

УДК 534.322.3

## РАСЧЕТ ИМПЕДАНСА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

© 2006 С.А. Богданов

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье рассмотрен вопрос расчета акустических характеристик звукопоглощающих конструкций с заполнителем в виде складчатой структуры. Обоснована целесообразность применения в звукопоглощающих конструкциях складчатых заполнителей. Разработана математическая модель расчета импеданса таких конструкций. Представлены результаты проведенных экспериментов, которые подтверждают правильность разработанной математической модели.

В настоящее время в глушителях газовых струй широко используются сотовые звукопоглощающие конструкции (ЗПК) для снижения дискретного шума и пористые звукопоглощающие материалы (ЗПМ) для снижения широкополосного шума.

Сотовые ЗПК (рис. 1) представляют собой трехслойные конструкции, состоящие из непроницаемого и перфорированного листов и расположенного между ними сотового заполнителя.

Основным недостатком сотовых ЗПК является их высокая стоимость, обусловленная сложной технологией изготовления, а также малая технологическая гибкость к изменениям для глушения шума газовых струй свойств материала и геометрических пара-

метров сотовых ЗПК. Практически для каждого типа материала (металл: сталь, алюминий, латунь, медь, титан и т.д.; бумага: простая, ламинированная; пластик: стеклопластик, углепластик и прочее) требуется своя технология и свое уникальное технологическое оборудование. В настоящее время сотовые ЗПК применяются преимущественно в авиации и космонавтике (из металлической фольги и стекло - углепластика, где стоимость не имеет решающего значения). Использование сотовых ЗПК в других областях весьма скромно - применяются только бумажные сотовые ЗПК как самые дешевые по технологии, однако и они имеют существенные ограничения по геометрии.

С точки зрения акустики применение сотовых конструкций ограничено еще и тем, что они имеют относительно узкий диапазон звукопоглощения, поэтому для снижения шума, имеющего широкополосный характер, их использование неэффективно.

Применение ЗПМ в качестве заполнителя в панельных глушителях шума (пробка, базальтовое и стеклянное волокно, минераловатные плиты, различные пенопласты и т.д.) расширяет диапазон звукопоглощения. Однако трехслойные конструкции на основе пористых ЗПМ обладают рядом технологических и эксплуатационных недостатков (боятся пыли, копоти и влаги, плохо очищаются; со временем слеживаются; имеют отно-

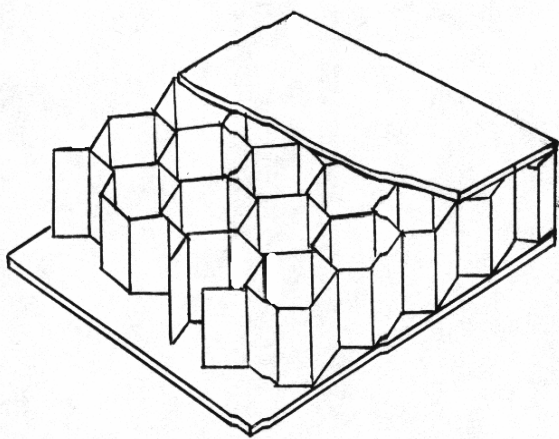


Рис. 1. Схема сотовых ЗПК

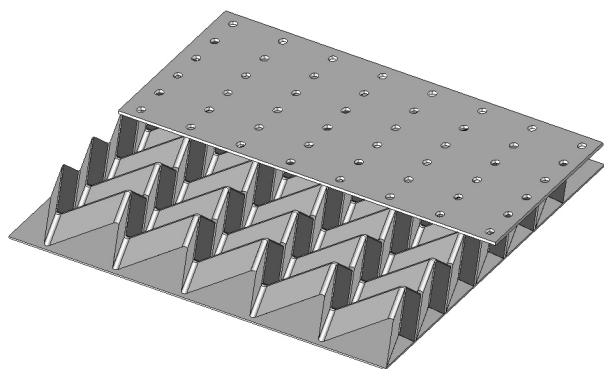


Рис. 2. Схема ЗПК с наполнителем в виде складчатой структуры

сительно большой вес, низкую прочность и жесткость, часто небезопасны по экологии).

