

АТМОСФЕРНАЯ И ВОЗДУШНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.2.532

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОМОГЕННОГО ТИПА ДЛЯ КАНАЛОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2009 г. А. Ф. Соболев, В. Г. Ушаков, Р. Д. Филиппова

Филиал ФГУП ЦАГИ “Московский комплекс ЦАГИ”

107005 Москва, ул. Радио 17

E-mail: sobaf@yandex.ru; velobosaf@gmail.com

Поступила в редакцию 5.08.08 г.

В применении к каналам авиационных двигателей исследован новый способ расширения спектра частот звукопоглощения за счет использования специальных гомогенных материалов с жесткой структурой. Для существенного расширения возможностей гомогенного материала впервые предложено использовать его сквозную или несквозную перфорацию. Разработана теория звукопоглощающей конструкции с гомогенным материалом при наличии сквозной перфорации, которая позволяет на основе волновых параметров исходного материала, вычислять волновые параметры и импеданс модифицированной конструкции. На основании созданной теории можно рассчитать импеданс любой достаточно сложной конструкции, состоящей из слоев разной толщины, отличающихся процентом перфорации и диаметром отверстий. Проведены расчеты импеданса и коэффициента звукопоглощения для однослойных и двухслойных образцов. Получено хорошее согласие теории и эксперимента.

PACS: 43.50.Gf, 43.55.Dt

В настоящее время для снижения шума, распространяющегося по каналам авиационного двигателя, применяются резонансные звукопоглощающие конструкции (ЗПК), включающие перфорированный лист и воздушную полость за ним с сотовым наполнителем [1], [2]. Применение таких конструкций оказалось плодотворным. Достаточно сказать, что с помощью однослойных сотовых ЗПК, установленных в воздухозаборнике и канале наружного контура силовой установки самолета (СУ), были получены необходимые величины снижения шума для обеспечения отечественными самолетами требований Главы 3 стандарта ИКАО. Активно разрабатываемые в последнее время двухслойные ЗПК второго поколения позволили обеспечить самолетам семейств “Ту” и “Ил” выполнение требований Главы 4 стандарта ИКАО по шуму на местности [3].

Вместе с тем, дальнейшее повышение эффективности снижения шума связано с необходимостью расширения частотного спектра шумоглушения как в область низких, так и в область высоких частот без увеличения площади ЗПК. Первый способ решения данной задачи — это увеличение числа слоев резонансной конструкции, а также использование в качестве поглощающего слоя микропористой сетки вместо перфорированного листа [4]. Перспективно также использование так называемых комбинированных ЗПК, включающих несколько резонаторов с различными собственными частотами [5]. Однако следует иметь в

виду, что все эти мероприятия приводят к конструктивному усложнению ЗПК. Второй способ решения данной задачи — это использование специально подобранных высокотемпературных пористых гомогенных материалов — объемных поглотителей. Конструкции на основе гомогенного материала могут обладать максимально широкополосной характеристикой коэффициента звукопоглощения в силу малой присоединенной массы. Кроме того, поглощающие свойства гомогенной конструкции не зависят или слабо зависят от уровня звукового давления.

В силу привлекательности гомогенных материалов по звукопоглощающим свойствам делались неоднократные попытки их внедрения в систему шумоглушения авиационного двигателя. Наиболее известные исследования, проведенные в недавнем прошлом, посвящены объемному звукопоглощающему материалу “Кевлар”. В частности, в воздухозаборнике двигателя JT15D были установлены ЗПК на основе этого материала и проведены всесторонние испытания [6]. Было получено снижение шума в широкой полосе частот с максимумом на частоте первой гармоники в направлении максимального излучения шума. Однако этот материал имеет недостаточно высокую температуру эксплуатации и может устанавливаться только в холодных частях двигателя. В работе [7] представлены результаты исследования нового высокотемпературного материала на основе керамики в виде пустотелых сферических

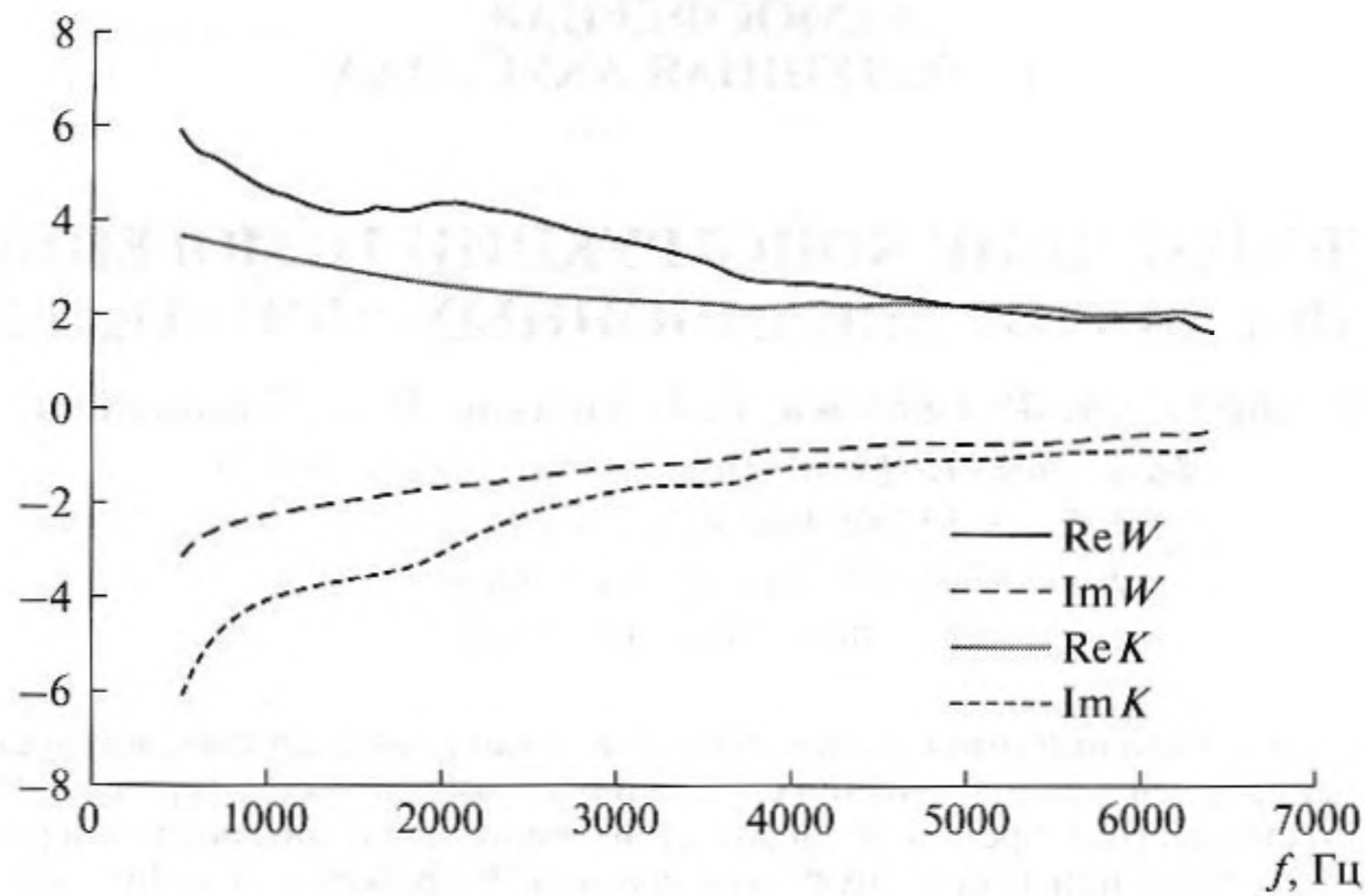


Рис. 1. Волновое сопротивление (W) и постоянная распространения (K) гомогенного материала ТЗМ-23М.

шариков с множеством отверстий на поверхности. Было установлено, что по ширине спектра поглощения и величине снижения шума он не уступает традиционным низкотемпературным объемным поглотителям. В работе [8] был исследован композиционный волокнистый материал на основе кварцевых и окись алюминиевых нитей в применении к горячему контуру авиационного двигателя. Образцы из этого материала обладают легким весом, высокой пористостью (до 96%), имеют малый размер пор и, несмотря на это, обладают хорошей прочностью. Авторы оценили этот материал как очень перспективный для использования не только в горячих частях авиационного двигателя, но и в воздухозаборнике, и канале наружного контура при решении проблем по прочности и гигроскопичности. Представляет интерес также работа, представленная на 12-ой зарубежной конференции по аэроакустике [9], в которой приведены результаты исследования высокопористого поглощающего материала на основе углерода и графита.

Из анализа известных работ по высокотемпературным гомогенным материалам следует, что круг материалов очень ограничен. Он формируется жесткими требованиями, предъявляемыми к данным материалам, определяемыми условиями работы в авиационном двигателе. В отличие от резонансных сотовых ЗПК, где проблема в основном чисто аэроакустическая, здесь проблема комплексная, требующая решения, как акустических задач, так и задач по прочности, влагустойчивости, противодействию неблагоприятному воздействию продуктов сгорания и т.д. Отсюда следует и относительно малое количество опубликованных работ.

