

К РАСЧЕТУ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ

Волосенко К.И.

ФГОУВО «Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения», Санкт-Петербург, Россия (191119, Санкт-Петербург, ул. Правды, 13), e-mail: volosenko@list.ru

Широко применяемые для акустической обработки перфорированные панели имеют резко селективный характер звукопоглощения, в ряде случаев это является существенным недостатком при архитектурно-строительном проектировании помещений. Однако механическая прочность панелей и небольшая стоимость позволяют использовать их в качестве финишной отделки помещений, что сохраняет преимущества перед остальными звукопоглотителями. В работе выполнено экспериментальное исследование частотных характеристик резонансных полостей на акустическом интерферометре. Показано, что для расширения диапазона эффективного звукопоглощения возможно использование нескольких резонансных полостей различных диаметров. Представлен экспериментальный метод определения частотных характеристик резонансных полостей, позволяющий сконструировать поглотитель с наперед заданной частотной характеристикой. Показано хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными. Созданы опытные образцы многоэлементной звукопоглощающей конструкции, эффективной в диапазоне 2 октав.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, акустическая проводимость резонансной полости, перфорированная панель, акустический интерферометр.

IN ADDITION TO THE CALCULATION OF THE RESONANCE ABSORBER

Volosenko K.I.

St. Petersburg State University of Film and Television, Saint-Petersburg, Russia (13, Pravda str, St. Petersburg, 191119, Russia), e-mail: volosenko@list.ru

Perforated panels that are widely used for acoustic surfacing have selective acoustic absorption, in some cases this is a significant disadvantage for architectural design of indoor space. However, the mechanical strength of the panels and their low cost allow to use them for the purposes of final room surfacing retaining the advantages over other types of sound absorbers. This paper presents the experimental study of the resonant cavities frequency characteristics with the use of the impedance tube. The results show that several resonant cavities of different diameters can be used for effective sound absorption band extension. The article shows adequate correspondence between the experimental and calculated data. Test models of multielement sound absorbing structure that is effective in the range of 2 octaves has been created.

Keywords: sound absorbing construction, acoustic conductivity of the resonant cavity, perforated panel, impedance tube.

Звукопоглощающие материалы (ЗПМ) и звукопоглощающие конструкции (ЗПК) применяются в архитектурно-строительном проектировании помещений и большинстве средств защиты от шума. Их используют для акустической обработки залов кинотеатров, театров, студий и других специализированных помещений типа звукомерных акустических камер.

В архитектурной акустике в качестве звукопоглотителей часто применяют перфорированные панели. Конструкция поглотителя реализуется в виде перфорированного листа относительно жесткого материала, расположенного на небольшом расстоянии от стены. Такие конструкции относятся к резонансному типу поглощения, т.к. масса воздуха в объеме полости и упругость воздуха в промежутке между перфорированным тонким листом и стенкой создают колебательную систему [3].

Расчет резонансной конструкции состоит в определении диаметров и количества полостей на единицу площади, выборе материала и величины отношения перфорированной пластины. Задачей расчета является создание поглотителя, обладающего высокой

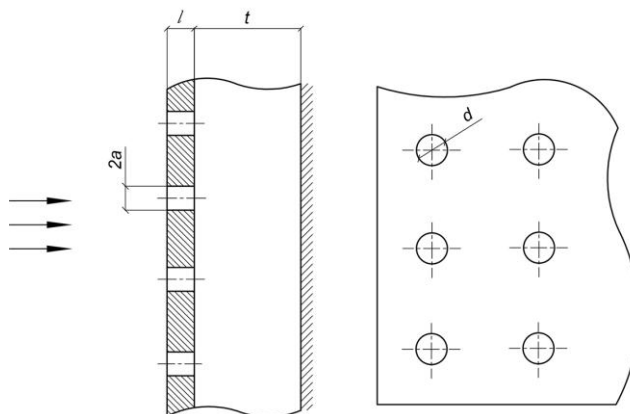


Рис. 1. Схема конструкции резонансного поглотителя

эффективностью в заданном диапазоне частот. Эффективность звукопоглотителя определяется частотной характеристикой коэффициента поглощения α , который для отсутствия тембральных искажений не должен быть меньше 0,8 во всем диапазоне звуковых частот.