В качестве альтернативы сотовым ЗПК и пористым ЗПМ для глушения шума газовых струй предлагается использовать принципиально новую конструкцию на основе заполнителя в виде складчатой структуры (рис. 2) [5].

Было проведено исследование акустических характеристик складчатой структуры в виде так называемого Z-гофра (рис. 3). Эта складчатая конструкция, представляет собой ряд зигзагов, чередующихся впадинами и вершинами, получаемая путем сгибания относительно тонкого листового материала по определенной технологии, с разработанной математической моделью связей геометрических параметров.

Предлагаемая конструкция сохраняет практически все достоинства сотового заполнителя (легкий вес, прочность, жесткость и т.д.),

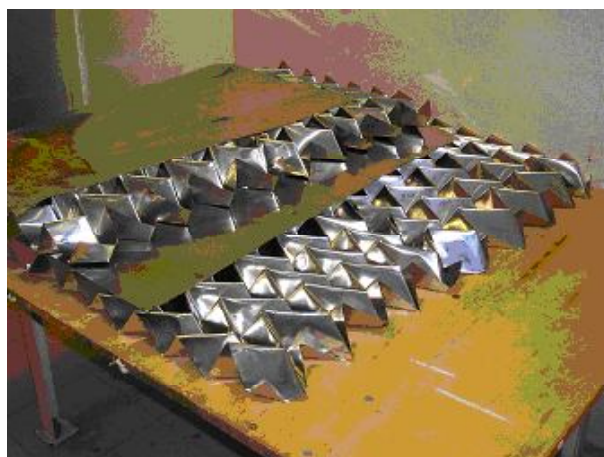


Рис. 3. Конструкция Z-гофра

но резко снижает стоимость ЗПК, особенно металлических, по причине применения более простой технологии, а по акустическим характеристикам не уступает пористым ЗПМ.

Одним из самых важных преимуществ Z-гофра является возможность изменения характеристик за счет изменения геометрических параметров конструкции на основе этого заполнителя, которые намного легче, дешевле и быстрее менять по причине использования простой и дешевой оснастки. Также важным преимуществом является широкий выбор используемых материалов.

Немаловажным является и то обстоятельство, что при применении звукопоглощающих конструкций на основе заполнителя в виде Z-гофр практически полностью снимается проблема удаления конденсата из оболочки. Z – гофры располагаются так, что ОХ направлена по горизонтали, а ОУ – по вертикали (рис. 4). В этом случае образовавшийся конденсат естественным образом по каналам сливается вниз и далее удаляется в атмосферу.

При создании двух и трехслойной конструкции с использованием листового материала и Z-гофра данная конструкция приобретает жесткость. Если же прикрепить 30% вершинок гофра к листовому материалу с одной или двух сторон то полученная жесткость позволяет использовать конструкцию в качестве конструкционного материала способного нести распределенные нагрузки до  $0,5 \text{ кг/см}^2$  (рис. 5).

