z = Z_1Z_2/(Z_1F_2 + Z_2F_1), \tag{3}$$

где $F_1 = S_1/S$, $F_2 = S_2/S$, $S_1 + S_2 = S$.

Формула (3) легко обобщается на случай 3-х и более резонаторов в блоке

$$1/Z = F_1/Z_1 + F_2/Z_2 + \ldots + F_n/Z_n, \tag{4}$$

где $F_1 + F_2 + \ldots + F_n = 1$. Следует еще раз обратить внимание на то, что поперечный размер блока должен быть меньше длины волны или равен, по крайней мере, $\lambda/4$. В противном случае импеданс комбинированной конструкции перестает быть локально реагирующим и не может быть выражен с помощью простой формулы (4). Это условие практически ограничивает число ячеек в блоке до четырех-пяти в интересующем диапазоне высоких частот. Таким образом, для определения импеданса комбинированной конструкции достаточно знать импеданс каждой из однородных конструкций, элементы которых составляют комбинированную ЗПК, и долю площади каждого элемента от общей площади блока. В дальнейшем для упрощения будут рассматриваться ячейки с прямоугольным сечением. Импеданс однородной конструкции может быть определен с помощью полуэмпирических зависимостей, полученных на основании обобщения целого ряда исследований отечественных и зарубежных авторов [4]. В этих зависимостях однако не отражены два отличительных момента, которые в той или иной степени присутствуют в других работах [5 - 7]. Это, во-первых, вязкие потери, обусловленные прилипанием жидкости к стенкам полости, во-вторых, перераспределение присоединенной массы отверстий при произвольном их расположении на гранях резонаторов, обращенных к падающей звуковой волне. Учитывая малые поперечные размеры резонаторов, эффекты от вязких потерь могут быть значительны особенно на низких частотах. Выражение для безразмерного импеданса полости прямоугольного сечения, определяемого в единицах ρc воздуха, где ρ – плотность воздуха, c – скорость звука, с учетом потерь может быть легко получено, если рассмотреть распространение звука в канале с адмитансом стенок, обусловленным наличием акустического пограничного слоя [8, 9]

$$Y_0 = \frac{k_z^2(1+j)}{k^2}\left(\frac{\nu\omega}{2c^2}\right)^{1/2},$$

где $k = \omega/c$ – волновое число, k_z – составляющая волнового вектора в направлении распространения волны, ν – кинематическая вязкость, ω – круговая частота, $j^2 = -1$. В предположении, что при $z = h$ находится жесткая стенка, получается следующее выражение для импеданса полости, определяемого в единицах ρc воздуха

$$Z_0 = -jk\,\mathrm{ctg}(k_0h)/k_0, \tag{5}$$

где $k_0^2 = k^2/(1 - 2(1-j)\left(\frac{\nu\omega}{2c^2}\right)^{1/2}((ka)^{-1} + (kb)^{-1})$:

a, b – стороны прямоугольного сечения ячейки. Аналогично можно легко обобщить выражение для присоединенной массы, полученное в [5], на случай произвольного расположения отверстия