На основании поискового исследования нами были выбраны три типа материала, наиболее под-

ходящих по весовым и акустическим свойствам с точки зрения их использования в каналах авиационного двигателя. Это высокопористые материалы (пористость от 60% до 94%, в зависимости от типа) с жесткой структурой на основе пористого литого алюминия, вспененного углерода, а также теплозащитного материала ТЗМ-23М на основе кремнеземного волокна. Средняя плотность последнего составляет 150–180 кг/м³, пористость 90–94%, диапазон рабочих температур от –150°С до 1100°С. Все эти материалы выпускаются отечественными предприятиями. По результатам измерений на интерферометре высоких уровней определялись волновые параметры (комплексное волновое сопротивление, комплексная постоянная распространения), нормальный импеданс и коэффициент звукопоглощения. В данной статье представлены результаты исследований материала ТЗМ-23М [10].

Анализ экспериментальных данных исследуемых образцов на основе выбранных материалов показывает, что эти материалы обладают хорошими звукопоглощающими свойствами в области средних и высоких частот. На рис. 1 представлены частотные зависимости действительной и мнимой частей удельного волнового сопротивления W (отнесенного к ρc воздуха), а также действительной и мнимой частей постоянной распространения K , отнесенной к волновому числу в воздухе, материала ТЗМ-23М, полученные на основании результатов испытаний. Представленные частотные зависимости имеют вид монотонных кривых, действительная часть которых приближается к двум, а мнимая часть к нулю. Это означает, что при увеличении частоты волновое сопротивление материала уменьшается и стремится к $2\rho c$ воздуха, скорость звука при этом уве-

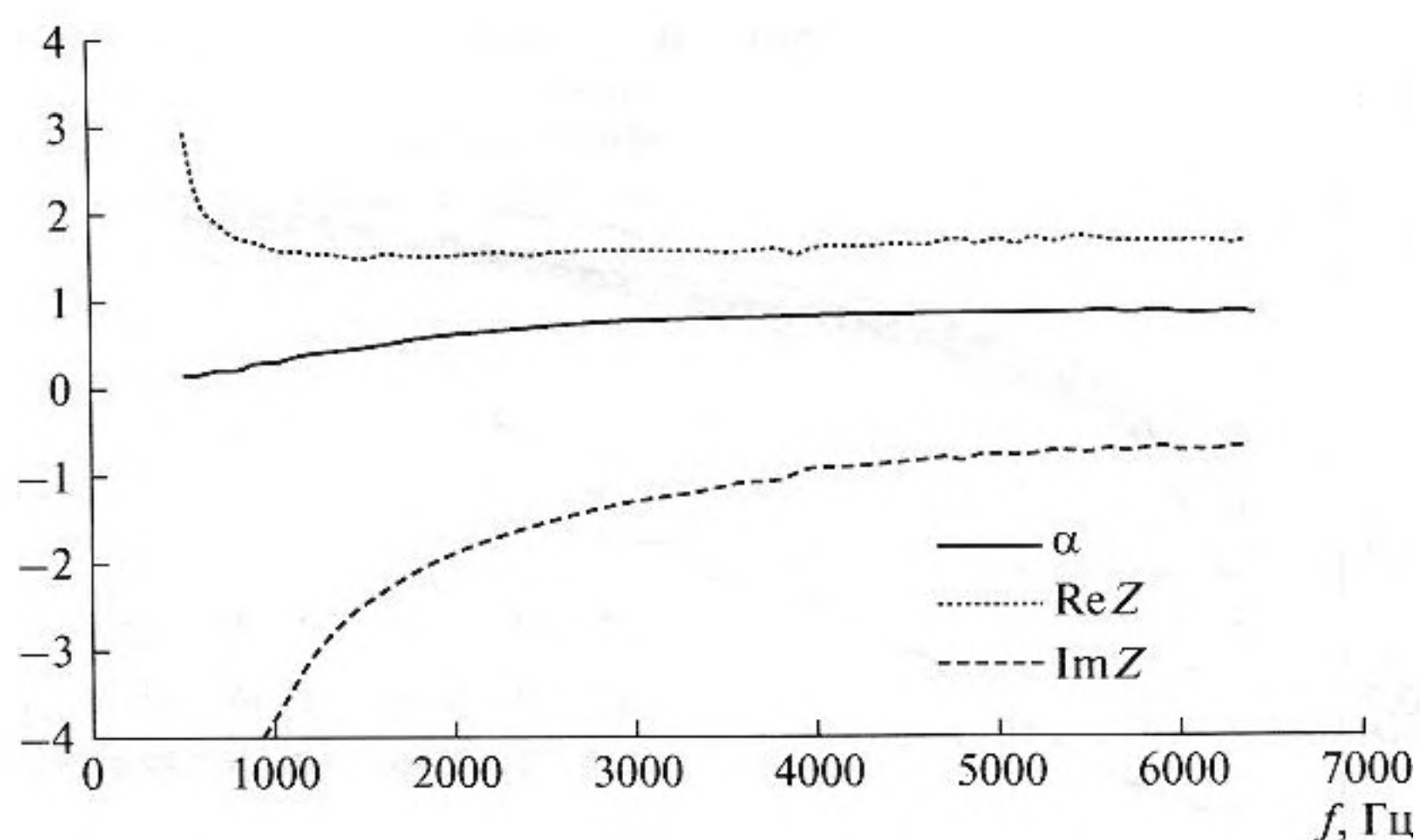


Рис. 2. Импеданс (Z) и коэффициент звукопоглощения (α) образца гомогенной ЗПК толщиной 10 мм, расположенной на жесткой стенке.

личивается и стремится к $c/2$. Это также означает, что коэффициент звукопоглощения этого материала не имеет верхней граничной частоты, т.е. на любой сколь угодно большой частоте коэффициент звукопоглощения остается достаточно большим (но не максимально возможным). На рис. 2 представлены коэффициент звукопоглощения (α), действительная ($\text{Re } Z$) и мнимая ($\text{Im } Z$) части импеданса образца этого материала толщиной 10 мм, расположенного на жесткой стенке. Из этого рисунка видно, что в области высоких частот коэффициент звукопоглощения приближается к единице и остается достаточно большим на сколь угодно большой частоте. Однако в области частот ниже 2000 Гц коэффициент звукопоглощения резко уменьшается и стремится к нулю при уменьшении частоты.

Очевидно, что для увеличения звукопоглощения в области низких частот необходимо увеличивать толщину образца. Однако, как показали исследования, нельзя существенно продвинуться в область низких частот только за счет увеличения толщины образца, поскольку быстро наступает так называемый “эффект насыщения”. Он заключается в том, что при равномерном увеличении толщины образца, например с 5 мм, соответствующий прирост ширины полосы Δf , где $\alpha = 0.6 - 1$, в область низких частот не является равномерным. Каждое последующее увеличение толщины приводит к все меньшему приросту Δf . Существует, таким образом, предельная толщина конструкции, дальнейшее увеличение которой бессмысленно. На рис. 3, на котором представлены частотные зависимости коэффициента звукопоглощения при различной толщине образцов, демонстрируется такой процесс “насыщения”. Из этого рисунка видно, что конструкции толщиной более 20 мм исследуемого материала

уже не дают расширения спектра звукопоглощения в область низких частот. Очевидно, что прирост толщины образца будет приводить к расширению спектра звукопоглощения только до тех пор, пока звуковая волна, которая экспоненциально затухает в материале, будет “чувствовать” заднюю стенку. Иными словами, предельная толщина конструкции — это такая толщина, при которой отраженной от задней стенки волной можно пренебречь, как экспоненциально малой величиной.

Из рис. 3 видно, что нижняя граничная частота исследуемого материала, где $\alpha \geq 0.6$ находится в области частот 1000–2000 Гц. Очевидно, что для уменьшения нижней граничной частоты необходимо с увеличением толщины одновременно уменьшать плотность материала, т.е. фактически создавать новый материал, а это, как правило, трудоемкая задача.

Возможны два пути расширения спектра звукопоглощения в область низких частот без изменения структуры материала. Первый путь — это располагать достаточно тонкий слой материала не на жестком основании, а на сотовом воздушном промежутке. При этом может уменьшиться верхняя граничная частота. Вторым путем — это впервые нами предложенная сквозная или несквозная перфорация гомогенного материала с заданными диаметром отверстий и процентом перфорации. В этом случае мы не уменьшаем верхнюю граничную частоту. При этом мы придаем гомогенным конструкциям функцию управляемости. Использование перфорации открывает широкие возможности по управлению импедансными характеристиками гомогенного материала. Действительно, добавляя к собственному импедансу гомогенного материала импеданс отверстий, можно исправить недостатки импедансных характеристик исходного гомогенного материала

