

УДК: 534.28
OECD: 01.03.AA

Акустические характеристики резонаторов Гельмгольца с перфорированными микроотверстиями панелями, используемыми в качестве горла

Кезик В.И.

Старший научный сотрудник ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
г. Москва, РФ

Аннотация

Проведена серия экспериментов по определению акустических характеристик резонаторов Гельмгольца, у которых в качестве горла использовались перфорированные микроотверстиями панели различной толщины (от 3 до 40 мм). Диаметр микроотверстий на разных панелях составлял от 0,4 до 0,9 мм, количество микроотверстий на одной панели было равным 85. Объем резонатора менялся от 6,8 до 35,8 мл.

Результаты экспериментов хорошо согласуются с теорией, в основе которой лежит строгий учет вязкостных свойств воздуха. Активные потери в микроотверстиях также определяются вязкостью воздуха. Наличие надежной теории позволяет производить расчет резонансных звукопоглощающих конструкций на основе перфорированных микроотверстиями панелей, обеспечивающих при правильно подобранных параметрах практически полное поглощение звуковой энергии на резонансной частоте.

Ключевые слова: резонансные звукопоглотители, резонатор Гельмгольца, вязкость воздуха, сопротивление в узких трубах, активные потери.

Acoustic characteristics of Helmholtz resonators with panels perforated with micro-holes used as the neck

Kezik V.I.

Senior researcher of the Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Abstract

A series of experiments was carried out to determine the acoustic characteristics of Helmholtz resonators, in which micro-hole-perforated panels of various thicknesses (from 3 to 40 mm) were used as the neck. The diameter of the micro-holes on different panels ranged from 0.4 to 0.9 mm, the number of micro-holes on one panel was equal to 85. The volume of the resonator varied from 6.8 to 35.8 ml.

The results of the experiments are in good agreement with the theory, which is based on a strict account of the viscous properties of air. Active losses in micro-holes are also determined by the air viscosity. The presence of a reliable theory makes it possible to calculate resonant sound-absorbing structures based on panels perforated with micro-holes, which, with correctly selected parameters, provide almost complete absorption of sound energy at the resonant frequency.

Keywords: resonant sound absorbers, Helmholtz resonator, air viscosity, resistance in narrow pipes, active losses.

Введение

Резонаторы Гельмгольца, являясь классическим объектом акустики, всегда привлекали внимание исследователей. Изобретение резонансных звукопоглотителей, используемых в различных областях техники, сделало интерес к резонаторам Гельмгольца еще более предметным. Необходимо было рассчитывать акустические свойства резонаторов в зависимости от их геометрических параметров. Сравнительно просто решалась задача определения частотных характеристик резонатора [1]. Более сложной является задача определения его энергетических характеристик [2] (степень поглощения, добротность и т.д.). В настоящей работе исследуются резонаторы Гельмгольца, у которых в качестве горла используются перфорированные микроотверстиями панели различной толщины. С помощью таких резонаторов может быть реализована задача полного поглощения звуковой энергии на резонансной частоте.

1. Методика определения акустических характеристик резонаторов

Акустические характеристики резонаторов экспериментально определялись с помощью метода двух микрофонов [3]. Микрофоны устанавливались на определенном расстоянии от образца и друг от друга в стенке импедансной трубы, на одном уровне с ее внутренней стороной. В конце импедансной трубы находился образец (перфорированная панель). За панелью располагалась цилиндрическая полость резонатора объема V .

В результате эксперимента определялись значения активной $R1$ и реактивной $Y1$ компоненты удельного акустического импеданса, нормированного к ρc , в сечении окончания волновода, т.е. в месте расположения передней стенки перфорированной панели. Величина $R1$ характеризует активные (безвозвратные) потери энергии в резонаторе. Если предположить, что в объеме резонатора потерь не происходит, то все потери связаны с движением воздуха в горле резонатора.

Значения $R1$ и $Y1$ определялись для каждой частоты выбранного диапазона с заданным шагом. Экспериментальное значение резонансной частоты определяется пересечением кривой $Y1(f)$ с осью абсцисс, т.е. значением f , при котором величина обращается в ноль.