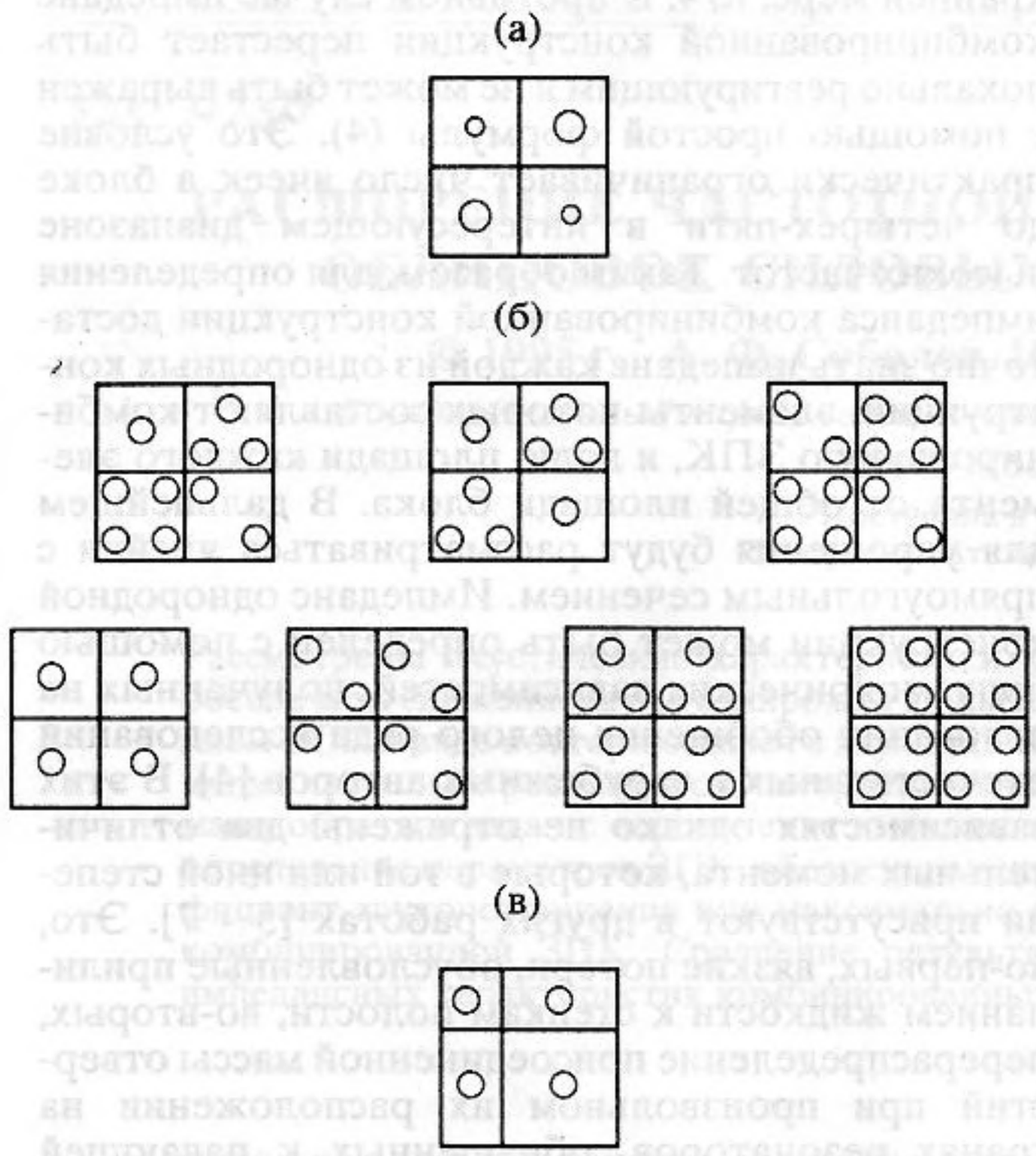

Рис. 1. Схемы образцов комбинированных и однородных ЗПК, исследованных на интерферометре.