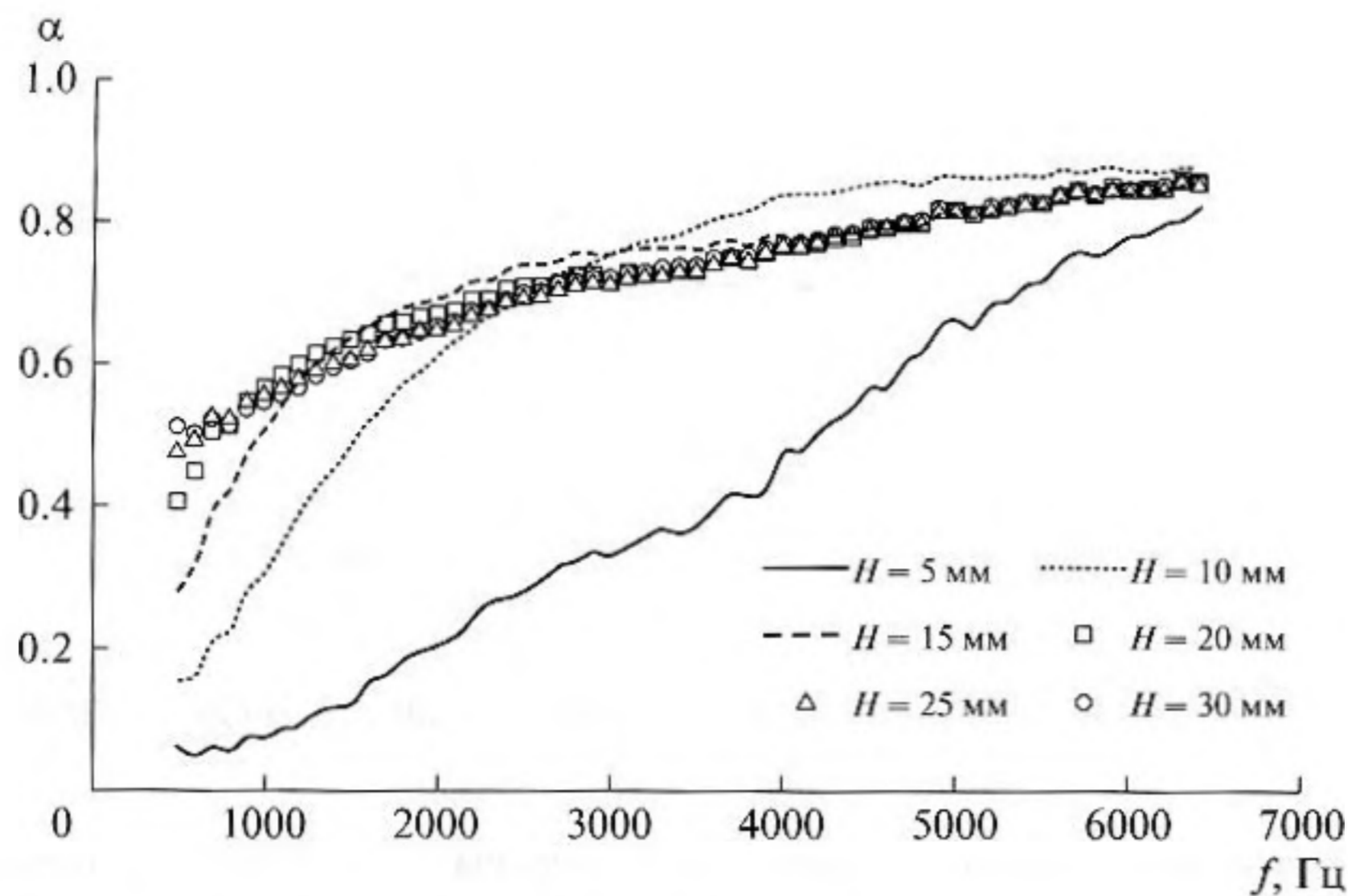


Рис. 3. Коэффициент звукопоглощения (α) гомогенной ЗПК при различной толщине материала (H).

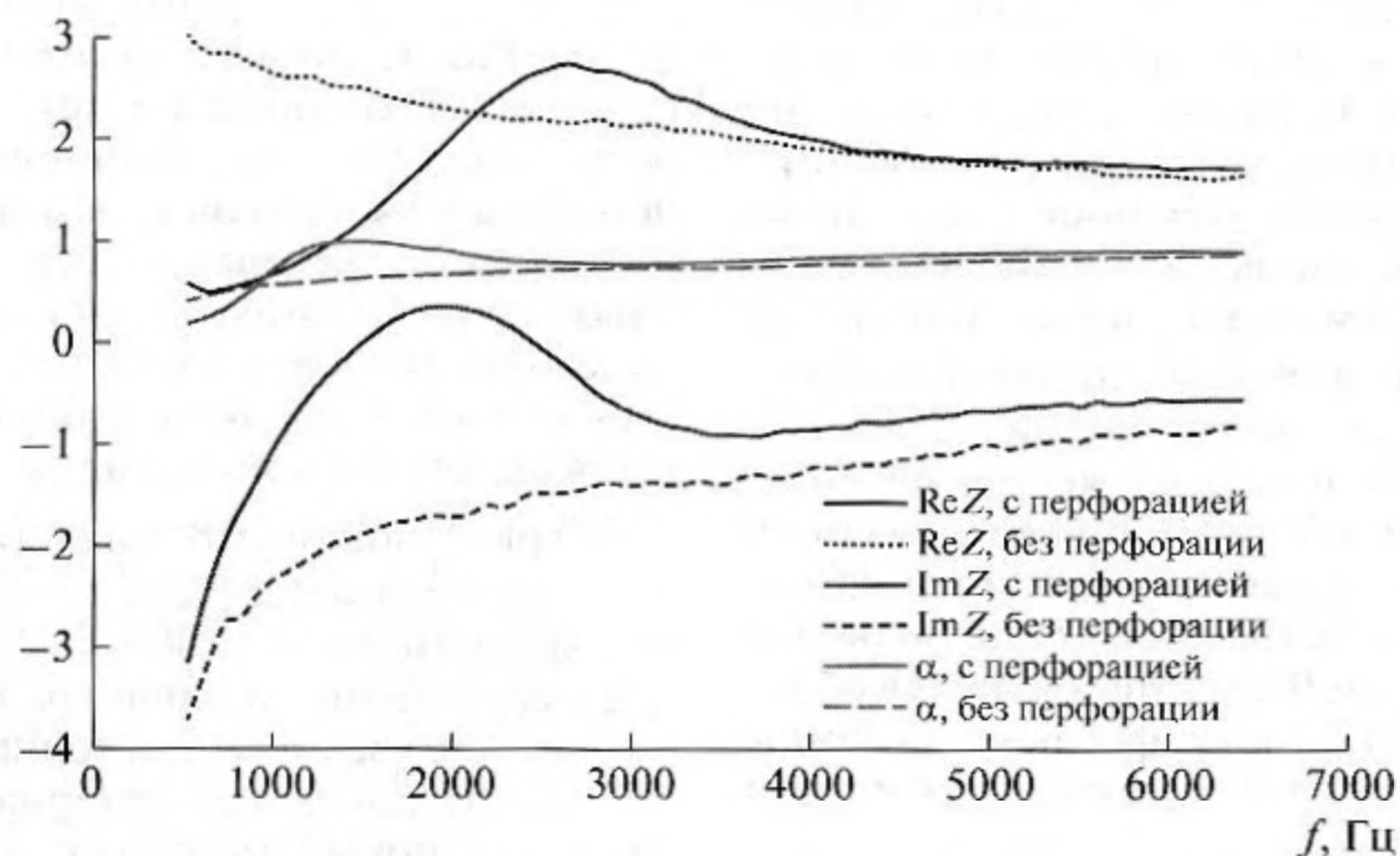


Рис. 4. Частотные зависимости импеданса (Z) и коэффициента звукопоглощения (α) образца толщиной 20 мм с перфорацией и без перфорации.

и тем самым улучшить его поглощающие свойства. Кроме того, и это, по-видимому, самое важное, используя многослойные гомогенные конструкции разной толщины слоев, с разным процентом перфорации и диаметром отверстий, можно приблизить реальный импеданс гомогенной конструкции к оптимальному импедансу в канале с потоком и получить на этой основе максимально широкополосную характеристику затухания звука. В качестве примера эффективности использования перфорации исходного гомогенного образца, на рис. 4 приведено сравнение импедансных характеристик двух образцов толщиной 20 мм, один из которых отперфорирован сквозной перфорацией с процентом перфорации $F = 6.2\%$, а второй оставлен без изменения. Из сравнения видно, что на низких частотах за счет

перфорации сильно уменьшилось сопротивление образца и упругие свойства материала, что привело к подъему мнимой части импеданса. Эти изменения оказались благоприятными для резкого увеличения коэффициента звукопоглощения α в области низких частот (рис. 4). Важно отметить, что в области средних и высоких частот сквозная перфорация практически не изменила импедансные характеристики и, следовательно, коэффициент звукопоглощения. В результате ширина полосы коэффициента звукопоглощения на уровне 0.8 значительно расширилась.

В связи с тем, что перфорация гомогенного материала с жесткой структурой приводит к существенному изменению его импедансных характеристик, представлял интерес рассмотреть соответствующую теоретическую задачу определе-

ния импеданса гомогенной конструкции, в которой проделаны отверстия вдоль нормали к лицевой поверхности. Для описания распространения звука в материале с жесткой структурой использованы уравнения Цвиккера и Костена [11].