Панели с наполнителем в виде Z-гофра изготавливают длиной по оси ОХ 0,5 – 1 метр

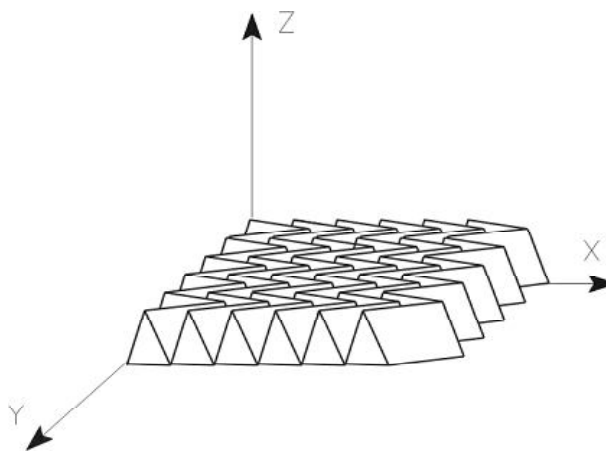


Рис. 4. Направление расположения Z-гофра

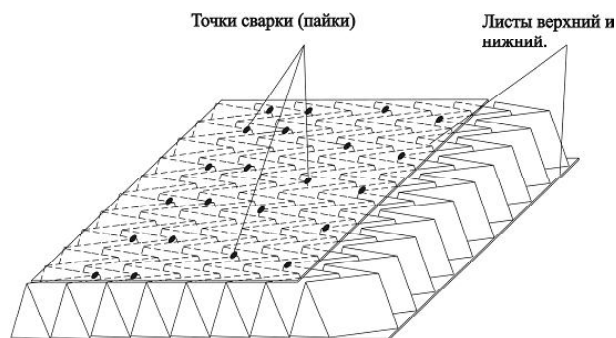


Рис. 5. Схема конструкции трехслойной панели Z-гофра

сегментами по окружности (по оси  $OY$ ), длина которых составляет также величину от 0,5 до 1 метра.

Для внедрения ЗПК на основе заполнителя в виде Z-гофр были разработаны математические модели для расчета геометрических параметров и акустических характеристик глушителей газовых струй. Для уточнения разработанных математических моделей проведены экспериментальные исследования акустических характеристик ЗПК с заполнителем в виде Z-гофр в широком диапазоне изменения геометрических и технологических параметров конструкции при различных акустических условиях работы.

Известно, что сотовые ЗПК с перфорированным листом, характеризуются следующими основными геометрическими параметрами (рис. 6): глубиной воздушной полости (толщиной ЗПК)  $d$ , диаметром отверстий  $d_{отв}$ , толщиной перфорированного листа  $t_l$ , степенью перфорации листа  $P$  (отношением площади отверстий ко всей площади листа), а также формой и размером сотовых ячеек.

Особенности поведения импеданса со-

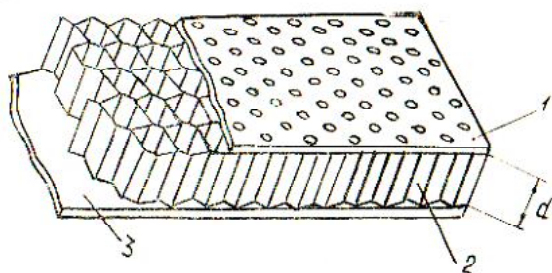


Рис. 6. Схема однослойной сотовой звукопоглощающей конструкции: 1-перфорированный лист; 2-сотовая конструкция; 3-непроницаемый лист

товых звукопоглощающих конструкций при низких уровнях звукового давления достаточно хорошо исследованы [1]. При низких уровнях звука (менее 100 дБ) импеданс ЗПК линеен, так как не зависит от амплитуды звукового давления на поверхности ЗПК. Он определяется диссипацией энергии за счет вязкости на стенке и в отверстиях. При высоких уровнях звукового давления (более 100 дБ) и при наличии сносящего потока в канале становятся существенными нелинейные эффекты, связанные с образованием вихрей и струй вблизи отверстия, они наблюдаются и в экспериментах при визуализации потока. Эти образования приводят к дополнительной диссипации акустической энергии и увеличивают акустическое сопротивление  $X = Im(Z)$ . Поскольку построение математических моделей рассматриваемых процессов довольно затруднительно, соотношения, характеризующие действительную и мнимую часть импеданса, носят полуэмпирический характер [2]. Экспериментальные данные, которые при этом используются, получены в основном на интерферометрах высоких уровней. Выражения для активной составляющей  $R$  импеданса и его реактивной составляющей  $X$  можно записать в виде [3, 4]:

$$R = \frac{\sqrt{8}t_l}{P\rho_0c} \left(1 + \frac{\nu\omega}{d_{отв}}\right) + R_N; \quad (1)$$

$$X = \frac{k}{P}(t_l + \Delta t_l) - ctg(kd), \quad (2)$$

где  $t_l$  – толщина перфорированного листа;

$P$  – степень перфорации листа;

$\rho_0c$  – волновое сопротивление среды;

$\nu$  – кинематическая вязкость;

$\omega$  – круговая частота;

$d_{отв}$  – диаметр отверстий;

$R_N$  – член, характеризующий нелинейные эффекты;

$k$  – волновое число;

$(t_l + \Delta t_l)$  – эффективная толщина перфорированного листа (длина горла резонатора);

$d$  – глубина воздушной полости.