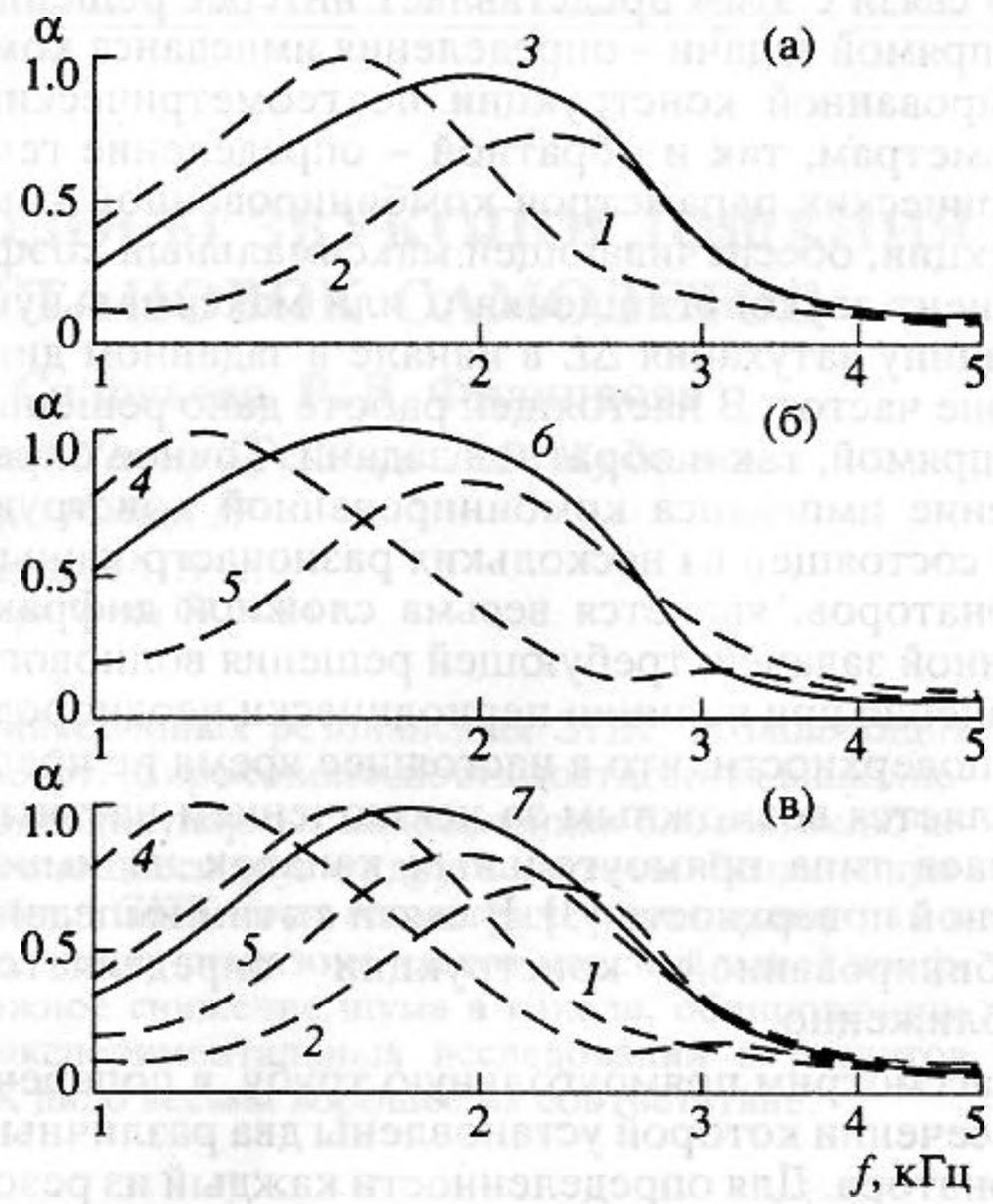

Рис. 2. Коэффициент звукопоглощения комбинированных (——) и однородных (----) ЗПК с различным процентом перфорации лицевой панели F, %: *1* – 6, *2* – 12, *3* – (6 ∪ 12), *4* – 3, *5* – 9, *6* – (3 ∪ 9), *7* – (3 ∪ 6 ∪ ∪ 9 ∪ 12).

относительно центра грани прямоугольного резонатора

$$\Delta\tilde{l} = \Delta l(h) + \Delta l(\infty), \tag{6}$$

где

$$\Delta l(h) = \sum_{m,n} \frac{8\varepsilon_{m,n}\pi\cos^2(\eta x_0)\cos^2(\beta y_0)J_1^2(Qr_0)}{k_{m,n}abQ^2}\operatorname{ctg}(k_{m,n}h), \tag{7}$$

x_0, y_0 – координаты центра отверстия относительно центра грани, $\eta = m\pi/a$, $\beta = n\pi/b$, r_0 – радиус отверстия, $\Delta l(\infty) = \lim\limits_{h\to\infty}\Delta l(h)$, $\lim\limits_{h\to\infty}\operatorname{ctg}(k_{m,n}h) = j$, $Q = (\eta^2+\beta^2)^{1/2}$, $k_{m,n}^2 = k^2 - (m\pi/a)^2 - (n\pi/b)^2$, J_1 – функция Бесселя первого порядка,

$$\varepsilon_{m,n} = \begin{cases} 1, m \neq 0, & n \neq 0 \\ 1/2, m = 0, & n \neq 0; \quad m \neq 0, \ n = 0. \end{cases}$$

Для определения предела при $h \longrightarrow \infty$ в (7) следует внести отрицательную мнимую добавку в волновое число k, означающую наличие поглощения в среде, и после перехода к пределу положить ее равной нулю. Штрих у знака суммы в выражении (7) означает, что нулевой член должен быть исключен, поскольку он уже учтен в (5). Выражение (4) с учетом импеданса однородной конструкции из [4] и выражений (5) - (7) явилось основой при составлении алгоритма для численного расчета импеданса комбинированной конструкции.

С целью проверки принципиальной возможности расширения частотной характеристики коэффициента звукопоглощения с помощью комбинированных ЗПК были проведены их исследования на интерферометре высоких уровней. Рассмотренные ЗПК представляли собой блок из четырех резонансных изолированных ячеек (рис. 1), каждая из которых настроена на свою частоту, попарно на две резонансные частоты или три отличающиеся частоты. Исследованные конструкции можно условно разбить на три группы. Первая группа (рис. 1а) включала образцы с ячейками постоянного сечения 10 × 10 мм². В каждой ячейке имелось по одному отверстию разного диаметра: d = 1, 2, 3, 4 мм. Вторая группа ЗПК (рис. 1б) включала образцы, в которых имелись отверстия одного диаметра d = 2 мм, но в соседних ячейках изменялось их количество. При этом все резонаторы настраивались на разные частоты или настройка осуществлялась попарно на две частоты. Дополнительно для сравнения результатов исследований были рассмотрены образцы этого типа, в которых все четыре ячейки были настроены на одну и ту же частоту, т.е.