В эксперименте определялась также зависимость коэффициента поглощения резонатора α [4] от частоты возбуждения. Коэффициент поглощения α на каждой исследуемой частоте определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{4R1}{(R1 + 1)^2 + Y1^2} \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что полное поглощение звука ($\alpha=1$) на резонансной частоте ($Y1 = 0$) происходит при $R1 = 1$.

Зависимости $R1$, $Y1$ и α от частоты экспериментально определялись для разных панелей и разных значений объема V . Кроме того эти зависимости определялись для открытых панелей, т.е. для случая, когда $V = \infty$.

2. Теоретическое описание объекта исследования

Теоретическое рассмотрение проблемы основано на представлениях Крендалла о влиянии вязкости на движение жидкости или газа под действием периодической силы в цилиндрических трубах. В соответствии с этими представлениями механический импеданс воздушной пробки в одиночной цилиндрической трубке определяется по

формуле, полученной Крендаллом [4,5]:

$$ZM_{\sigma} = \frac{i\sigma\rho h\omega}{1 - \frac{2}{k_{\mu}r} \frac{J_1(k_{\mu}r)}{J_0(k_{\mu}r)}}, \quad (2)$$

где r – радиус трубки, h – ее длина, $\sigma = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения, ω – круговая частота, k_{μ} – параметр, определяемый по формуле $k_{\mu} = \sqrt{-i\frac{\rho\omega}{\mu}}$ (волновое число Стокса), ρ и μ – плотность и коэффициент вязкости воздуха, J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода первого и второго порядка от аргумента $k_{\mu}r$, i – мнимая единица.

Эта формула справедлива как для широких цилиндрических труб небольшой длины, так и для тонких коротких капилляров. Длина трубы или капилляра должна удовлетворять условию $h \ll \lambda$, где λ – длина волны. Для широких и коротких труб в формуле (2) необходимо учитывать наличие концевых поправок [6,7]. Для рассматриваемых в настоящей работе микроотверстий длина h в десятки раз превышает r , поэтому концевыми поправками мы пренебрегаем.

Механический импеданс пучка, состоящего из N таких трубок, будет равен:

$$ZM_{\Sigma} = N \cdot ZM_{\sigma}. \quad (3)$$

Механический импеданс пучка из N трубок, вставленных в объем V будет равен:

$$ZM_{\Sigma V} = ZM_{\Sigma} - i\frac{\rho c^2 \Sigma^2}{\omega \cdot V}, \quad (4)$$

где $\Sigma = N\sigma$ – суммарная площадь сечения N капиллярных трубок.

Рассматриваемый резонатор исследуется с помощью импедансной трубы. Поэтому перейдем от механического импеданса $ZM_{\Sigma V}$ к удельному акустическому импедансу $Z1_{\Sigma V}$, нормированному к ρc , при этом учтем трансформацию импеданса от суммарной площади отверстий Σ к площади сечения волновода S .

$$Z1_{\Sigma V} = ZM_{\Sigma V} \frac{S}{\rho c \Sigma^2}. \quad (5)$$

Активная и реактивная составляющие этого импеданса определяются по формулам:

$$R1_{\Sigma V} = Re(Z1_{\Sigma V}), \quad (6)$$

$$Y1_{\Sigma V} = Im(Z1_{\Sigma V}). \quad (7)$$

Резонансная частота определяется пересечением кривой $Y1_{\Sigma V}(f)$ с осью абсцисс, т.е. значением f , при котором величина $Y1_{\Sigma V}$ равна нулю.

По таким же формулам (5-7) определяются компоненты импеданса $R1_{\Sigma}$ и $Y1_{\Sigma}$ для открытых панелей, т.е. для случая, когда $V = \infty$ (второй член в формуле (4) обращается в ноль).

Вернемся к формуле (2). Для капиллярных трубок (т.е. при $|k_{\mu}r| < 1$) формула (2) может быть приближенно записана в виде [4,5]:

$$ZM_{\sigma} \approx \frac{8\mu h\sigma}{r^2} + i\frac{4}{3}\rho h\omega\sigma = 8\pi\mu h + i\frac{4}{3}\omega t, \quad (8)$$

где первый член соответствует закону Пуазейля для сопротивления при ламинарном течении вязкой жидкости по узкой капиллярной трубке, второй член

соответствует реактивной компоненте механического импеданса, которая определяет эффективную массу, участвующую в колебаниях, которая в $4/3$ раза больше фактической массы среды в трубке $m = \rho h \sigma$. Это означает, что в капиллярной трубке возникает присоединенная масса (или длина) за счет вязкости.