Рассмотрим ячейку гомогенной перфорированной конструкции толщиной H с входной площадью в виде круга радиуса b , в котором по центру проделано отверстие радиуса a . Звук распространяется через отверстие и через толщу образца параллельно отверстию. Предположим, что на задней стороне образца расположена нагрузка с импедансом Z_n . Уравнения распространения звука в гомогенном материале с жесткой структурой имеют вид [11]

$$\sigma \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \tag{1}$$

$$\rho_e \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + R\mathbf{v} + \nabla p = 0, \tag{2}$$

где ρ — флуктуации плотности, σ — пористость, \mathbf{v} — объемная скорость, ρ_0 — плотность воздуха в порах, R — удельное сопротивление, p — акустическое давление. Эффективная плотность обычно берется в виде $\rho_e = k_s \rho_0 / \sigma$, где k_s — структурный фактор, учитывающий кажущееся увеличение плотности воздуха, обусловленное структурными свойствами материала. Связь между флуктуациями плотности и давления определяется уравнением состояния $p = \rho c_e^2$. Из уравнений (1) и (2) получим волновое уравнение относительно флуктуации давления. Для этого выразим в уравнении (1) флуктуации плотности через флуктуации давления

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{c_e^2}{\sigma} \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{3}$$

и применим операцию ∇ к уравнению (2). В результате получим

$$\rho_e \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{v})}{\partial t} + R \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla^2 p = 0. \tag{4}$$

Продифференцируем уравнение (3) по времени

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{c_e^2}{\sigma} \rho_0 \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{v})}{\partial t} = 0. \tag{5}$$

Из уравнений (3)–(5) легко получается следующее волновое уравнение распространения звука в гомогенной структуре

$$\nabla^2 p = \frac{\sigma \rho_e}{\rho_0 c_e^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\sigma R}{\rho_0 c_e^2} \frac{\partial p}{\partial t}. \tag{6}$$

Решение уравнения (6) ищем в виде гармонической зависимости от времени $\sim \exp(j\omega t - j\xi z)$. В этом случае уравнение (6) принимает вид

$$\nabla_{x,y}^2 p + (\gamma^2 - \xi^2) p = 0, \tag{7}$$

где

$$\gamma^2 = \frac{\omega^2}{c_e^2} \left(\frac{\sigma \rho_e}{\rho_0} - \frac{j\sigma R}{\rho_0 \omega} \right).$$

Входящие в уравнение (7) структурные параметры гомогенной конструкции ρ_e, c_e, σ, R определяются на основании измерений волновых параметров $W = p/v_z$ и γ на интерферометре, где v_z — осевая компонента акустической скорости. Из уравнений (1) и (2) имеем

$$\sigma j\omega p / c_e^2 - \rho_0 j\gamma v_z = 0, \quad \rho_e j\omega v_z + R v_z - j\gamma p = 0.$$

Отсюда для волновых параметров имеем следующие соотношения

$$\frac{W}{\gamma} = \frac{c_e^2 \rho_0}{\sigma \omega}, \tag{8}$$

$$W\gamma = \rho_e \omega - jR. \tag{9}$$

Соотношения (8), (9) позволяют определить почти все структурные характеристики звукопоглощающего материала за исключением пористости. Из этих уравнений имеем

$$R = -\text{Im}(W\gamma),$$

$$\frac{k_s}{\sigma} = \frac{\text{Re}(W\gamma)}{\omega \rho_0},$$

$$c_e^2 = \frac{W\sigma\omega}{\gamma\rho_0} = \frac{\sigma\omega^2}{\gamma^2} \left(\frac{\rho_e}{\rho_0} - \frac{jR}{\rho_0\omega} \right).$$

Для определения пористости необходимо воспользоваться дополнительными измерениями.

В дальнейшем мы предполагаем, что характерный поперечный размер элемента конструкции меньше длины волны. В этом случае азимутальной зависимостью в уравнении (7) можно пренебречь и лапласиан в цилиндрической системе координат принимает вид $\nabla_{x,y}^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right)$. В этом случае решение уравнения (7) записывается в виде

$$p = AJ_0(\chi r) + BY_0(\chi r),$$

где

$$\chi^2 = \gamma^2 - \xi^2. \tag{10}$$

Граничное условие на цилиндрической границе $r = b$ задается в виде $\partial p / \partial r |_{r=b} = 0$. Из этого условия имеем

$$B = -AJ'_0(\chi b) / Y'_0(\chi b).$$

Таким образом, поле в образце можно представить в виде

$$p = A(J_0(\chi r) - QY_0(\chi r)) \exp(-j\xi z), \tag{11}$$

где $Q = J'_0(\chi b) / Y'_0(\chi b)$.

Осевая и радиальная компоненты акустической скорости определяются из уравнения (2)

$$\rho_e j\omega v_z + Rv_z = -\partial p / \partial z, \quad \rho_e j\omega v_r + Rv_r = -\partial p / \partial r.$$

Отсюда

$$v_z = \frac{A\xi(J_0(\chi r) - QY_0(\chi r))\exp(-j\xi z)}{\rho_e \omega - jR},$$

$$v_r = \frac{Aj\chi(J_0'(\chi r) - QY_0'(\chi r))\exp(-j\xi z)}{\rho_e \omega - jR}. \quad (12)$$

Рассмотрим поле в трубке радиуса a . Решение уравнения Гельмгольца в трубке

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0,$$

где $k = \omega/c$, ищется в виде

$$p = CJ_0(\chi_1 r)\exp(-j\xi z). \quad (13)$$

Здесь

$$\chi_1^2 = k^2 - \xi^2. \quad (14)$$

Осевая и радиальная компоненты акустической скорости в трубке имеют соответственно вид

$$v_z = \xi CJ_0(\chi_1 r)\exp(-j\xi z) / \rho\omega,$$

$$v_r = j\chi_1 CJ_0'(\chi_1 r)\exp(-j\xi z) / \rho\omega. \quad (15)$$

Из условия непрерывности давления при $r = a$ имеем из (11) и (13)

$$A(J_0(\chi a) - QY_0(\chi a)) = CJ_0(\chi_1 a), \quad (16)$$

Аналогично, из условия непрерывности нормальной скорости v_r при $r = a$ имеем из (12) и (15)

$$\frac{Aj\chi(J_0'(\chi a) - QY_0'(\chi a))}{\rho_e \omega - jR} = \frac{j\chi_1 CJ_0'(\chi_1 a)}{\rho\omega}. \quad (17)$$

Определив из уравнения (16)

$$C = \frac{A(J_0(\chi a) - QY_0(\chi a))}{J_0(\chi_1 a)},$$

и подставив в уравнение (17), получим уравнение для определения собственных значений ξ_n

$$\frac{\chi_1 J_0'(\chi_1 a)}{\rho\omega J_0(\chi_1 a)} = \frac{\chi(J_0'(\chi a) - QY_0'(\chi a))}{(\rho_e \omega - jR)(J_0(\chi a) - QY_0(\chi a))}. \quad (18)$$

С учетом соотношения (9) уравнение (18) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\chi_1 J_0'(\chi_1 a)}{\rho\omega J_0(\chi_1 a)} = \frac{\chi(J_0'(\chi a) - QY_0'(\chi a))}{W\gamma(J_0(\chi a) - QY_0(\chi a))}. \quad (19)$$

Примечательно то, что уравнение (19) не содержит в явном виде структурных параметров поглощающего материала. В уравнение (19) входят только волновые параметры W и γ , которые могут быть определены из эксперимента. В дальнейшем удобно эти параметры представить в безразмерном виде

$\tilde{W}(\omega) = W(\omega)/\rho c$, $\tilde{\gamma}(\omega) = \gamma(\omega)/k$. В результате получим с учетом того, что $J_0'(\chi a) = -J_1(\chi a)$, $Y_0'(\chi a) = -Y_1(\chi a)$:

$$\frac{\chi_1 J_1(\chi_1 a)}{J_0(\chi_1 a)} = \frac{\chi}{\tilde{W}(\omega)\tilde{\gamma}(\omega)} \times \frac{(J_1(\chi a)Y_1(\chi b) - Y_1(\chi a)J_1(\chi b))}{(J_0(\chi a)Y_1(\chi b) - Y_0(\chi a)J_1(\chi b))}. \quad (20)$$

Поле в образце конечной длины можно представить в виде суммы прямых и отраженных волн

$$p = \sum_n C_n(r)(\exp(-j\xi_n z) + D_n \exp(j\xi_n z)), \quad (21)$$

где

$$C_n = C \begin{cases} J_0(\chi_{1,n} r), & 0 \leq r \leq a, \\ \frac{J_0(\chi_{1,n} a)}{J_0(\chi_n a) - QY_0(\chi_n a)} (J_0(\chi_n r) - QY_0(\chi_n r)), & a \leq r \leq b, \end{cases} \quad (22)$$

C — произвольная постоянная, $\chi_{1,n}$, χ_n , ξ_n определяются из системы уравнений (14), (10), (20). Выражения для осевой компоненты скорости в образце и отверстии в соответствии с уравнениями количества движения имеют вид соответственно

$$v_z = \begin{cases} \frac{j}{\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial z}; & 0 \leq r < a, \\ \frac{j}{(\omega\rho_e - jR)} \frac{\partial p}{\partial z}; & a \leq r < b. \end{cases} \quad (23)$$

Как видно из выражения (23), осевая скорость не является непрерывной при $r = a$, если не учитывать вязкость. Осевая компонента скорости в образце с учетом выражения для давления (22) принимает вид

$$v_z = \sum_n E_n(r)(\exp(-j\xi_n z) - D_n \exp(j\xi_n z)), \quad (24)$$

где

$$E_n = C \begin{cases} \xi_n J_0(\chi_{1,n} r) / \omega\rho; & 0 \leq r \leq a, \\ \frac{\xi_n J_0(\chi_{1,n} a)(J_0(\chi_n r) - QY_0(\chi_n r))}{W\gamma(J_0(\chi_n a) - QY_0(\chi_n a))}; & a \leq r \leq b. \end{cases} \quad (25)$$

Полученные соотношения (21)–(25) показывают, что поле в образце при наличии сквозного отверстия можно выразить только через волновые параметры образца W и γ в отсутствие отверстия и геометрические параметры образца при наличии отверстия.