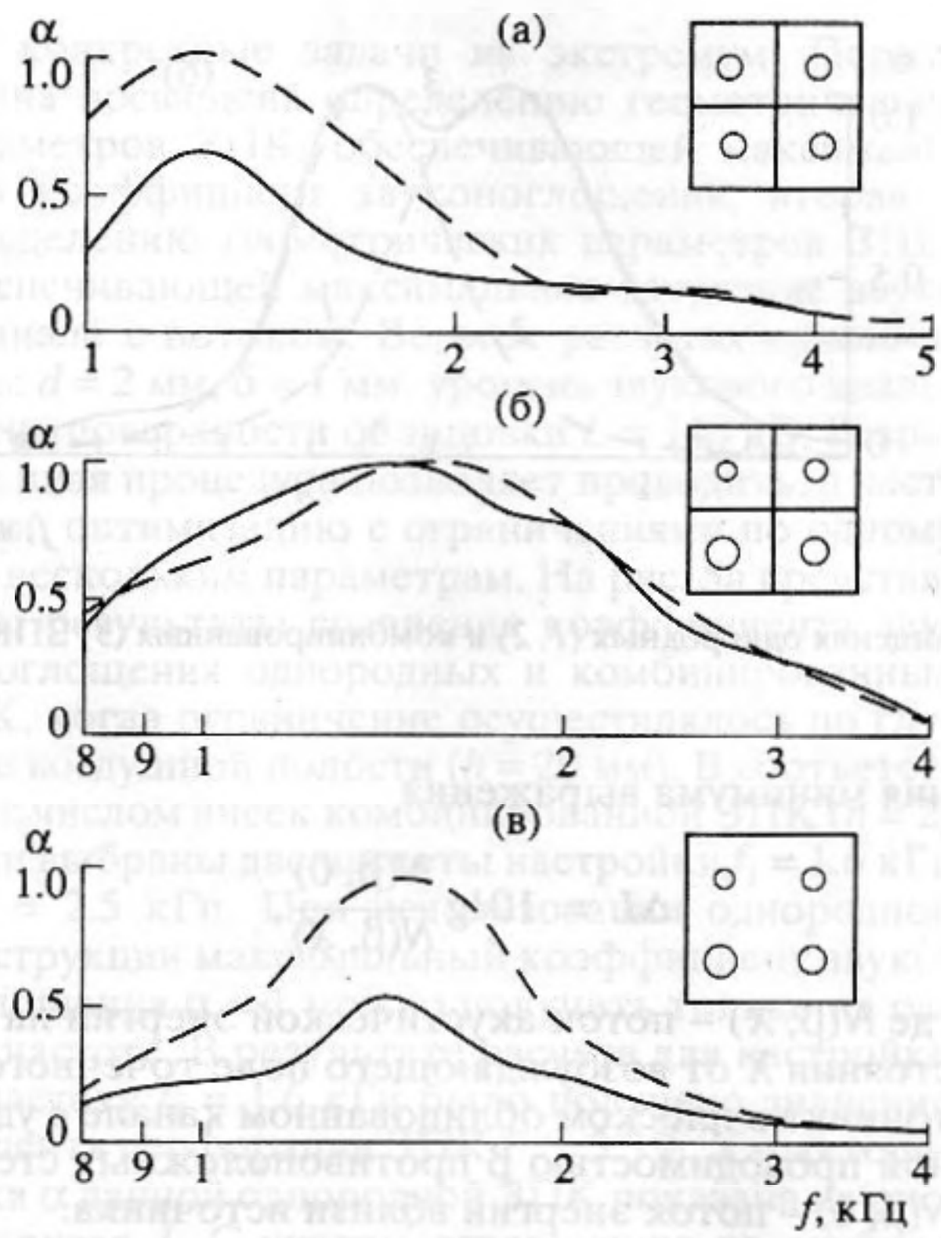

Рис. 3. Влияние уровня звукового давления на поверхности однородных (а, в) и комбинированной (б) ЗПК с $h = 20$ мм, $\delta = 2$ мм на коэффициент звукопоглощения при L, равном 110 (——) и 140 дБ (----).