Первый член в выражении для реактанса  $X$  характеризует инерционные свойства

эффективной массы воздуха (массы воздуха в отверстии плюс присоединенной массы воздуха вблизи отверстия), второй – упругость столба воздуха высотой  $d$ . При уровнях, имеющих место в каналах авиационных двигателей (130—160) дБ, первый член в выражении (1), характеризующий влияние вязкости, практически не вносит вклада в величину  $R$ , поэтому им обычно пренебрегают. Влияния на акустическое сопротивление высоких уровней звука и сносящего потока, определяющих величину  $R_N$  (1), независимы и аддитивны, следовательно, можно записать:

$$R_N = R_L + R_M, \quad (3)$$

где величина  $R_L$  определяется уровнем звукового давления на поверхности ЗПК, величина  $R_M$  – скоростью сносящего потока в канале. Нормальная составляющая акустической скорости связана с осредненной скоростью воздуха в отверстии соотношением:

$$u_n = P\bar{U}_0, \quad (4)$$

выражение (4) выражает условие неразрывности, а также несжимаемости, поскольку характерные размеры облицовки малы по сравнению с длиной звуковой волны. Учитывая определение удельного акустического импеданса, получаем связь между амплитудой скорости в отверстии и амплитудой звукового давления на поверхности ЗПК:

$$|\bar{U}_0| = \frac{p}{\rho_0 P \cdot c |Z|} = \frac{|p|}{\rho_0 P \cdot c \sqrt{R^2 + X^2}}. \quad (5)$$

Величина  $R_L$  пропорциональна амплитуде скорости  $|\bar{U}_0|$  и для перфорированного листа со степенью перфорации  $P$  с учетом (4) и (5) имеет вид:

$$R_L = \lambda \frac{1}{P} \cdot \frac{|\bar{U}_0|}{c} = \lambda \frac{1}{P} \cdot \frac{u_n}{Pc} = \lambda \frac{1}{P^2} \cdot \frac{1}{\rho c^2} \cdot \frac{|p|}{\sqrt{R^2 + X^2}}. \quad (6)$$

Если амплитуду звукового давления выразить в децибелах, то получим:

$$\frac{|p|}{\rho_0 \cdot c^2} = \frac{P_0}{\rho_0 \cdot c^2} \cdot 10^{\frac{L}{10}} = \Pi \cdot 10^{\frac{L}{20}-10}, \quad (7)$$

где  $L$  – уровень звукового давления на поверхности ЗПК;

$$\Pi = \frac{P_0}{\rho_0 \cdot c} \cdot 10^{10};$$

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – пороговый уровень звукового давления (в частности, при нормальных атмосферных условиях коэффициент  $\Pi \sim 2$ ). Подставляя (7) в (6), окончательно получим:

$$R_L = \lambda \frac{1}{P^2} \cdot \frac{\Pi \cdot 10^{\frac{L}{20}-10}}{\sqrt{R^2 + X^2}}. \quad (8)$$

Величина  $R_M$ , характеризующая влияние сносящего потока, пропорциональна числу Маха [2, 4]:

$$R_M = \frac{K_M \cdot M}{P}, \quad (9)$$

Коэффициент пропорциональности  $K_M$  определяется полуэмпирически [4]. Обычно принимают величину  $K_M \sim 0,31$ . Поправка  $\Delta t_n$ , описывающая эффект изменения присоединенной массы, имеет вид:

$$\Delta t_n = \delta d_{отв}. \quad (10)$$

Величина  $\delta$  также определяется полуэмпирически:

$$\delta = \frac{8}{3\pi} \cdot (1 - 0,7\sqrt{P}) \cdot \frac{(1 + \alpha M_0^2)}{(1 + 2\alpha M_0^2)} \cdot \frac{1}{(1 + 305M^2)},$$

$$\alpha = 10^3; \quad (11)$$

$$M_0 = \frac{1}{P} \cdot \frac{u_n}{c} = \frac{\Pi \cdot 10^{\frac{L}{20}-10}}{P \sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (12)$$