Акустическая проводимость резонансной полости

Входное акустическое сопротивление зависит прежде всего от размеров полостей (перфораций). На рисунке 1 представлена типовая схема резонансного поглотителя.

Акустическое сопротивление полости представим в общем виде:

$$Z = Z_a + iZ_r,$$

где Z_a , Z_r – активная и реактивная часть сопротивления.

Коэффициент звукопоглощения α резонатора рассчитывается по формуле [1]:

$$\alpha = \frac{4Z_a}{(Z_a + 1)^2 + Z_r^2}.$$

Активная составляющая сопротивления на единицу площади рассчитывается по следующей формуле [2]:

$$Z_a = \frac{\rho_0 l}{2a} \sqrt{8\nu\omega} + \frac{\rho_0 c_0}{4} (ka)^2, \quad (1)$$

где ν – кинетическая вязкость воздушной среды; $k_0 = \omega / c_0$ – волновое число; ω – круговая частота; ρ_0 – плотность воздуха; c_0 – скорость звука в воздухе; $a = \frac{d}{2}$ – радиус полости; l – толщина перфорированного листа.

Активные потери при резонансных колебаниях воздуха в полости обусловлены не только трением воздуха в горле, но и сопротивлением излучения столбика воздуха в отверстии, характеризуемым вторым слагаемым в последнем выражении. В узком горле резонатора происходит переизлучение звука в окружающую среду.

Реактивная составляющая имеет вид:

$$Z_r = i \left[\omega \rho_0 l \left(1 + \frac{\sqrt{8\nu\omega}}{2a} \right) + \omega \rho_0 \frac{8}{3\pi} a - \frac{\rho_0 c_0^2}{\omega t} \right], \quad (2)$$

где t – величина отнота листа от стенки.

Звуковое давление падающей на поглотитель волны действует на элементарные резонаторы одинаково, поскольку размеры панели конструкции меньше длины волны в рассматриваемом диапазоне частот. Можно считать, что резонансные полости включены параллельно, так как звуковая волна падает на все полости одновременно.

Условия согласования акустического сопротивления воздушной среды и входного сопротивления поглотителя состоят в выполнении равенств [4]:

$$Y_a = 1 \text{ и } Y_r = 0, \quad (3)$$

где Y_a и Y_r – удельная акустическая проводимость, нормированная по акустическому сопротивлению среды.

В резонансных звукопоглощающих конструкциях условие согласования выполняется лишь в узком диапазоне частот, что приводит к селективному поглощению звуковой энергии. Для расширения диапазона эффективного звукопоглощения возможно использование нескольких полостей различных диаметров.

Проектирование многоэлементного резонансного поглотителя

Эффективное звукопоглощение перфорированной панели в заданном диапазоне частот можно достичь методом подбора диаметра полостей, их количества на единицу площади и величиной отнота панели от жесткой стенки. Эффективность при этом будет зависеть от выполнения условия согласования (3).

На рисунке 2 покажем геометрический смысл метода проектирования многоэлементного резонансного звукопоглотителя.