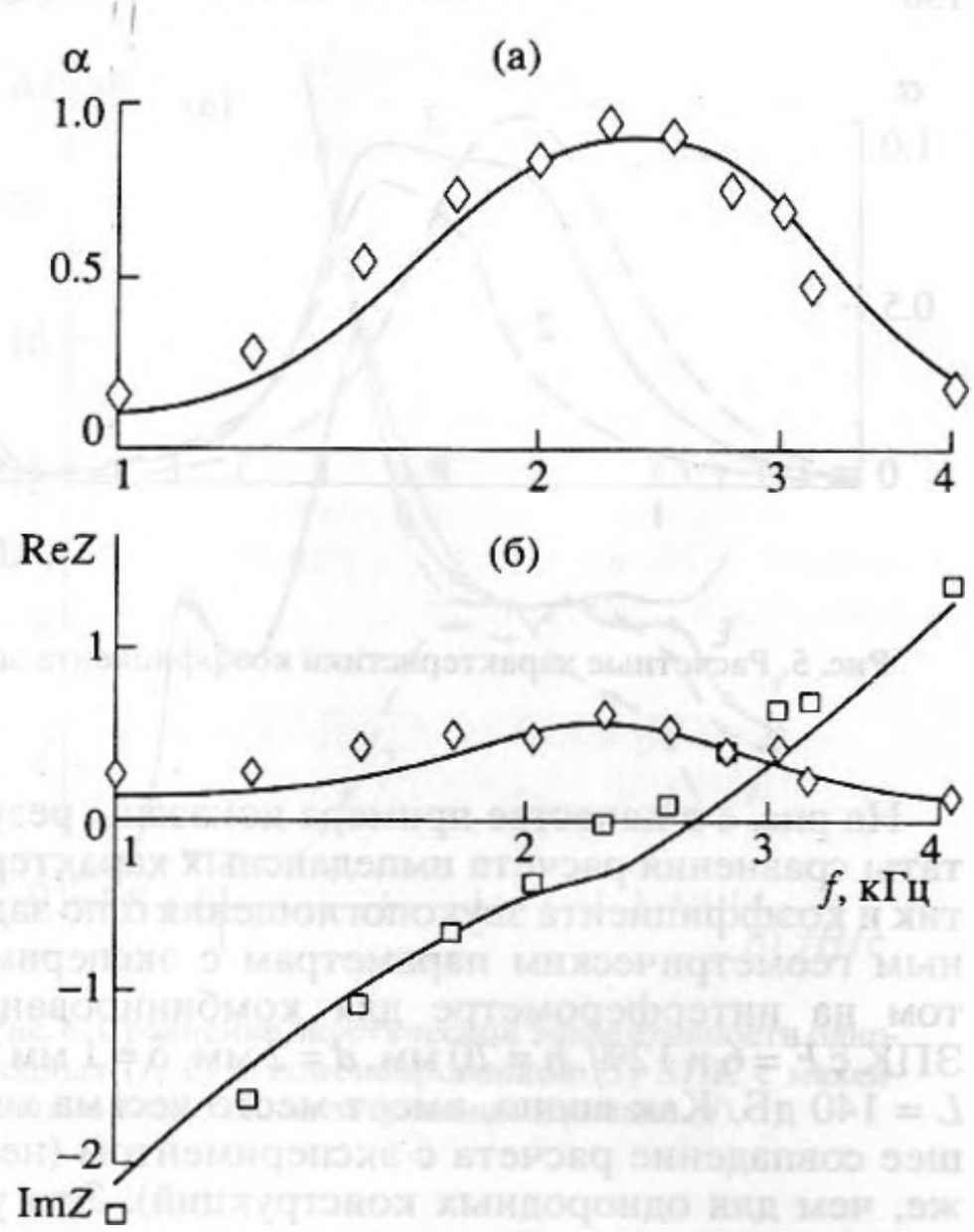

Рис. 4. Сравнение результатов эксперимента (точки) и расчета (сплошные кривые) коэффициента звукопоглощения и импеданса комбинированной ЗПК.

рассмотрены однородные ЗПК. Третья группа ЗПК (рис. 1в) включала образцы, которые отличались сечением (7×7 мм^2, 7×13 мм^2, 13×13 мм^2), а следовательно их объемом.

На рис. 2 представлены результаты сравнительных испытаний однородных и комбинированных ЗПК. Комбинированные ЗПК были составлены из ячеек с двумя и четырьмя отверстиями (рис. 2а), с одним и тремя отверстиями (рис. 2б) и, наконец, с четырьмя разными отверстиями (рис. 2в). Глубина воздушной полости составляла 20 мм, толщина перфорированной панели 2 мм, уровень звукового давления на поверхности образца равен 140 дБ. Во всех случаях комбинированная ЗПК имела более широкую частотную характеристику коэффициента звукопоглощения α, чем составляющие ее однородные ЗПК. При этом видно, что характеристика α комбинированной ЗПК полностью включает α ячеек с более высоким значением процента перфорации F и только частично с минимальным F, т.е. в первую очередь в комбинированной ЗПК возбуждаются ячейки с более низким сопротивлением в отверстиях перфорированной панели. Из рис. 2в также видно, что ячейка с $F = 3\%$ в комбинации из четырех разных ячеек представляет слишком большое сопротивление по сравнению с остальными, звук в нее не попадает и она не влияет на α комбинированной ЗПК. Использование в блоке и четырех резонаторов ячеек двух типов дает практически тот же эффект по расширению частотной характеристики поглощения, что и четырех типов, настроенных на разные частоты. Следующий важный момент, на который хотелось бы обратить внимание, это влияние уровня звукового давления на поверхности образца на импедансные характеристики и, следовательно, величину α комбинированной ЗПК. Хорошо известно, что импеданс однородной резонансной конструкции существенно зависит от уровня звука на поверхности образца [4]. На рис. 3а показано экспериментально полученное уменьшение эффективности исследуемых в данной работе однородных конструкций ($h = 20$ мм, $\delta = 2$ мм, $d = 2$ мм) при снижении уровня звука на поверхности образца со 140 дБ до 110 дБ. В случае комбинированной ЗПК, состоящей из четырех ячеек с отверстиями разного диаметра (d = 1, 2, 3, 4 мм), влияние изменения уровня звука значительно уменьшается (рис. 3б). Однако оно становится существенным при устранении разделительных перегородок, т.е. при возврате к однородной конструкции с четырьмя отверстиями разного диаметра в каждой ячейке (рис. 3в).