где  $M_0$  – число Маха по акустической скорости в отверстии. Множитель, содержащий  $M_0$ , описывает эффекты, связанные с высоким уровнем звукового давления, а множитель, содержащий  $M$  – влияние сносящего потока. С учетом полученных соотношений (1), (12) выражения для активной и реактивной составляющих импеданса можно записать в виде ( $L \geq 120$  дБ):

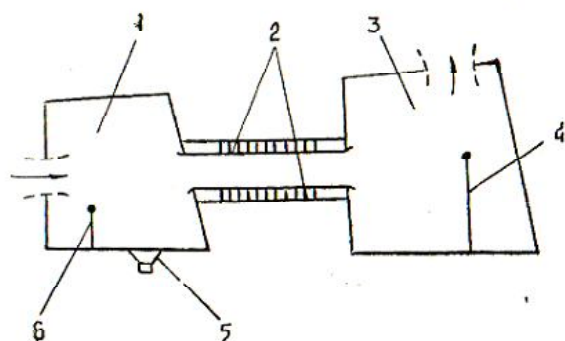
$$\begin{cases} R = \lambda \cdot \frac{1}{P^2} \cdot \frac{\Pi \cdot 10^{L/20-10}}{\sqrt{R^2 + X^2}} + K_M \frac{M}{P} \\ X = \frac{k}{P} (t_{л} + \delta d_{омб}) - ctg(kd) \end{cases} \quad (13), (14)$$

Таким образом, величины  $R$  и  $X$  определяются из системы уравнений (13) — (14) с учетом соотношений (7), (11) и (12) при заданных геометрических параметрах звукопоглощающей облицовки, числе Маха сходящего потока, частоте и уровне звуковых колебаний в канале.

Спектр звукопоглощения  $DDL(f)$  зависит как от внешних параметров (частота звука, число Маха потока, уровень звука на входе в канал), так и от геометрических размеров канала, а также от типа и геометрии ЗПК, которые определяют величину импеданса  $Z$ .

Предложенная методика расчета эффективности ЗПК в каналах с потоком после некоторой корректировки с экспериментальными данными, полученными на стенде со сдвоенной реверберационной камерой (рис. 7) может быть применена для Z-гофр.

И в результате расчетов, и в результате акустических испытаний выявлены основные тенденции влияния на спектр звукопоглощения перечисленных выше режимных и конструктивных параметров. В частности установлено, что при использовании сотовых ЗПК влияние диаметра отверстий и толщины перфорированного листа (при фиксированных значениях  $d$  и  $P$ ) в реальном диапа-



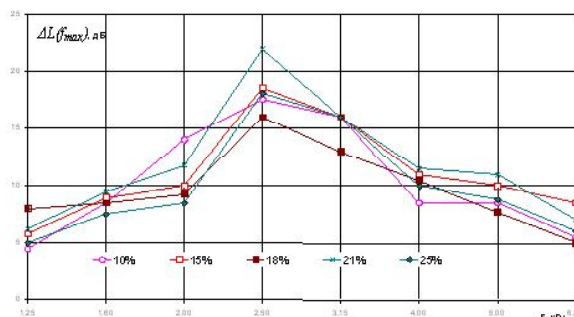
**Рис. 7.** Схема стенда со сдвоенной реверберационной камерой: 1-входная камера; 2-канал с ЗПК; 3-выходная камера; 4,6-микрофоны; 5-источник шума

зоне их применения незначительно. Основными значимыми геометрическими параметрами конструкции является степень перфорации листов  $P$  и глубина воздушной полости  $d$ , причем влияние этих величин можно условно разделить:

- если степень перфорации оказывает основное влияние на величину  $DDL(f_{max})$  максимального затухания (за счет изменения сопротивления листа  $R$ , т.е. активной составляющей) и практически не изменяет частоты максимального звукопоглощения (рис. 8);
- то глубина полости  $d$  незначительно изменяя величину  $DDL_{max}$ , существенно влияет на частоту настройки ЗПК, поскольку определяет сопротивление полости, т.е. величину реактивной составляющей импеданса  $X$  (выр. 2).

Изменения типа и параметров ЗПК должно привести к количественному и качественному изменению спектра звукопоглощения.