Сопоставим мнимые части комплексных выражений в уравнениях (2) и (8). Эффективная длина капиллярной трубки h_μ с учетом ее удлинения за счет вязкости может быть определена по формуле:

$$h_\mu = h \operatorname{Re} \left[\left(1 - \frac{2}{k_\mu r} \frac{J_1(k_\mu r)}{J_0(k_\mu r)} \right)^{-1} \right]. \quad (9)$$

Очевидно, что отношение h_{mu}/h должно стремиться к $4/3$ при $|k_\mu r \rightarrow 0|$. Это обстоятельство также будет проверено для исследуемых панелей.

Выражение (9) для эффективной длины капиллярной трубки h_μ может быть использовано для определения резонансной частоты f_0 другим способом. Для этого численно или графически нужно решить следующее трансцендентное уравнение:

$$f_0 - \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma \cdot N}{V \cdot h_\mu(f_0)}} = 0. \quad (10)$$

Второй член этого уравнения представляет собой известную формулу для определения собственной частоты резонатора Гельмгольца, учитывающую особенности рассматриваемого резонатора.

3. Описание эксперимента и его результатов

В эксперименте использовались перфорированные микроотверстиями панели различной толщины (от 3 до 40 мм) (см. рис. 1), изготовленные из неметаллических материалов. Диаметр микроотверстий на разных панелях составлял от 0,4 до 0,9 мм. Однако, вследствие сложности изготовления, микроотверстия на каждой из панелей имеют отклонения от цилиндрической формы, некоторый разброс по средним диаметрам, кроме того в микроотверстиях имеются заусенцы.

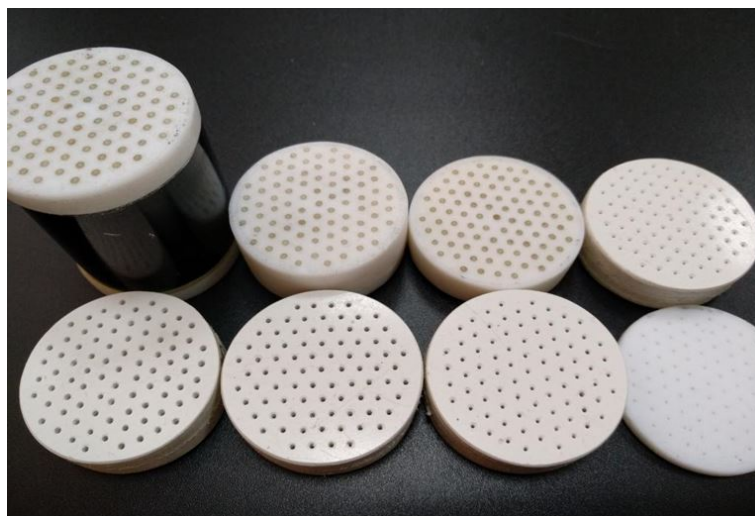


Рис. 1. Перфорированные микроотверстиями панели

С учетом всех этих особенностей была реализована следующая схема обработки. Для панели, пристыкованной к объему V , экспериментально определяется резонансная

частота. Радиус микроотверстий r определяется (уточняется) из условия равенства экспериментально определенной резонансной частоты и резонансной частоты, вычисленной теоретически. После этого вычисляются зависимости $R1$, $Y1$ и α от частоты и сопоставляются с соответствующими величинами, определенными экспериментально.

Такая процедура проделывалась для каждой панели, использованной в эксперименте. На рисунках 2 и 3 приведены полученные данные для двух панелей: одна максимальной толщины $h = 40,7$ мм, другая – минимальной $h = 2,9$ мм.

Для всех панелей в расчетах использовались следующие значения параметров: $c = 340$ м/с, $\rho = 1,205$ кг/м³, $\mu = 0,0000181$ Па·с, $S = 0,0007069$ м².