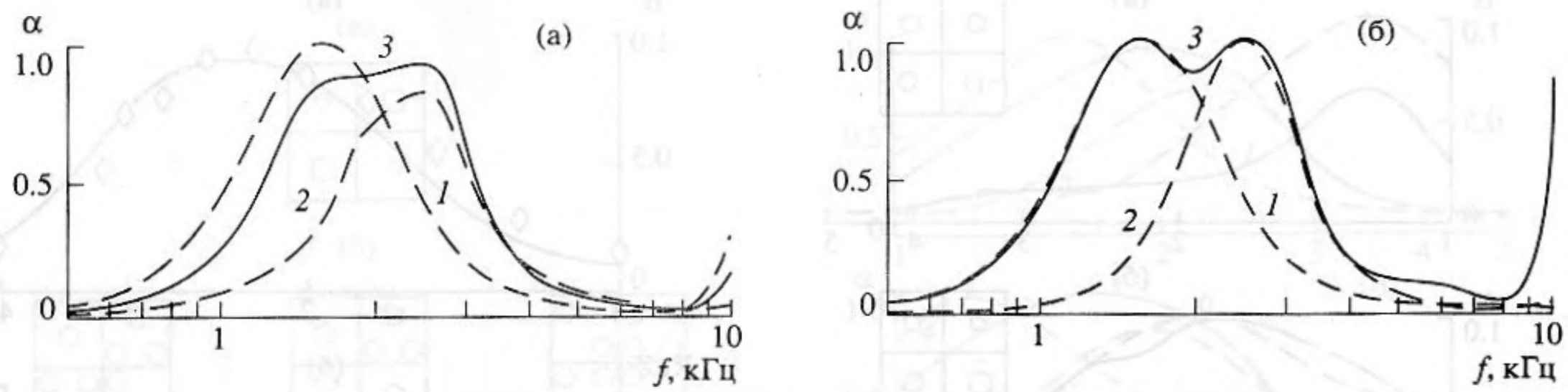

Рис. 5. Расчетные характеристики коэффициента звукопоглощения однородных (*1*, *2*) и комбинированных (*3*) ЗПК.

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты сравнения расчета импедансных характеристик и коэффициента звукопоглощения α по заданным геометрическим параметрам с экспериментом на интерферометре для комбинированной ЗПК с $F = 6$ и 12%, $h = 20$ мм, $d = 2$ мм, $\delta = 1$ мм при $L = 140$ дБ. Как видно, имеет место весьма хорошее совпадение расчета с экспериментом (не хуже, чем для однородных конструкций). Это указывает на то, что полученные выше достаточно простые соотношения можно использовать для расчета комбинированных ЗПК. Таким образом реализуется решение прямой задачи – определение импеданса комбинированной конструкции по известным геометрическим параметрам ее элементов. На практике значительный интерес представляет обратная задача, а именно, как подобрать геометрические параметры комбинированной конструкции, чтобы получить наилучшую частотную характеристику коэффициента звукопоглощения α или затухания ΔL дБ, если речь идет о распространении звука в канале в заданном диапазоне частот $f_1 < f < f_2$. Задача заключается в определении минимума некоторой целевой функции. В качестве последней для определения наилучшей характеристики коэффициента звукопоглощения была использована функция вида

$$\Phi_1 = \sum_{n=1}^{k} |Z(f_n) - 1|, \qquad (8)$$

где $f_1 \le f_n \le f_2$, $Z(f_n)$ – импеданс комбинированной конструкции, а для определения максимального затухания в канале с потоком при заданной длине облицовки функция вида

$$\Phi_2 = \sum_{n=1}^{k} |Z(f_n) - Z_{opt}(f_n)|, \qquad (9)$$

где $Z_{opt}(f_n)$ – оптимальный импеданс. Оптимальный импеданс определялся из условия обеспечения минимума выражения

$$\Delta L = 10 \lg \frac{N(\beta, 0)}{N(\beta, X)}, \qquad (10)$$

где $N(\beta, X)$ – поток акустической энергии на расстоянии X от возбуждающего поле точечного источника в плоском облицованном канале с удельной проводимостью β противоположных стенок, $N(\beta, 0)$ – поток энергии вблизи источника.

При высоких уровнях звука основными параметрами, от которых зависит импеданс, являются процент перфорации F и глубина воздушной полости h. Таким образом, в случае комбинированной ЗПК, состоящей из N ячеек, целевые функции Φ_1 и Φ_2 зависят от $2N$ переменных. Можно ожидать, что если $K = N$, т.е. если число частот f_n из заданного диапазона частот $f_1 < f_n < f_2$ будет равно числу ячеек, то $\min\Phi_1 = \min\Phi_2 = 0$, и на этих частотах коэффициент α или затухание ΔL будут максимально возможными. Если $K > N$, то $\min\Phi_1 > 0$ и $\min\Phi_2 > 0$, и возможные провалы в частотных характеристиках будут сглажены, однако ни на одной из частот величина α или затухание ΔL не достигнут максимально возможных величин.

В основу разработки эффективного алгоритма для определения минимума выражений (8), (9) и (10) был взят метод Нелдера–Мида [9]. Идея метода состоит в сравнении значений функции в $(2N + 2)$ вершинах симплекса и перемещении симплекса в направлении оптимальной точки. Следует отметить возможную неоднозначность как решения обратной задачи, так и поиска минимума выражения (10). Была разработана весьма эффективная процедура прямого поиска экстремума функции. Во избежание преждевременного завершения решения задачи при обнаружении некоторого локального минимума предусмотрена возможность изменения как начальных значений, так и коэффициентов сжатия и отражения симплекса, что позволяет существенно увеличить вероятность нахождения глобального минимума. С использованием этой процедуры были решены