В дальнейшем для простоты мы предполагаем одномерное распространение звука в направлении оси z , тем самым мы пренебрегаем всеми корнями уравнения (20), кроме нулевого. Проин-

тегрируем (21) по площади ячейки (множитель $\exp(-j\xi_n z) + D_n \exp(j\xi_n z)$ опущен):

$$\int_S p dS = C2\pi a \left(\frac{J_1(\chi_{1,0} a)}{\chi_{1,0}} - \frac{J_0(\chi_{1,0} a)(J_1(\chi_0 a) - QY_1(\chi_0 a))}{\chi_0(J_0(\chi_0 a) - QY_0(\chi_0 a))} \right),$$

но поскольку из уравнения (19) следует, что

$$\frac{(J_1(\chi_0 a) - QY_1(\chi_0 a))}{(J_0(\chi_0 a) - QY_0(\chi_0 a))} = \frac{W(\omega)\gamma(\omega)\chi_{1,0}J_1(\chi_{1,0} a)}{\rho_0 c k \chi_0 J_0(\chi_{1,0} a)},$$

то

$$\int_S p dS = C \frac{2\pi a}{\chi_{1,0}} J_1(\chi_{1,0} a) \left(1 - \frac{W(\omega)\gamma(\omega)\chi_{1,0}^2}{\chi_0^2 \rho_0 c k} \right). \quad (26)$$

Точно так же

$$\int_S v_x dS = C2\pi a \xi_0 \left(\frac{J_1(\chi_{1,0} a)}{\chi_{1,0} \omega \rho} - \frac{J_0(\chi_{1,0} a)(J_1(\chi_0 a) - QY_1(\chi_0 a))}{\chi_0 W(\omega)\gamma(\omega)(J_0(\chi_0 a) - QY_0(\chi_0 a))} \right)$$

или

$$\int_S v_x dS = C \frac{2\pi a \xi_0}{\chi_{1,0} \omega \rho} J_1(\chi_{1,0} a) \left(1 - \frac{\chi_{1,0}^2}{\chi_0^2} \right). \quad (27)$$

По определению средний импеданс нагрузки при $z = H$ выражается следующим образом:

$$Z_n = \frac{\int_S p dS}{\int_S v_x dS} \Bigg|_{z=H}. \quad (28)$$

Подставив (26) и (27) в (28), получим

$$Z_n = Z_0 \frac{(\exp(-j\xi_0 H) + D_0 \exp(j\xi_0 H))}{(\exp(-j\xi_0 H) - D_0 \exp(j\xi_0 H))}, \quad (29)$$

где

$$Z_0 = \frac{k\rho c}{\xi_0} \left(1 - \frac{W(\omega)\gamma(\omega)\chi_{1,0}^2}{\chi_0^2 \rho c k} \right) \Bigg/ \left(1 - \frac{\chi_{1,0}^2}{\chi_0^2} \right). \quad (30)$$

Из равенства (29) определяется коэффициент D_0 :

$$D_0 = \exp(-2j\xi_0 h) \frac{(Z_n - Z_0)}{(Z_n + Z_0)}. \quad (31)$$

Входной импеданс образца при $z = 0$ определяется формулой (29), в которой принимается $H = 0$, а D_0 определяется из (31):

$$Z = Z_0 \frac{Z_n + jZ_0 \operatorname{tg}(\xi_0 H)}{jZ_n \operatorname{tg}(\xi_0 H) + Z_0}. \quad (32)$$

Очевидно, что Z_0 — осредненное по площади ячейки волновое сопротивление звукопоглощающего материала с учетом сквозного отверстия, а ξ_0 — постоянная распространения. При $Z_n \rightarrow \infty$,

что соответствует нагрузке в виде абсолютно жесткой стенки, выражение (32) принимает простой вид

$$Z = -jZ_0 \operatorname{ctg}(\xi_0 H).$$

Удобно от выражения (32) перейти к выражению, в котором все импедансы нормированы на $\rho_0 c$ воздуха:

$$\tilde{Z} = \tilde{Z}_0 \frac{\tilde{Z}_n + j\tilde{Z}_0 \operatorname{tg}(\xi_0 H)}{j\tilde{Z}_n \operatorname{tg}(\xi_0 H) + \tilde{Z}_0},$$

где

$$\tilde{Z}_0 = \frac{k}{\xi_0} \left(1 - \frac{W(\omega)\tilde{\gamma}(\omega)\chi_{1,0}^2}{\chi_0^2} \right) \Bigg/ \left(1 - \frac{\chi_{1,0}^2}{\chi_0^2} \right).$$

Представляет интерес получить предельные соотношения для волнового сопротивления и волнового числа при радиусе отверстия, стремящемся к нулю и к радиусу ячейки. Предположим, что параметры образца таковы, что входящие в уравнение для определения собственных значений функции Бесселя и Неймана можно заменить асимптотиками, соответствующими большому аргументу. В этом случае уравнение (19) принимает вид

$$\frac{\chi_{1,0} J_1(\chi_{1,0} a)}{J_0(\chi_{1,0} a)} = -\frac{\rho_0 c k \chi_0}{W(\omega)\gamma(\omega)} \operatorname{tg}(\chi_0(b-a)). \quad (33)$$

При $a \rightarrow b$ правая часть в (33) мала и тангенс аргумента можно заменить самим аргументом. Отсюда следует, что мала и левая часть. Тогда функцию Бесселя можно разложить в ряд Тейлора и ограничиться первым членом разложения. При $a \rightarrow 0$ мала левая часть и, следовательно, должна быть мала и правая часть. Таким образом, для обоих предельных случаев можно записать

$$\chi_{1,0}^2 a = -\frac{2\rho_0 c k \chi_0^2 (b-a)}{W(\omega)\gamma(\omega)}. \quad (34)$$

Воспользуемся равенствами (14) и (10) для исключения $\chi_{1,0}$ и χ_0 в (34). В результате для постоянной распространения ξ_0 можно получить приближенное выражение

$$\xi_0^2 = \left[k^2 + \frac{2\rho_0 c k \gamma(\omega)(b-a)}{W(\omega)a} \right] \Bigg/ \left[1 + \frac{2\rho_0 c k (b-a)}{W(\omega)\gamma(\omega)a} \right]. \quad (35)$$

Получим приближенное выражение для волнового сопротивления в рассмотренных предельных случаях. Из уравнения (35) имеем

$$k^2 - \xi_0^2 = \frac{2\rho_0 c k (b-a)}{W\gamma a} (\xi_0^2 - \gamma^2),$$

т.е.

$$\chi_{1,0}^2 = -\chi_0^2 \frac{2\rho_0 c k (b-a)}{W\gamma a}. \quad (36)$$

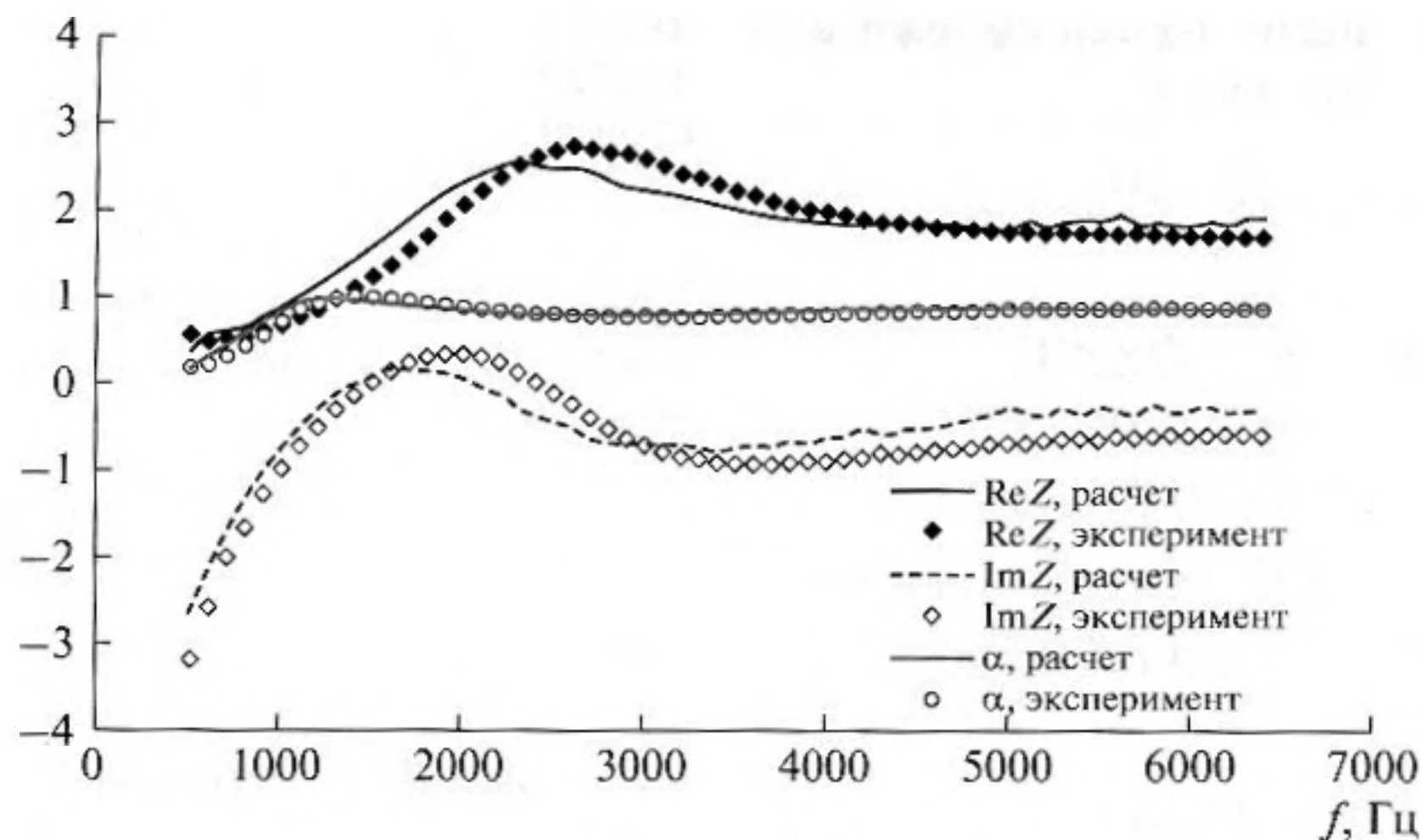


Рис. 5. Частотные зависимости импеданса и коэффициента звукопоглощения однослойной перфорированной конструкции: $H = 20$ мм, $F = 6.2\%$, $d = 2$ мм.