Данные по всем исследованным панелям содержатся в таблице 1, где приведены экспериментальные и рассчитанные значения для $R1$ и α на резонансной частоте. Все панели использовались с объемом полости резонатора, равным $V = 35,78$ мл.

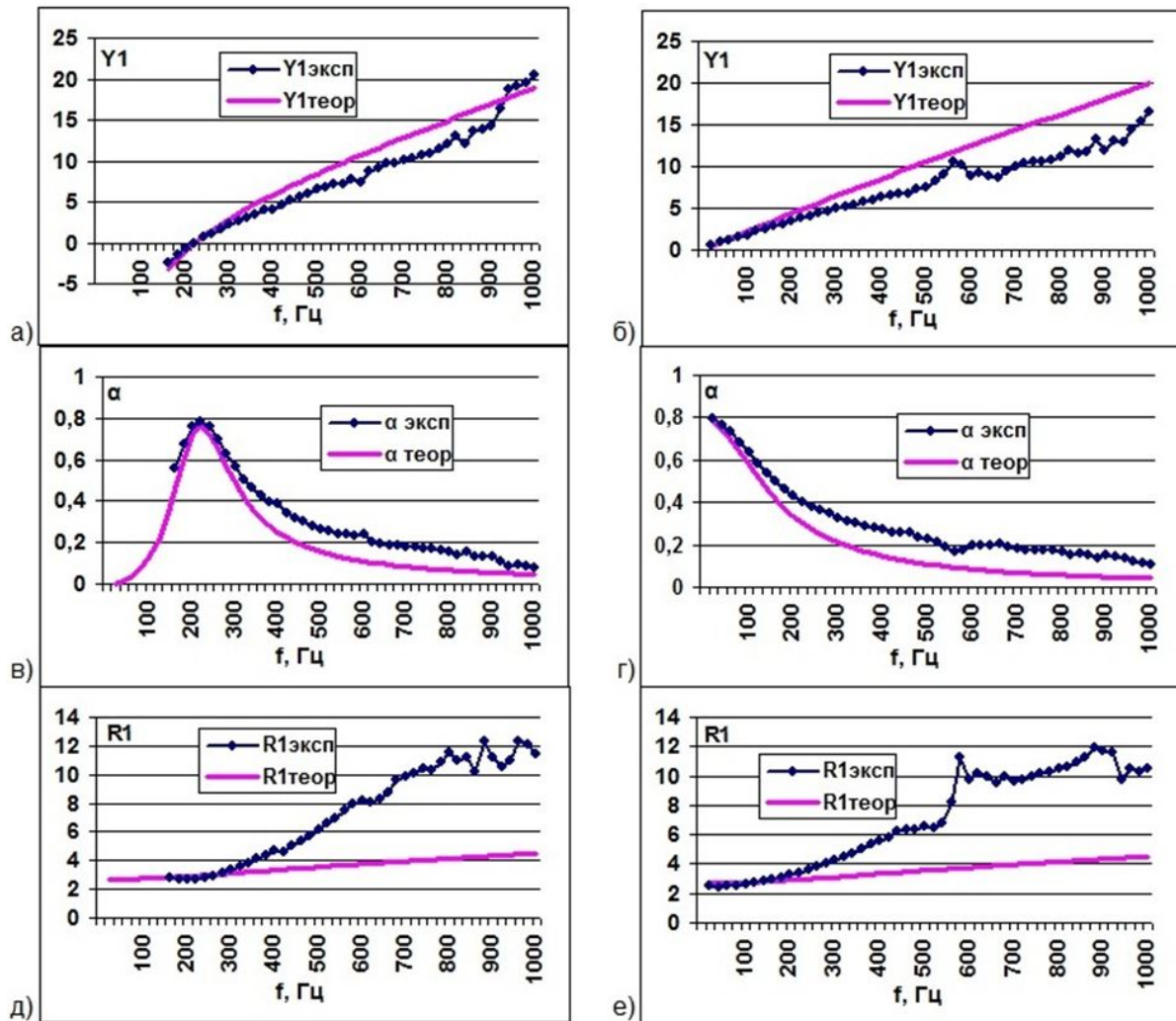


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические зависимости $Y1$, α и $R1$ от частоты для панели с параметрами: $h = 40,7$ мм, $N = 85$, $r = 0,3447$ мм.