две конкретные задачи на экстремум. Первая задача посвящена определению геометрических параметров ЗПК, обеспечивающей максимальный коэффициент звукопоглощения, вторая – определению геометрических параметров ЗПК, обеспечивающей максимальное затухание звука в канале с потоком. Во всех расчетах принималось: $d = 2$ мм, $\delta = 1$ мм, уровень звукового давления на поверхности облицовки $L = 140$ дБ. Разработанная процедура позволяет проводить, в частности, оптимизацию с ограничениями по одному или нескольким параметрам. На рис. 5а представлены результаты сравнения коэффициента звукопоглощения однородных и комбинированных ЗПК, когда ограничение осуществлялось по глубине воздушной полости ($h = 20$ мм). В соответствии с числом ячеек комбинированной ЗПК ($n = 2$) были выбраны две частоты настройки $f_1 = 1.6$ кГц и $f_2 = 2.5$ кГц. При использовании однородной конструкции максимальный коэффициент звукопоглощения $\alpha = 1$ можно получить только на одной частоте. В результате расчета для настройки на частоту $f_1 = 1.6$ кГц было получено значение процента перфорации ЗПК $F_1 = 3.3\%$. Характеристика α данной однородной ЗПК показана на рис. 5а, кривая *1*. С учетом ограничения по глубине воздушной полости максимальный коэффициент α однородной конструкции, настроенной на частоту $f_2 = 2.5$ кГц, составляет 0.812 (рис. 5а, кривая *2*), при этом $F_2 = 7\%$. Расчет геометрических параметров комбинированной ЗПК той же высоты $h = 20$ мм при условии обеспечения минимума функции Φ_1 (см. выражение (8)) дал следующие значения процента перфорации составляющих ее ячеек: $F_1 = 3.9\%$, $F_2 = 10.8\%$. Характеристика α этой ЗПК показана на рис. 5а, кривая *3*. В общем случае F_1 и F_2 комбинированной конструкции отличаются от процента перфорации соответствующих однородных ЗПК. В целом рис. 5а подтверждает результаты, полученные экспериментально на интерферометре (рис. 2). На рис. 5б показано аналогичное сравнение в отсутствие ограничений по параметрам ЗПК. При этом обеспечено $\alpha = 1$ для однородных ЗПК соответственно на частотах $f_1 = 1.6$ кГц (кривая *1*) и $f_2 = 2.5$ кГц (кривая *2*). Частотная зависимость α комбинированной ЗПК (кривая *3*), полученная из условия обеспечения минимума Φ_1 одновременно на частотах f_1 и f_2, практически является огибающей α двух однородных ЗПК. Геометрические параметры однородной конструкции, настроенной на частоту $f_2 = 2.5$ кГц, равны: $F_2 = 3.2\%$, $h_2 = 8$ мм, а комбинированной ЗПК равны: $F_1 = F_2 = 6.8\%$, $h_1 = 35$ мм, $h_2 = 13.8$ мм.

Рис. 6 иллюстрирует результаты расчетов, выполненных на основе минимизации функции Φ_2 (см. выражение (9)) с целью получения наилучшей эффективности однородных ЗПК и комбинированной двуячеистой конструкции в канале