Подставим выражение (36) в выражение (30). В результате получим

$$Z_0 = \frac{k\rho c}{\xi_0} \left[1 + \frac{2(b-a)}{a} \right] / \left[1 + \frac{2\rho ck(b-a)}{aW(\omega)\gamma(\omega)} \right]. \quad (37)$$

Из (35) и (37) видно, что при $a \rightarrow b$ следует $\chi_1 \rightarrow 0$, $\xi_0 \rightarrow k$, $Z_0 \rightarrow \rho_0 c$, а при $a \rightarrow 0$ следует $\xi_0 \rightarrow \gamma(\omega)$, $\chi_{1,0}^2 \rightarrow -\frac{2\rho_0 ck \chi_0^2 b}{W(\omega)\gamma(\omega)a}$, $Z_0 \rightarrow W(\omega)$.

На практике довольно трудно выдержать расположение отверстий по центру ячейки. Если взаимодействием отверстий можно пренебречь, то можно считать, что $a = b\sqrt{F}$, где $F = a^2/b^2$ — процент перфорации отверстий. В этом случае уравнение (35) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\xi_0^2}{k^2} = \left[1 + \frac{2\tilde{\gamma}(\omega)(1-\sqrt{F})}{\tilde{W}(\omega)\sqrt{F}} \right] / \left[1 + \frac{2(1-\sqrt{F})}{\tilde{W}(\omega)\tilde{\gamma}(\omega)\sqrt{F}} \right],$$

а выражение (37) принимает вид

$$\tilde{Z}_0 = \frac{k}{\xi_0} \left[1 + \frac{2(1-\sqrt{F})}{\sqrt{F}} \right] / \left[1 + \frac{2(1-\sqrt{F})}{\tilde{W}(\omega)\tilde{\gamma}(\omega)\sqrt{F}} \right].$$

Выражение (32) для импеданса гомогенной конструкции со сквозной перфорацией является общим. На его основе могут быть получены выражения для импеданса достаточно сложных многослойных конструкций с различным соотношением толщин слоев и процентов перфорации в каждом слое. Частным случаем этой формулы является импеданс гомогенной конструкции на воздушной отслойке. Для этого достаточно в формуле (32) положить $Z_n = -j\rho c \cdot \cot(kh)$, где h — глубина воздушного промежутка. Частным случаем является также не сквозная перфорация образца. В этом случае в формуле (32) длину воздушных трубок следует считать равной h , а импеданс на-

грузки положить равным $Z_n = -jW \cot(\gamma H)$, где H — толщина неперфорированной части конструкции. При использовании многослойных конструкций нижний слой, как правило, устанавливается на жесткую стенку. При расчете импеданса многослойной конструкции начинать надо с самого нижнего слоя и при расчете импеданса на входе следующего слоя в качестве нагрузки брать импеданс нижнего слоя и так до самого верхнего слоя.

Центральным моментом определения импеданса является решение уравнения на собственные значения (19) или (20). Для этого была разработана соответствующая вычислительная процедура с использованием метода Ньютона. В качестве начального приближения были использованы приближенные формулы (35) и (37).

На основании полученных выражений разработан алгоритм и написана программа расчета импеданса многослойной конструкции (до трех слоев). Программа реализована на языке Фортран.

На рис. 5 приведено сравнение расчета и определенных экспериментально импеданса и коэффициента звукопоглощения однослойной конструкции толщиной 20 мм со сквозной перфорацией отверстиями диаметром 2 мм и процентом перфорации $F = 6.2\%$. Из сравнения видно, что во всей исследуемой области частот расчет удовлетворительно согласуется с экспериментом.

При исследовании двухслойных конструкций, слои в которых отличаются процентом сквозной перфорации, сразу возникает вопрос, как лучше расположить слои относительно друг друга, поскольку от их взаимного расположения зависит степень перекрытия отверстий и, следовательно, импеданс двухслойной конструкции. Экспериментально было показано, что импеданс двухслойной конструкции практически не зависит от

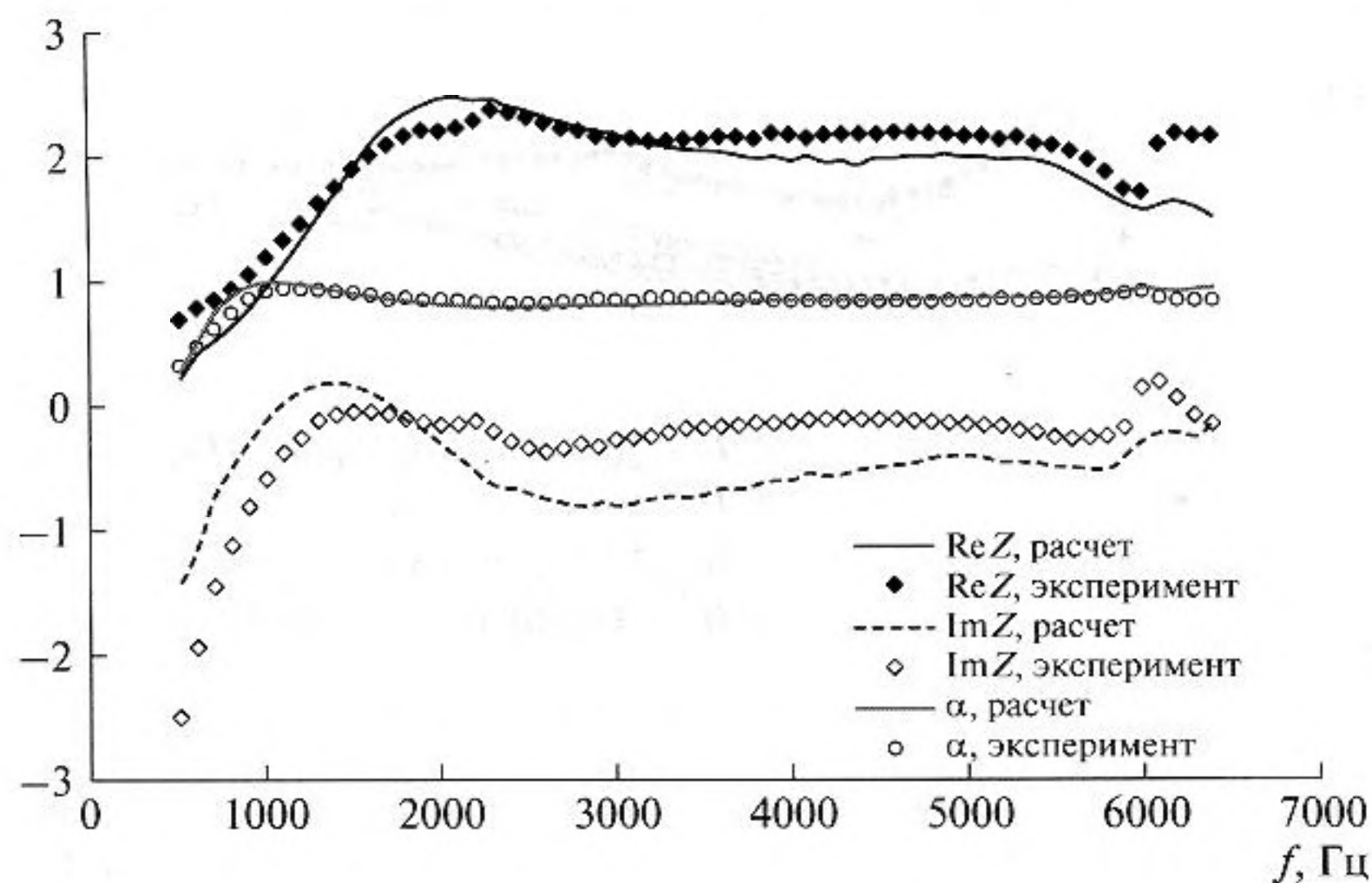


Рис. 6. Частотные зависимости импеданса и коэффициента звукопоглощения двухслойной перфорированной конструкции: $H_1 = 15$ мм, $F_1 = 10\%$, $d_1 = 3$ мм; $H_2 = 10$ мм, $F_2 = 5\%$, $d_2 = 2$ мм.

того, насколько существенно перекрываются отверстия при наложении слоев.

На рис. 6. представлено сравнение расчета и эксперимента для двухслойной конструкции с параметрами: $H_1 = 15$ мм, $F_1 = 10\%$, $d_1 = 3$ мм; $H_2 = 10$ мм; $F_2 = 5\%$, $d_2 = 2$ мм. Общая толщина ЗПК составляет 25 мм. При эксперименте слои были составлены таким образом, чтобы перекрытие отверстий было минимальным. Даже в этом случае можно считать, что расчет удовлетворительно согласуется с экспериментом. Нижняя граничная частота ширины полосы коэффициента звукопоглощения на уровне 0.8 равна 800 Гц, верхняя граничная частота, по крайней мере, больше 6000 Гц. Ширина полосы коэффициента звукопоглощения на уровне 0.8 составляет, по крайней мере, три октавы.