а), в), д) – кривые, относящиеся к эксперименту с объемом $V = 35,78$ мл,
б), г), е) – кривые, относящиеся к эксперименту с открытой панелью ($V = \infty$).

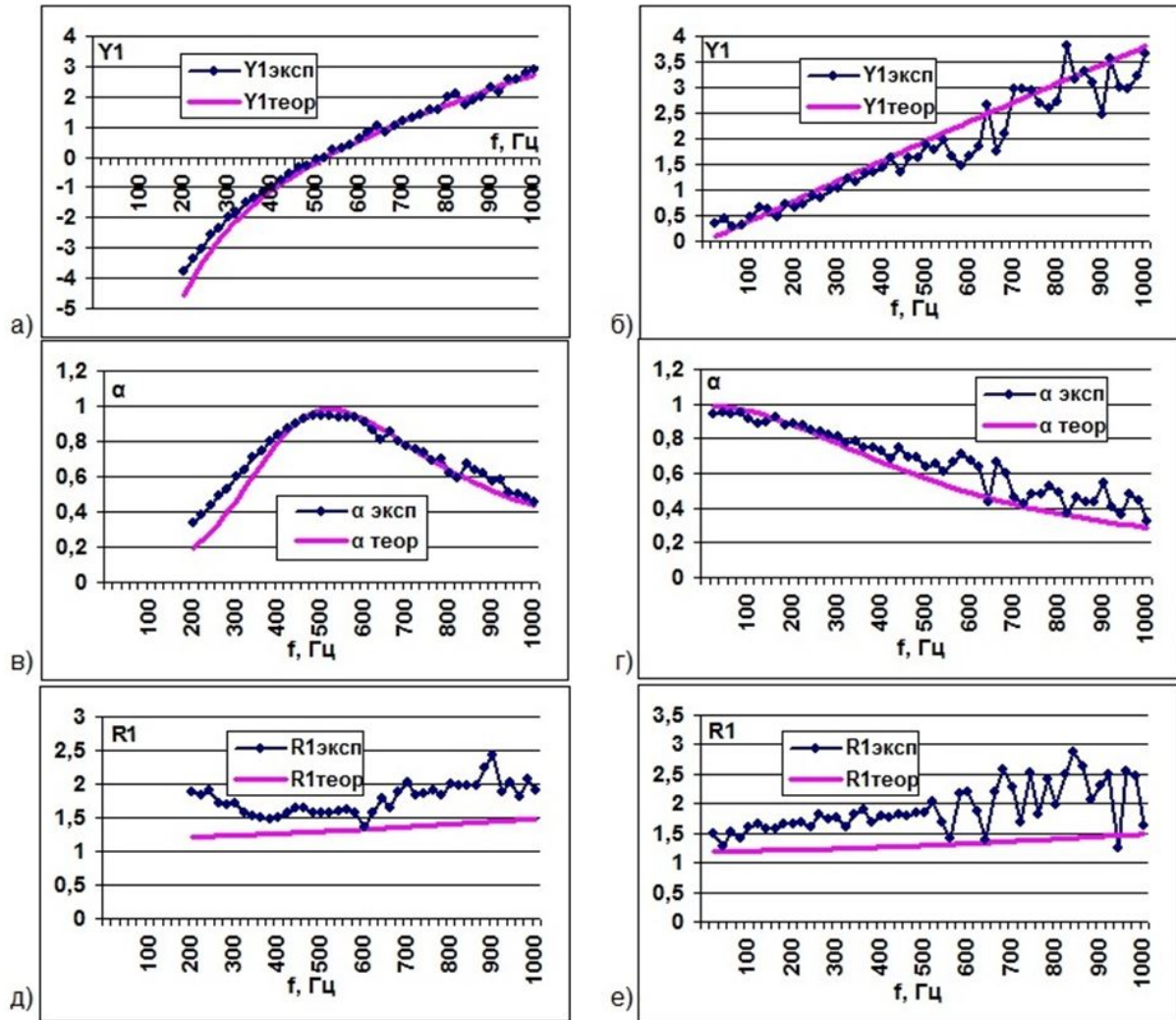


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические зависимости $Y1$, α и $R1$ от частоты для панели с параметрами: $h = 2,9$ мм, $N = 85$, $r = 0,2180$ мм.