При использовании вместо сот заполнителя типа Z- гофр, должна расширяться полоса звукопоглощения, поскольку в отличие от случая сот здесь нет резонаторов с фиксированной высотой полости, и переменность высоты резонаторов в поперечном и продольном направлении должна сгладить острый пик затухания на резонансной частоте. При этом частота настройки ЗПК должна увеличиться, поскольку она должна соответствовать некоторой средней высоте полости, приблизительно равной  $d/2$ -высота соответствующего сотового заполнителя. Проведенные акустические испытания целиком подтвердили этот факт (рис. 9).



**Рис. 8.** Влияние степени перфорации перфорированного листа на эффективность ЗПК с заполнителем в виде складчатой структуры

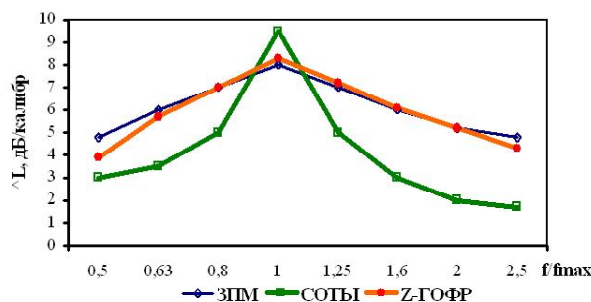


Рис. 9. Сравнение звукопоглощающих материалов различных типов:

ЗПМ – пористые материалы (базальтовое супертонкое волокно толщиной  $d=40\text{мм}$ ); СОТЫ ( $d=30\text{мм}$ ); Z-ГОФР ( $d=50\text{мм}$ )

Изменение в характере спектра звукопоглощения очень четко отражают соответствующие изменения в импедансе, точнее - в реактивной составляющей импеданса, а именно – в импедансе воздушной полости. В соотношении (2) за это изменение отвечает член  $ctg(kd)$ , где  $k=ww/c$  - волновое число. В общем случае построение методики расчета импеданса ЗПК с заполнителем в виде Z-гофр довольно затруднительно, однако в первом приближении можно адаптировать к расчету импеданса Z-гофр методики, используемую для сотовых ЗПК, введя в импеданс полости  $ctg(kd)$  поправочный коэффициент  $\alpha$ ; т.е. используя вместо  $ctg(kd)$  величину  $ctg(\alpha kd)$ , где  $\alpha$  – некоторый поправочный коэффициент. С учетом имеющихся экспериментальных данных заданные величины  $\alpha \cong 1/2$  приводит как раз к расширению полости звукопоглощения (за счет более медленного роста величины  $X(f)$ ), и к переходу на меньшую глубину полости.

Расчеты акустической эффективности ЗПК с заполнителем в виде Z-гофр при такой корректировке методики определения импеданса довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Уточнения и корректировка методики расчета импеданса возможны, если иметь в наличии не интегральные характеристики ЗПК - величину звукопоглощения, а локальные характеристики - замеренный импеданс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганабов В.И., Мунин А.Г. Критерий моделирования шума компрессора и распространения звука в канале со звукопоглощающими стенками / Труды ЦАГИ, 1976. Вып. 1806.
2. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А.. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981.
3. Эпштейн В. Л., Руденко А. Н., Жемурапов А. П. Нелинейное акустическое сопротивление отверстия / Труды ЦАГИ, 1970. Вып 1806.
4. Ильченко М. А., Косоротиков Ф. Я., Руденко А. Н. Экспериментальное исследование затухания одномодального возмущения в облицованном цилиндрическом канале с потоком. В кн.: Аэроакустика. М.: Наука, 1980.
5. Богданов С.А., Шахматов Е.В., Крючков А.Н., Назаров О.В., Пасков Р.М. Теплозвукоизоляционная многослойная панель. Патент на полезную модель №52877 от 27.04.2006.

## ACCOUNT OF AN IMPEDANCE OF A SOUND-PROOF DESIGN WITH BENT STRUCTURE FILLING

© 2006 S.A.Bogdanov

Samara State Aerospace University

In clause the question of account of the acoustic characteristics of sound-proof design with bent structure filling is considered. The expediency of application in sound-proof designs filling as bent structure is proved. The mathematical model of account of an impedance of such designs is developed. The results of the spent experiments are submitted which prove the developed mathematical model.