Таким образом, заменив однослойную однородную конструкцию толщиной 25 мм на двухслойную перфорированную конструкцию с такой же суммарной толщиной, мы можем существенно расширить спектр коэффициента звукопоглощения в область низких частот.

Представляет интерес сравнить коэффициент звукопоглощения исходной однородной гомогенной конструкции толщиной 20 мм, установленной на жесткой стенке, и конструкций с общей толщиной также 20 мм, в которых были выполнены мероприятия по расширению спектра. На рис. 7 представлены частотные зависимости коэффициента звукопоглощения: а) для гомогенного образца; б) для гомогенного образца толщиной 10 мм, расположенного на расстоянии 10 мм от жесткой стенки; в) перфорированного образца с процентом перфорации 6.2%; г) двухслойного образца с толщинами первого и второго слоев со-

ответственно 10 мм и 10 мм и процентом перфорации соответственно 10% и 5%. Из сравнения видно, что по величине коэффициента звукопоглощения и ширине спектра наиболее предпочтительна двухслойная перфорированная конструкция. Также хорошую эффективность обеспечивает однослойная перфорированная конструкция. Вместе с тем, использование многослойных конструкций, в которых тонкие слои звукопоглощающего материала (перфорированного или неперфорированного) чередуются с воздушными промежутками, существенно увеличивает возможности данного материала по расширению спектра коэффициента звукопоглощения и затухания в канале с потоком.

На практике гомогенный звукопоглощающий материал, вероятно, будет закрываться сверху или перфорированным листом, или микропористой сеткой с целью предохранения его от воздействия внешних негативных факторов, а также для увеличения прочности, ухудшающих акустические свойства материала. Известно, что перфорированный лист или сетка создают дополнительное акустическое сопротивление, которое изменяет звукопоглощающие свойства конструкции в целом. Чтобы проверить, насколько сильно влияет перфорированная пластина на импеданс образцов, был проведен цикл экспериментов, когда образцы сверху закрывались перфорированной пластиной с различным процентом перфорации.

На рис. 8 представлены данные измерений импеданса двухслойной гомогенной ЗПК с параметрами: $H = (15/10)$ мм, $F = (10/5)\%$, $d = (3/2)$ мм (первое число в скобках соответствует первому слою, а второе число — второму слою) для случаев без защитного покрытия и двух вариантов защитного покрытия. В качестве защитного покрытия

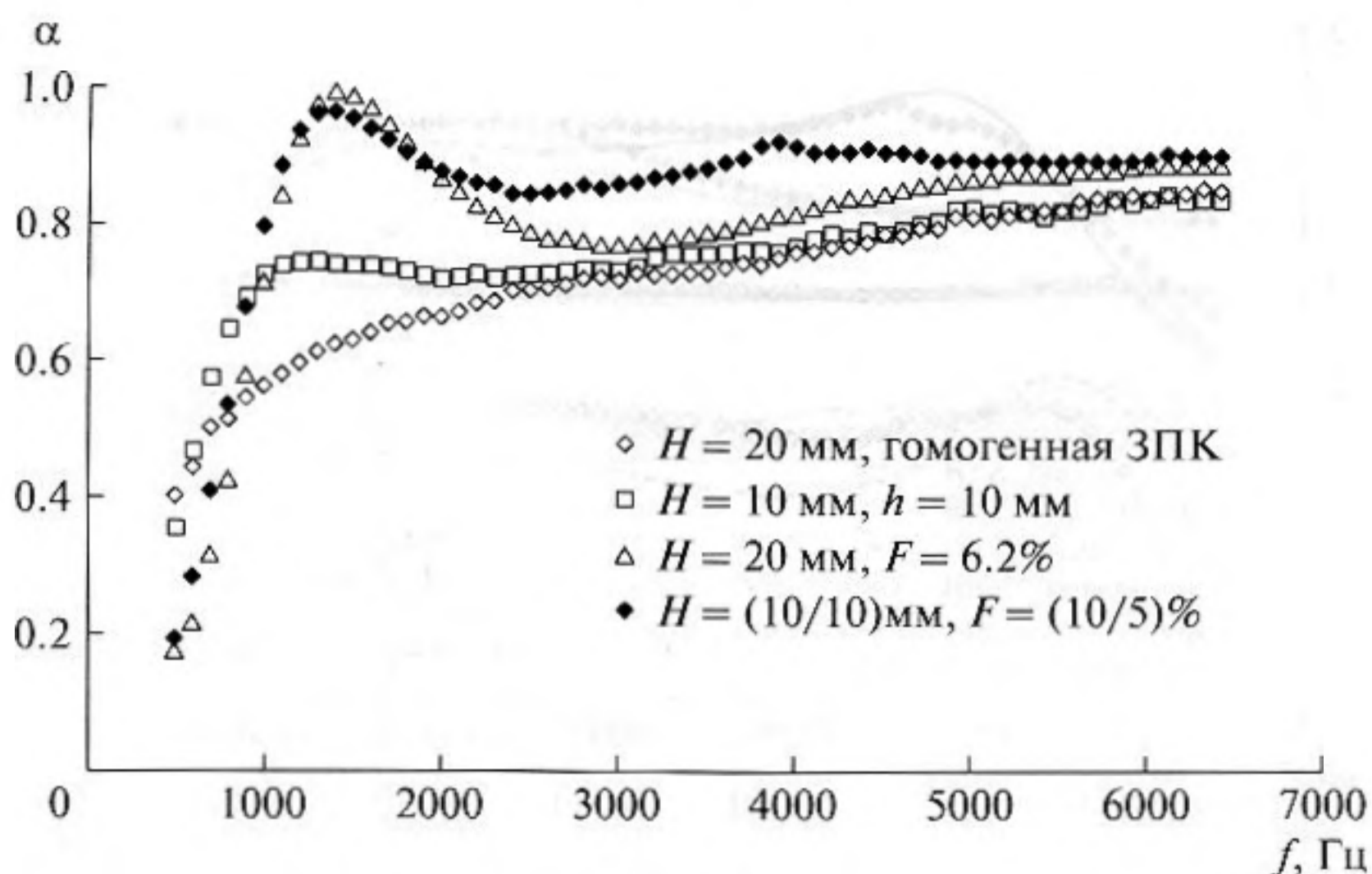


Рис. 7. Сравнение коэффициента звукопоглощения четырех вариантов ЗПК при одинаковой суммарной толщине.

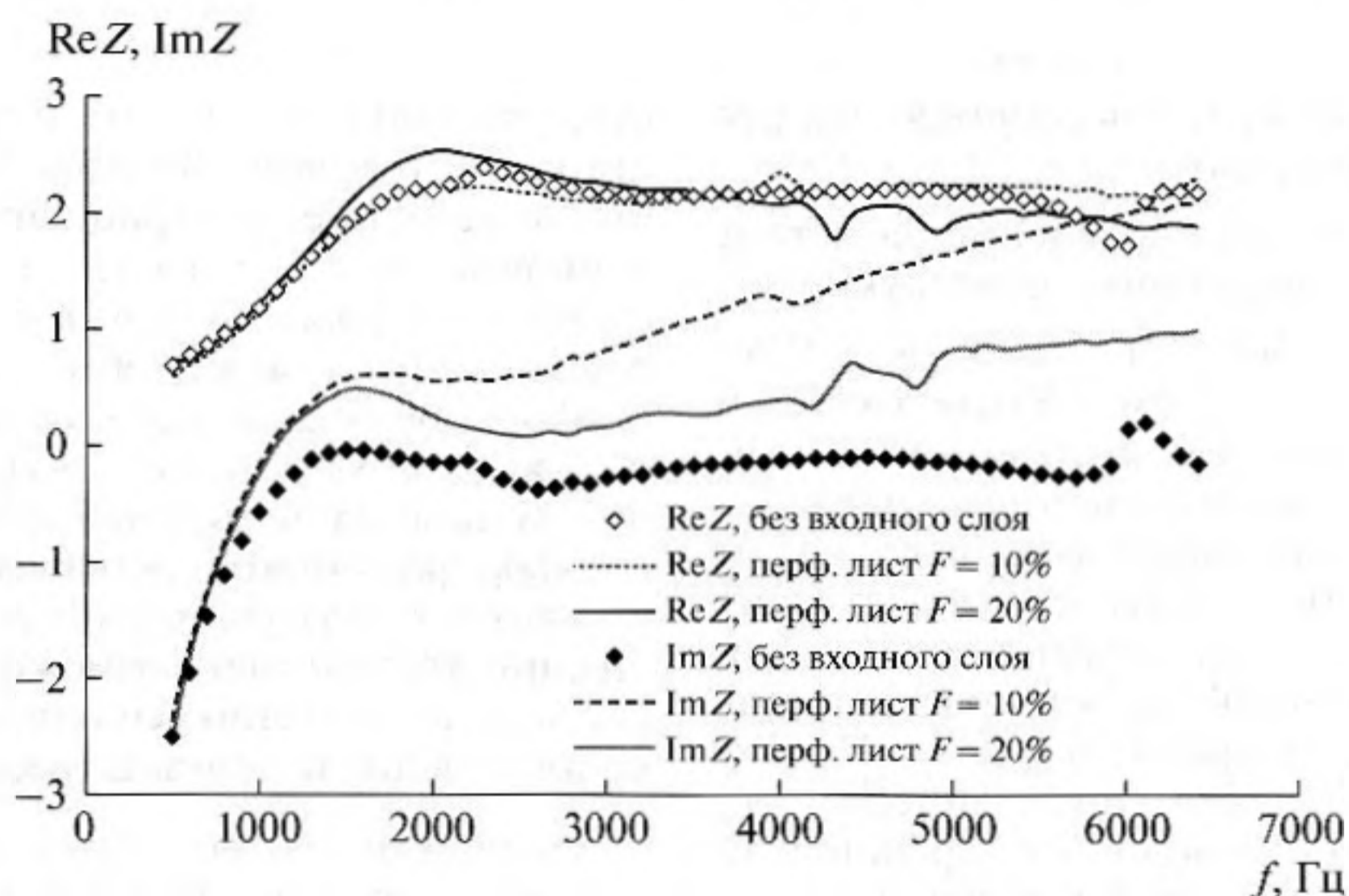


Рис. 8. Влияние лицевого перфорированного листа на импеданс двухслойной однородной ЗПК.