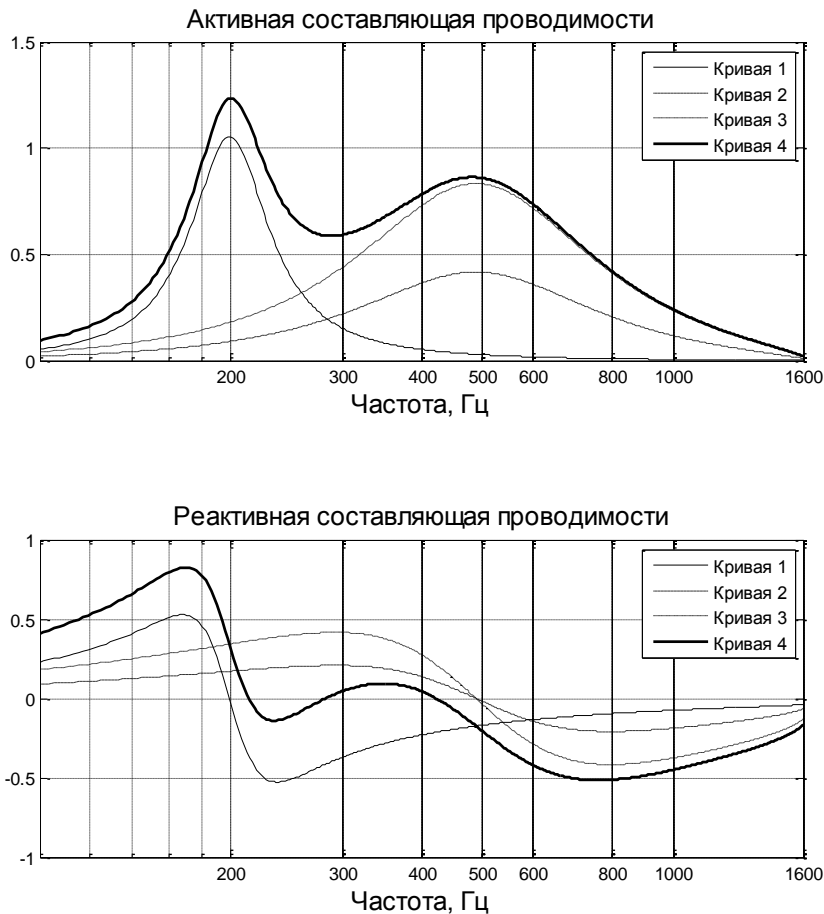


Рис. 2. Частотные характеристики акустической проводимости резонансных полостей

Большая полость радиусом $a_1 = 0,025$ м, выбирается из соображений согласования в области более низких частот ≈ 200 Гц, кривая 1 на рисунке 2. Для расширения диапазона эффективного звукопоглощения выбираем вторую резонансную полость радиусом $a_2 = 0,008$ м, кривая 2 на рисунке 2. При фиксированном значении $t = 0,1$ м, одно отверстие радиусом $a_2 = 0,008$ м в звукопоглотителе малоэффективно в области частот ≈ 500 Гц. Однако два таких отверстия вносят существенный вклад в работу резонансной системы, кривой 3 показана суммирующая огибающая акустической проводимости двух полостей радиусом $a_2 = 0,008$ м. Суммирующая огибающая акустической проводимости полостей всей звукопоглощающей конструкции показана кривой 4.

В области от 200 до 500 Гц суммирующая реактивная часть акустической проводимости всей конструкции стремится к нулю, т.к. реактивная составляющая большой полости, лежащая в области ниже нуля, компенсируется суммой двух малых полостей, лежащей выше нуля. Максимальную эффективность звукопоглощения в этом случае следует ожидать в области частот от 200 до 500 Гц.

Был создан и испытан экспериментальный образец круглого звукопоглотителя диаметром $d = 0,1$ м с тремя отверстиями (первое отверстие $a_1 = 0,025$ м, второе и третье $a_2 = 0,008$ м). Измерения проводились в акустическом интерферометре по методу стоячих волн в соответствии с ISO 10534-1 [5]. Объектом измерения служили гипсокартонные панели марки «Аку-Лайн» с прорезанными круглыми отверстиями. За образцом находился воздушный слой, глубина которого составляла $t = 0,1$ м, толщина перфорированного слоя