а), в), д) – кривые, относящиеся к эксперименту с объемом $V = 35,78$ мл,
 б), г), е) – кривые, относящиеся к эксперименту с открытой панелью ($V = \infty$).

Таблица 1

Теоретически и экспериментально полученные данные для резонаторов с исследованными панелями при $V = 35,78$ мл.

Номер панели	h , мм	$h_{\mu}(f_0)/h$	r , мм	f_0 , Гц	$R1(f_0)$ теор	$R1(f_0)$ эксп	$\alpha(f_0)$ теор	$\alpha(f_0)$ эксп
1	2,9	1,312	0,2180	522,5	1,301	1,575	0,983	0,950
2	9,7	1,296	0,2957	389,8	1,356	1,368	0,977	0,976
3	14,8	1,302	0,3061	325,9	1,766	1,739	0,923	0,927
4	40,7	1,309	0,3447	220,7	2,944	2,730	0,757	0,785
5	9,8	1,197	0,4344	593,1	0,420	0,454	0,833	0,859
6	9,8	1,224	0,3947	532,8	0,556	0,592	0,919	0,934
7	9,9	1,301	0,2889	376,3	1,495	1,696	0,961	0,933
8	9,8	1,321	0,2403	312,2	2,877	3,683	0,766	0,672

Как можно видеть (см. рис. 2 – 3 и табл. 1), рассчитанные значения акустических характеристик резонаторов и открытых панелей близки к значениям, полученным экспериментально. При этом величины $R1(f_0)_{\text{теор}}$ и $R1(f_0)_{\text{эксп}}$ для резонаторов с разными панелями оказывались как больше, так и меньше единицы. Очевидно, что подбором параметров панели можно обеспечить равенство $R1(f_0)$ единице, что соответствует полному поглощению звука на резонансной частоте ($\alpha(f_0) = 1$).

Значения $h_{\mu}(f_0)/h$, вычисленные для каждой панели на резонансной частоте, также согласуются с теоретическими представлениями: чем меньше r и f_0 , тем ближе величина $h_{\mu}(f_0)/h$ к значению 1,333 (см. выражения (8-9)).

Для панели № 3 (см. табл. 1) были проведены опыты с различными объемами полости резонатора Гельмгольца. Полость имела форму цилиндра диаметром 29,4 мм, высота цилиндра H изменялась от 10,0 до 52,7 мм. Для резонатора с $H = 52,7$ мм по выше описанной схеме определялось значение r , которое использовалось для вычисления теоретических характеристик (включая резонансную частоту) резонаторов с другими значениями H . Полученные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Теоретически и экспериментально полученные данные для резонаторов с панелью № 3 (см. табл. 1) с параметрами $h = 14,8$ мм, $N = 85$, $r = 0,3061$ мм при различных значениях H

Номер эксперимента	$h_{\mu}(f_0)/h$	H , мм	V , мл	f_0 теор, Гц	f_0 эксп, Гц	$R1(f_0)$ теор	$R1(f_0)$ эксп	$\alpha(f_0)$ теор	$\alpha(f_0)$ эксп
1	1,302	52,7	35,78	325,9	325,9	1,766	1,739	0,923	0,927
2	1,295	40,0	27,16	375,2	375,5	1,815	1,774	0,916	0,922
3	1,285	30,0	20,37	434,9	433,7	1,876	1,849	0,907	0,911
4	1,269	20,0	13,58	535,9	536,8	1,982	1,966	0,892	0,894
5	1,237	10,0	6,79	767,6	768,9	2,214	2,254	0,857	0,851

Как видно из таблицы 2, теоретически рассчитанная резонансная частота для всех значений объема с высокой точностью совпадает с частотой, полученной

экспериментально. Это означает, что объемные эффекты, учитывающие возможное наличие в полости резонатора пристеночного термо-вязкого пограничного слоя, описанного в [8, 9], в нашем случае являются несущественными. Значения $R1(f0)$ и $\alpha(f0)$ также с высокой точностью дают совпадение теории и эксперимента.

Значения $h_\mu(f0)/h$, вычисленные для панели № 3 на резонансных частотах, согласуются с теоретическими представлениями: чем меньше $f0$, тем ближе величина $h_\mu(f0)/h$ к значению 1,333 (см. выражения (8-9)).

Таким образом, предложенный метод расчета дает хорошее согласие с экспериментом и не требует каких-либо дополнительных предположений.

Заключение

Наличие надежной теории позволяет производить расчет резонансных звукопоглощающих конструкций (см., например, [10]) на основе перфорированных микроотверстиями панелей, обеспечивающих при правильно подобранных параметрах практически полное поглощение звуковой энергии на резонансной частоте. При этом большое количество настраиваемых параметров (r , h , H и N/S) позволяет обеспечить это даже с учетом конструктивных ограничений на некоторые из этих параметров.

Список литературы

1. Быков А.И., Комкин А.И. Акустический импеданс круглых отверстий // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. – № 3 (21). – С. 34-44.
2. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 6. – С. 861-872.
3. Лебедева И.В., Драган С.П. Определение акустических характеристик в трубах с помощью двух микрофонов // Измерительная техника. – 1988. – № 8. – С.52.
4. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд-во Московского университета, 1960. – 336 с.
5. Крендалл И.Б. Акустика. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 168 с.
6. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. О присоединенной длине отверстий // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – №. 6. – С. 677-677.
7. Комкин А.И., Быков А.И. Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62. – № 3. – С. 277-287.
8. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Исследование акустических характеристик резонатора Гельмгольца // В сборнике трудов научной конференции «XXVII сессия Российского акустического общества и сессия научного совета РАН по акустике». – г. Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014 г.
9. Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – №. 4. – С. 356-363.
10. Храмов И.В., Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В. Определение акустических характеристик полномасштабного образца реальной однослойной сотовой звукопоглощающей конструкции на основе численного моделирования // В сборнике: Защита от повышенного шума и вибрации. Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. под редакцией Н.И. Иванова. – СПб.: 2019. – С. 231-243.

References

1. Bykov A.I., Komkin A.I. Akusticheskij impedans kruglyh otverstij // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. – № 3 (21). – S. 34-44.
2. Sobolev A.F. Poluempiricheskaya teoriya odnoslojnyh sotovyh zvukopogloshchayushchih konstrukcij s licevoj perforirovannoj panel'yu // Akusticheskij zhurnal. – 2007. – Т. 53. – № 6. – S. 861-872.
3. Lebedeva I.V., Dragan S.P. Opredelenie akusticheskikh harakteristik v trubah s pomoshch'yu dvuh mikrofonov // Izmeritel'naya tekhnika. - 1988. - № 8. - S.52.
4. Rzhvevkin S.N. Kurs lekcij po teorii zvuka. -- M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1960. – 336 s.
5. Krendall I.B. Akustika. - M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. - 168 s.
6. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. O prisoedinennoj dline otverstij // Akusticheskij zhurnal. - 2012. - Т. 58. - №. 6. - S. 677-677.
7. Komkin A.I., Bykov A.I. Inercionnaya prisoedinennaya dlina gorla rezonatorov Gel'mgol'ca // Akusticheskij zhurnal. — 2016. — Т. 62. — № 3. — S. 277-287.
8. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. Issledovanie akusticheskikh harakteristik rezonatora Gel'mgol'ca // V sbornike trudov nauchnoj konferencii «XXVII sessiya Rossijskogo akusticheskogo obshchestva i sessiya nauchnogo soveta RAN po akustike». – g. Sankt-Peterburg, 16-18 aprelya 2014 g.
9. Komkin A.I., Mironov M.A., Bykov A.I. Pogloshchenie zvuka rezonatorom Gel'mgol'ca // Akusticheskij zhurnal. - 2017. - Т. 63. - №. 4. - S. 356-363.
10. Khrantsov I.V., Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V Opredelenie akusticheskikh harakteristik polnomasshtabnogo obrazca real'noj odnoslojnoj sotovoj zvukopogloshchayushchej konstrukcii na osnove chislennogo modelirovaniya // V sbornike: Zashchita ot povyshennogo shuma i vibracii. Sbornik dokladov VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. pod redakciej N.I. Ivanova. 2019. S. 231-243.