использовались перфорированные листы толщиной 0.5 мм с диаметром отверстий 3 мм и 5 мм и процентом перфорации соответственно 10% и 20%. Следует заметить, что отверстия перфорированной пластины специально не совмещались с отверстиями однородного образца.

Из полученных результатов видно, что влияние перфорированного листа на действительную часть импеданса незначительно. Перфорированный лист изменяет реактивную составляющую импеданса, а именно, увеличивает массовую составляющую, причем при малом проценте перфорации изменение реактивной составляющей существенно. Видно, что мнимая часть импеданса увеличивается с ростом частоты. В результате уменьшается коэффициент звукопоглощения в области высоких частот (рис. 9). С целью мини-

мизации влияния защитного слоя на импеданс необходимо максимально увеличивать процент перфорации перфорированного листа или использовать продуваемые сетки. Влияние сетки на реактивную составляющую импеданса меньше, чем перфорированного листа. Однако в тех случаях, когда сетки имеют большое собственное сопротивление, его необходимо учитывать при расчете импеданса однородной конструкции.

Таким образом, в данной работе исследован новый способ расширения спектра звукопоглощения за счет использования специальных пористых однородных материалов. Впервые предложено для существенного расширения возможностей однородного материала использовать его сквозную или несквозную перфорацию. Создавая многослойные конструкции из одного материала с разной толщи-

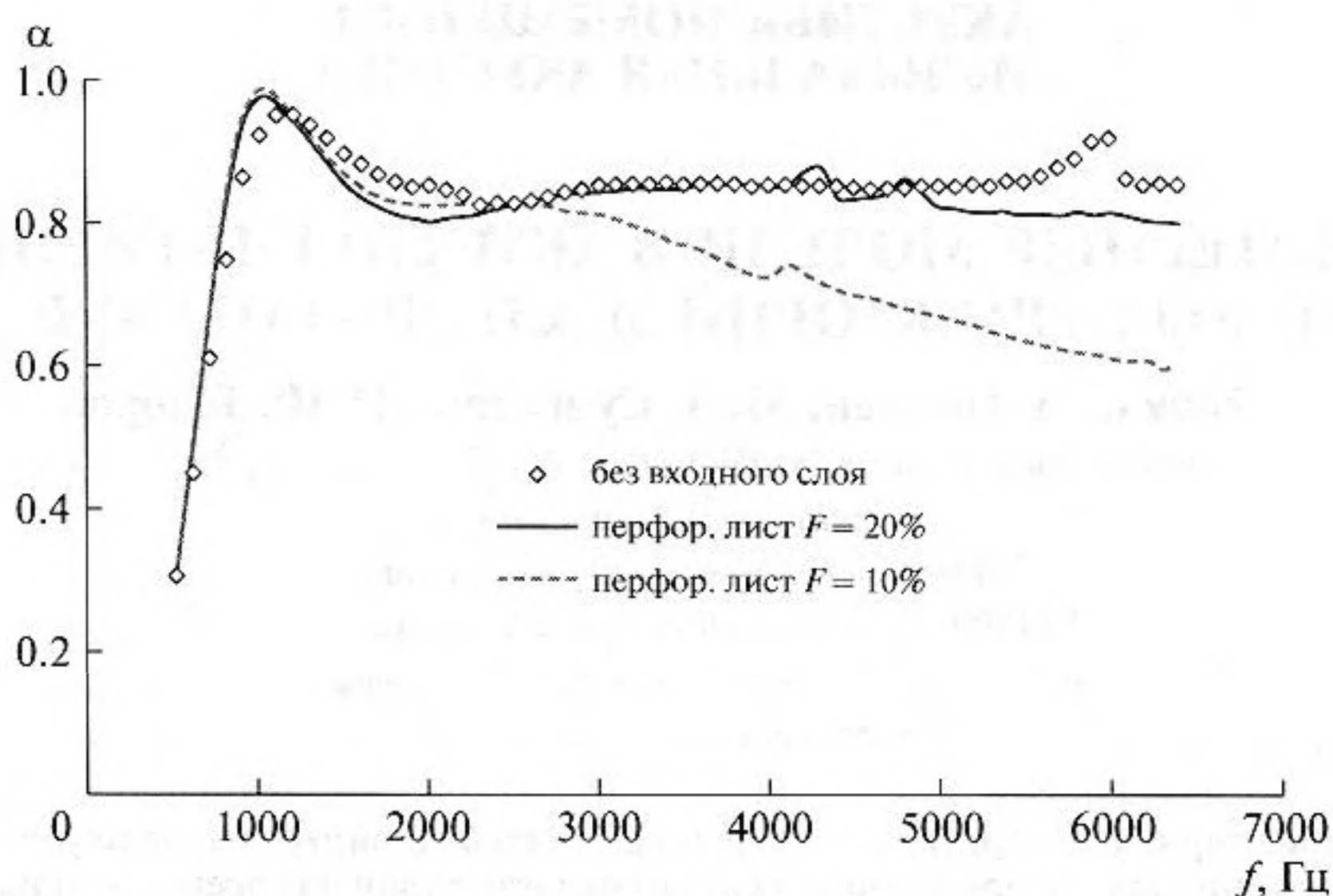


Рис. 9. Влияние лицевого перфорированного листа на коэффициент звукопоглощения двухслойной гомогенной ЗПК.

ной слоев, процентом перфорации и диаметром отверстий, можно, с одной стороны, существенно расширить спектр частот шумоподавления, с другой стороны, управлять процессом воздействия на шум путем подбора оптимального соотношения между толщиной и процентом перфорации слоев и диаметром отверстий. При этом, если активно использовать воздушные промежутки между слоями, возможности для оптимизации расширяются.

Разработана теория ЗПК с гомогенным материалом при наличии сквозной перфорации, которая позволяет на основе волновых параметров исходного материала, определяемых экспериментально, вычислять волновые параметры и импеданс модифицированной конструкции с учетом перфорации. На основании созданной теории можно рассчитать импеданс любой достаточно сложной конструкции, состоящей из слоев разной толщины, отличающихся процентом перфорации и диаметром отверстий. Как частный случай, такая многослойная конструкция может включать неперфорированные слои и воздушные промежутки. Были проведены расчеты импеданса и коэффициента звукопоглощения для однослойных и двухслойных образцов. Получено хорошее соответствие теории и эксперимента. Разработанная теория создания широкополосных ЗПК для каналов авиационных двигателей может быть с успехом распространена на любые звукопоглощающие конструкции на основе пористых материалов, в частности, применяемых в автомобильном и железнодорожном транспорте, а также в строительной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболев А.Ф.* Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 6. С. 861–872.
2. *Соболев А.Ф.* Многослойные звукопоглощающие конструкции для каналов авиационных двигателей / Сб. докл. V научной конференции по гидроавиации "Гидроавиасалон-2004". 2004. Москва: Издательский отдел ЦАГИ. С. 184–195.
3. Поправка № 7 к международным стандартам и рекомендуемой практике. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Том 1. Авиационный шум. ИКАО. 2001. 192 с.
4. *Соболев А.Ф.* Звукопоглощающие конструкции с расширенной полосой затухания для каналов авиационных двигателей // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 4. С. 536–544.
5. *Соболев А.Ф., Соловьева Н.М., Филиппова Р.Д.* Расширение частотной полосы звукопоглощения облицовок силовых установок самолетов // *Акуст. журн.* 1995. Т. 41. № 1. С. 146–152.
6. *Lester H.C., Presser J.S., Parrott T.L.* Design and flight test of Kevlar acoustic liner // *J. Aircraft.* 1984. V. 7. № 21. P. 491–497.
7. *Ahuja K.K., Gaeta R.J.* A new wide-band acoustic liner with high temperature capability // *AIAA-97-1701-CP.* 1997. P. 847–864.
8. *Yu J., Kwan H.W., Yasukawa R.D.* Use of HTP ceramic foam for aeroacoustic application // *AIAA-97-1705-CP.* 1997. P. 887–897.
9. *Gaeta R.J.* The Sound Absorbing Potential of Carbon-Graphite Foam // *AIAA 2006-2405.* 2006. P. 1–14.
10. *Арутюнян Г.Р., Волков В.С., Шуль Г.С., Софеев Ю.М., Точмани О.В., Соболев А.Ф., Филиппова Р.Д.* Термостойкий высокопористый волокнистый теплоизоляционный и звукопоглощающий материал и способ его изготовления. Патент РФ на изобретение № 2345042. Опубликовано: 27.01.2009. Бюлл. № 3.
11. *Цвиккер К., Костен К.* Звукопоглощающие материалы. М: ИЛ. 1952. 160 с.