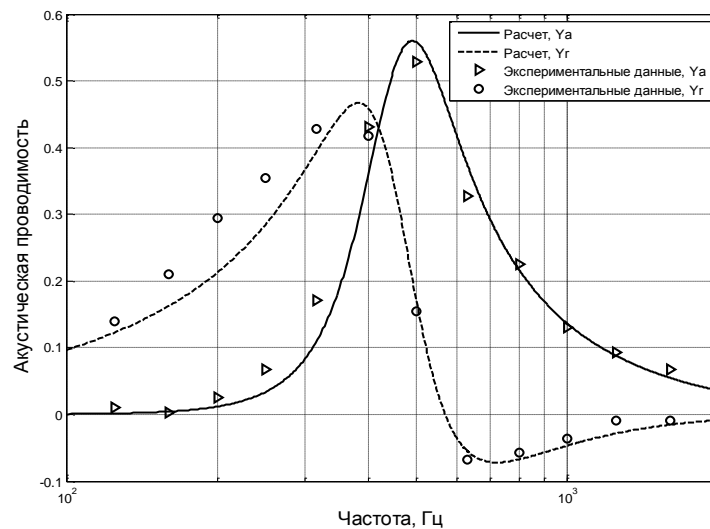


Рис.3. Экспериментальные и расчетные значения акустической проводимости резонансной полости поглотителя: $a = 0,008$, $t = 0,1$ м, $l = 0,012$ м

$l = 0,012$ м, диаметр отверстия a варьировался от 0,025 м до 0,005 м.

На рисунке 3 представлены результаты расчетных и экспериментальных данных акустической проводимости резонансной полости. Хорошее согласование экспериментальных данных с теоретическими позволили выполнить расчет резонансной конструкции звукопоглотителя, состоящий в определении диаметров полостей и их количества на единицу площади поглотителя. Расчетные значения акустической проводимости резонансных полостей разного диаметра представлены в таблице.

Расчетные данные акустической проводимости полостей

$a, м$	0,005	0,008	0,010	0,015	0,025
$f, Гц$	$Y_a + iY_r$	$Y_a + iY_r$	$Y_a + iY_r$	$Y_a + iY_r$	$Y_a + iY_r$
125	$0.00 + 0.06i$	$0.00 + 0.24i$	$0.01 + 0.23i$	$0.13 + 0.53i$	$0.90 + 1.87i$
160	$0.00 + 0.07i$	$0.01 + 0.32i$	$0.04 + 0.33i$	$0.48 + 0.71i$	$3.17 + 0.14i$
200	$0.00 + 0.09i$	$0.02 + 0.42i$	$0.12 + 0.45i$	$0.98 + 0.26i$	$1.32 - 1.06i$
250	$0.01 + 0.12i$	$0.03 + 0.57i$	$0.38 + 0.57i$	$0.64 - 0.21i$	$0.63 - 0.73i$
315	$0.02 + 0.16i$	$0.10 + 0.81i$	$0.77 + 0.19i$	$0.35 - 0.20i$	$0.39 - 0.48i$

400	$0.05 + 0.21i$	$0.38 + 1.11i$	$0.47 - 0.16i$	$0.21 - 0.14i$	$0.27 - 0.31i$
500	$0.14 + 0.27i$	$0.75 - 0.15i$	$0.27 - 0.14i$	$0.14 - 0.09i$	$0.21 - 0.21i$
630	$0.33 + 0.18i$	$0.47 - 1.08i$	$0.17 - 0.10i$	$0.10 - 0.05i$	$0.15 - 0.13i$
800	$0.27 - 0.02i$	$0.26 - 0.74i$	$0.11 - 0.06i$	$0.07 - 0.03i$	$0.11 - 0.08i$
1000	$0.16 - 0.05i$	$0.16 - 0.50i$	$0.07 - 0.04i$	$0.05 - 0.02i$	$0.08 - 0.05i$
1250	$0.12 - 0.04i$	$0.13 - 0.41i$	$0.06 - 0.03i$	$0.04 - 0.01i$	$0.07 - 0.04i$
1600	$0.06 - 0.02i$	$0.07 - 0.14i$	$0.03 - 0.01i$	$0.02 - 0.01i$	$0.04 - 0.01i$

Однако использование нескольких полостей различного диаметра для достижения широкополосного эффекта поглощения, обусловлено некоторыми трудностями. Ввиду того, что эффективность резонансной полости определяется во многом величиной отношения от жесткой стенки, следует сделать замечание, что для каждого диаметра отверстия существует свой относительный коэффициент, при котором эта полость становится эффективной.