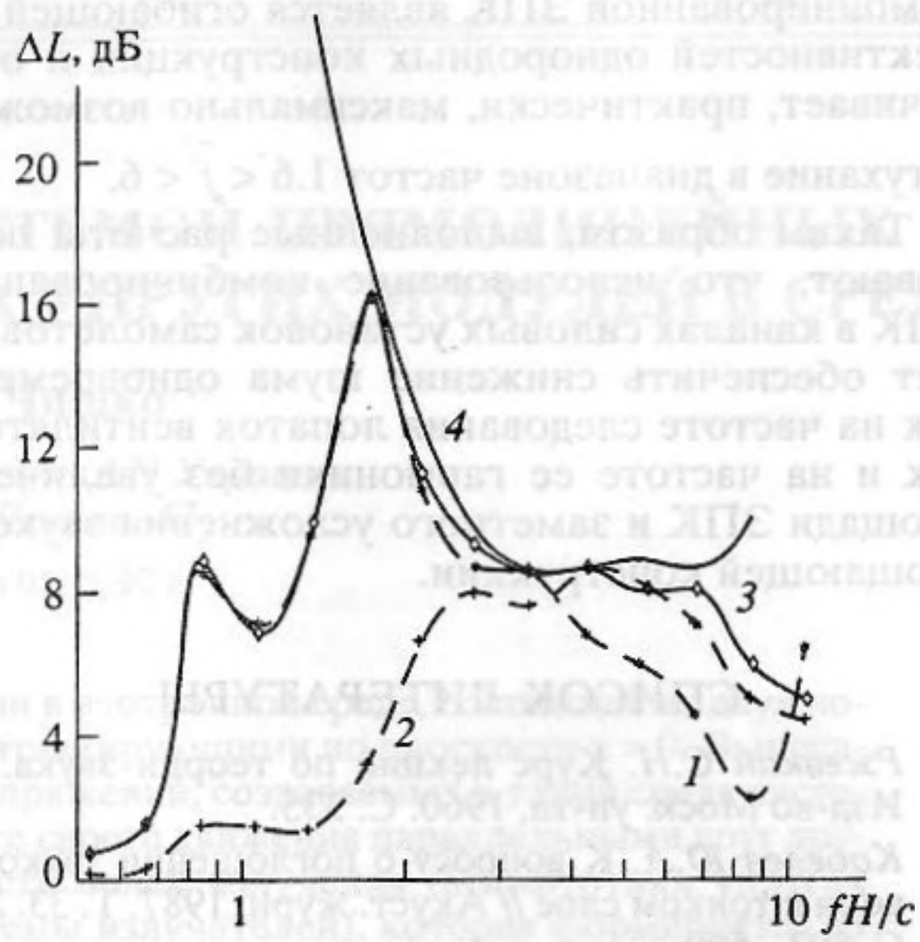

Рис. 6. Сравнение акустической эффективности однородных (*1*, *2*) и комбинированной (*3*) ЗПК с максимально возможным затуханием в канале (*4*).

прямоугольного сечения, облицованного с двух сторон ЗПК с одинаковым импедансом. При расчетах были приняты следующие условия: скорость воздушного потока $M = 0.325$, безразмерная длина облицовки $l = 1.5$ калибра (1 калибр = $2H$, где H – расстояние между двумя облицованными сторонами канала), звук возбуждается точечным источником, расположенным в середине входного сечения канала. В соответствии с использованием двуячеистой комбинированной ЗПК были выбраны две основные безразмерные частоты настройки $\tilde{f}_1 = 1.6$ и $\tilde{f}_2 = 4$, где $\tilde{f} = fH/c$. Оптимальный импеданс $Z_{opt}(f_n)$ для каждой ЗПК определялся из условия обеспечения максимального затухания на частоте f_n. В результате расчета были получены следующие геометрические параметры однородных ЗПК, настроенных на $\tilde{f}_1 = 1.6$ и $\tilde{f}_2 = 4$ соответственно: $F_1 = 6\%$, $h_1 = 17.9$ мм и $F_2 = 5\%$, $h_2 = 6.6$ мм. Комбинированная конструкция включает ячейки, отличающиеся как величиной F, так и h, которые составляют: $F_1 = 8.6\%$, $F_2 = 11\%$, $h_1 = 28$ мм, $h_2 = 8.9$ мм. На рис. 6 показана эффективность однородных конструкций, настроенных на частоты $\tilde{f}_1 = 1.6$ (кривая *1*) и $\tilde{f}_2 = 4$ (кривая *2*), и комбинированной (кривая *3*), а также максимально возможное затухание (кривая *4*). Расчет затухания, обеспечиваемого той или иной облицовкой, а также максимально возможного затухания проводился в соответствии с выражением (10). Из рис. 6 видно, что каждая из однородных ЗПК обеспечивает максимально возможное затухание в своем диапазоне частот. Эффективность

комбинированной ЗПК является огибающей эффективностей однородных конструкций и обеспечивает, практически, максимально возможное затухание в диапазоне частот $1.6 < \tilde{f} < 6$.

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что использование комбинированных ЗПК в каналах силовых установок самолетов может обеспечить снижение шума одновременно как на частоте следования лопаток вентилятора, так и на частоте ее гармоники без увеличения площади ЗПК и заметного усложнения звукопоглощающей конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ржевкин С.Н.* Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. С. 335.
2. *Кобелев Ю.А.* К вопросу о поглощении звуковых волн в тонком слое // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 507 - 509.
3. *Велижанина К.А., Гамулин А.В.* Дифракция звука на неоднородной поверхности // Акуст. журн. 1974. Т. 23. № 1. С. 41 - 45.
4. *Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А.* Аэродинамические источники звука. М.: Машиностроение, 1981. 281 с.
5. *Ingard U.* On the theory and design of acoustic resonators // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. № 6. P. 1037 - 1061.
6. *Крендал И.Б.* Акустика. Л.: Наука, 1934. 243 с.
7. *Велижанина К.А., Оборотов В.А.* Новый низкочастотный и инфразвуковой резонансный звукопоглотитель // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 1. С. 55 - 60.
8. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. С. 194.
9. *Nelder J.A., Meed R.A.* Simplex method for function minimisation // The Comp. Journ. 1965. № 7. P. 308 - 313.

A Way to Expand the Frequency Range of Sound-Absorbent Liners for Aircraft Power Plants

A. F. Sobolev, N. M. Solov'eva, and R. D. Filippova

The paper examines the acoustic properties of composite resonance sound-absorbent liners able to reduce noise over a wide frequency range. The broadband response is achieved by a sound-absorbent liner made up of blocks arranged in a repetitive pattern in two mutually perpendicular directions and incorporating several resonators tuned to different frequencies. Both the direct and the inverse problems are solved. In the former case, the impedance of similar sound-absorbent liners is determined from their geometric parameters. In the latter case, the parameters of sound-absorbent liners are found that ensure a maximum sound absorption in a specified frequency range or a maximum noise reduction in a duct covered by composite sound-absorbent liners. Comparison shows close agreement between experimental and calculated impedance characteristics of composite sound-absorbent liners.