Методика расчета многоэлементного резонансного поглотителя позволяет наглядно определять вклад каждого отдельного элемента на эффективность всей системы полостей. Точность расчета определяется точностью воспроизведения частотных характеристик, составляющих проводимости резонаторов.

Однако задача проектирования резонансной полостной ЗПК на самых низких частотах звукового диапазона не решается путем произвольного увеличения размера резонансной полости. Увеличение радиуса резонатора a позволяет перемещать значение резонансной частоты в сторону низких частот, однако, при этом происходит процесс рассогласования поглощающей системы. Активная составляющая входного сопротивления конструкции становится намного больше волнового сопротивления воздушной среды, в результате вместо поглощения наблюдается процесс отражения звуковых волн.

Эффективность на низких частотах можно повысить за счет увеличения расстояния, на котором располагается жесткий перфорированный лист ЗПК от стенки помещения t .

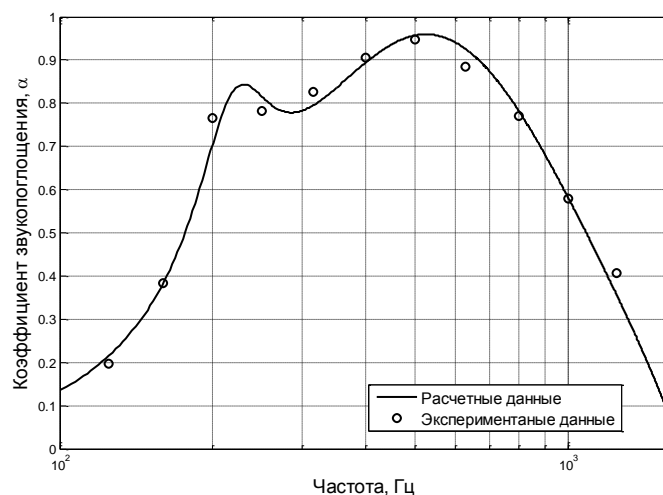


Рис. 5. Частотная характеристика коэффициента звукопоглощения резонансной ЗПК

Анализ частотной зависимости коэффициента поглощения показал, что разработанная многоэлементная конструкция ($a_1 = 0,025$ м, $a_2 = 0,008$ м, $t = 0,1$ м) обладает высокой поглощающей способностью в диапазоне низких частот. Диапазон эффективного поглощения $\alpha \geq 0,8$ многоэлементной ЗПК составляет 2 октавы (см. рисунок 5).

Разработанную конструкцию можно применять в случае, когда в помещении не выполняются нормативные требования к значениям времени реверберации в диапазоне частот от 200 до 1000 Гц. Селективный характер звукопоглотителя позволит выполнить необходимую корректировку частотной характеристики времени реверберации помещения.

Список литературы

1. Осипов, Г.Л. Звукоизоляция и звукопоглощение / Г.Л. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов. – М.: АСТ, 2004.
2. Осипов, Г.Л. Снижение шума в зданиях и жилых районах/ Г.Л. Осипов, Е.Я. Юдин, Г. Хюбнер и др.; Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. – М. : Стройиздат, 1987. – 557с.
3. Цвиккер, К. Звукопоглощающие материалы / К. Цвиккер, К. Костен. – М.: Иностранная литература, 1952.
4. Щевьев, Ю.П. Средства акустической обработки помещений/ Ю.П. Щевьев, Е.Н. Осташевский. – СПб.: Типография «Береста», 2010.
5. ISO 10534-1:1996 Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio.

Рецензенты:

Уваров В.К., д.т.н., профессор кафедры математики и информатики Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург;

Кирпичников В.Ю., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург.