

УДК: 534.833.5
OECD: 01.03.AA

О возможности реализации изотермического газового процесса в резонаторе Гельмгольца

Кезик В.И.

Старший научный сотрудник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, г. Москва, РФ

Аннотация

Зарегистрирован эффект снижения резонансной частоты резонатора Гельмгольца при помещении в его полость образцов из пористого материала с открытыми порами. Явление объясняется тем, что в воздухе, находящемся внутри пористого материала, реализуется изотермический газовый процесс. Это происходит благодаря активному теплообмену между скелетом пористого материала и непосредственно прилегающим к скелету воздухом. В остальной части объема полости, не занятой пористым материалом, реализуется обычный адиабатический газовый процесс. Получены описывающие явление формулы, которые хорошо подтверждаются экспериментальными данными. Учет предложенного подхода позволит более точно рассчитывать характеристики резонансных звукопоглотителей, имеющих в своей конструкции пористые материалы, а также характеристики систем во всех случаях, когда используются резонаторы с наполнением из пористого материала.

Ключевые слова: резонатор Гельмгольца, пористые среды, меламиновая губка, изотермический процесс, адиабатический процесс, политропический процесс.

On the possibility of implementing an isothermal gas process in a Helmholtz resonator

Kezik V.I.

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

Abstract

The effect of reducing the resonant frequency of the Helmholtz resonator when samples of porous material with open pores are placed in its cavity is recorded. The phenomenon is explained by the fact that an isothermal gas process is realized in the air inside the porous material. This is due to the active heat exchange between the skeleton of the porous material and the air directly adjacent to the skeleton. In the rest of the volume of the cavity, which is not occupied by a porous material, the usual adiabatic gas process is realized. Formulas describing the phenomenon have been obtained, which are well confirmed by experimental data. Taking into account the proposed approach will allow us to more accurately calculate the characteristics of resonant sound absorbers having porous materials in their design, as well as the characteristics of systems in all cases when resonators with a porous material filling are used.

Keywords: Helmholtz resonator, porous media, melamine sponge, isothermal process, adiabatic process, polytropic process.

Введение

При помещении в полость резонатора Гельмгольца твердых или жидких тел, которые можно считать несжимаемыми по сравнению с воздухом (жидкие среды, твердые тела различной формы), резонансная частота увеличивается в зависимости от изменяющегося объема воздуха в полости. Частота резонанса определяется достаточно точно, и известны методики определения объема жидких или твердых тел, основанные на измерении изменения частоты резонанса при помещении тел в полость резонатора [1].

Объем помещаемых в полость резонатора тел определяют по формуле:

$$V = V_0 \left[1 - \left(\frac{f_0}{f_V} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где V_0 – исходный объем полости резонатора, f_0 – наблюдаемая частота резонанса при исходном объеме, f_V – наблюдаемая частота резонанса после помещения в резонатор Гельмгольца тела объемом V .

Выражение (1) является следствием применения формулы (2) для определения резонансной частоты резонатора Гельмгольца [2] при разных объемах V_j , но при неизменных параметрах горла:

$$f_j = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{V_j}}, \quad (2)$$

где $K = \sigma/h$ – проводимость горла резонатора, σ – площадь горла резонатора, h – длина горла резонатора, c – скорость звука в воздушной среде.

Нас в данном случае не интересует точное вычисление резонансной частоты, для которого требуется учет поправок (присоединенная длина горла [3, 4], эффекты, связанные с вязкостью воздуха в горле [5]). Необходимо только чтобы величина этих поправок не сильно зависела от частоты. В нашем случае частота менялась не более, чем на 12% в опытах с меламином и не более, чем на 35% в опытах с водой, что позволяет считать величину проводимости горла неизменной. Тем не менее, были проведены опыты с водой, подтверждающие это предположение.

При помещении в полость резонатора Гельмгольца предмета из пористого материала с открытыми порами необходимо учесть уменьшение объема, занимаемого воздухом, т.к. волокна или другие элементы конструкции, представляющие жёсткий или нежёсткий несжимаемый скелет материала, занимают в полости определенный объем. Объем воздуха в полости может быть вычислен по формуле:

$$V_{00} = V_0 - \frac{M_s}{\rho_s}, \quad (3)$$

где V_0 – объем пустой полости, M_s – масса образца из пористого материала, ρ_s – плотность материала, из которого состоит скелет. Частота резонатора вычисляется по формуле (2).

Этим можно было бы и ограничиться. Однако, как показывает опыт, наблюдаемая частота резонатора существенно ниже, чем вычисленная по формуле (2) с использованием параметра $V_j = V_{00}$. Предполагаем, что наблюдаемое снижение частоты объясняется тем, что в воздухе, находящемся внутри пористого материала, реализуется изотермический газовый процесс. Это происходит благодаря активному теплообмену между скелетом пористого материала и непосредственно прилегающим к скелету воздухом. В остальной части объема полости, не занятой пористым материалом, реализуется обычный адиабатический газовый процесс.

1. Теоретическое описание явления

Определим частоту резонатора Гельмгольца в простейшем случае, когда его можно считать колебательной системой с сосредоточенными параметрами. Сосредоточенные параметры системы (см. рис 1) можно определить следующим образом. Масса воздуха, движущегося в горле резонатора, есть:

$$m = \rho h \sigma,$$

где h – длина горла, σ – площадь его поперечного сечения, ρ – плотность воздуха.

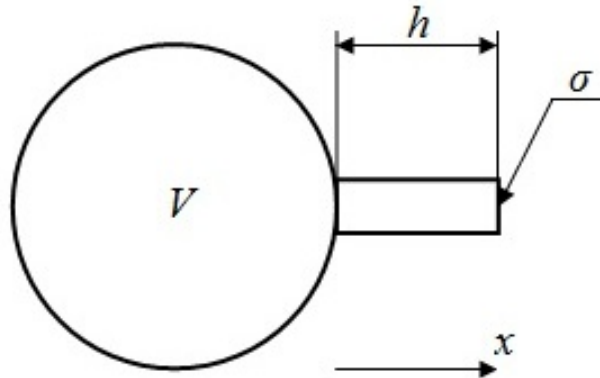


Рис. 1. Схематическое изображение резонатора Гельмгольца

Для определения упругости воздушного объема в полости представим себе, что воздушная пробка в горле смещается в сторону от полости (в положительном направлении относительно оси x) на расстояние δx ($\delta x > 0$). В результате этого смещения давление в полости понижается на $|\delta P|$ по отношению к атмосферному давлению P_0 ($\delta P < 0$), а масса воздуха, ранее занимавшая объем V , теперь занимает объем $V + \delta V$, где $\delta V = \sigma \cdot \delta x$. Считая этот газовый процесс адиабатическим, можем записать:

$$P_0 V^\gamma = (P_0 + \delta P)(V + \delta V)^\gamma, \quad (4)$$

где $\gamma = C_P/C_V = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха, C_P – теплоемкость воздуха при постоянном давлении, C_V – теплоемкость воздуха при постоянном объеме.

Равенство (4) можно привести к виду

$$1 + \frac{\delta P}{P_0} = \left(1 + \frac{\delta V}{V}\right)^{-\gamma}. \quad (5)$$

Если колебания давления являются малыми, то: $\frac{\delta V}{V} \ll 1$ и в разложении для правой части равенства (5) можно отбросить все члены ряда, начиная с третьего. В результате правая часть уравнения (5) запишется в виде:

$$\left(1 + \frac{\delta V}{V}\right)^{-\gamma} = 1 - \gamma \frac{\delta V}{V}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5) и произведя простые алгебраические преобразования, получим:

$$\delta P = -\frac{\gamma P_0}{V} \delta V. \quad (7)$$

Но $\delta V = \sigma \cdot \delta x$, а возвращающая сила есть $\sigma \cdot \delta P$. Отсюда можем определить коэффициент упругости воздушного объёма в полости (в адиабатическом случае) как отношение возвращающей упругой силы к величине смещения δx , ее вызвавшего:

$$k_a = \frac{\gamma P_0 \sigma^2}{V}. \quad (8)$$

Воспользовавшись известным в акустике соотношением [2]:

$$c^2 = \gamma \frac{P_0}{\rho}, \quad (9)$$

(где c – скорость звука), запишем выражение для коэффициента упругости воздушного объёма в полости в окончательном виде:

$$k_a = \frac{\rho c^2 \sigma^2}{V}. \quad (10)$$

Частота свободных колебаний резонатора определяется по формуле:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_a}{m}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{hV}}. \quad (11)$$

Нижние индексы a, i, n при обозначениях k, f, V, P означают принадлежность этих величин к адиабатическому, изотермическому и политропическому процессам соответственно.

Если считать газовый процесс в полости резонатора изотермическим, то выражение (4) может быть записано в виде (закон Бойля-Мариотта):

$$P_0 V = (P_0 + \delta P)(V + \delta V). \quad (12)$$

Произведя преобразования, аналогичные приведенным выше, получим выражение для коэффициента упругости воздушного объёма в случае изотермического газового процесса:

$$k_i = \frac{P_0 \sigma^2}{V} = \frac{\rho c^2 \sigma^2}{\gamma V}. \quad (13)$$

Частота свободных колебаний такого резонатора определяется по формуле:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_i}{m}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma hV}}. \quad (14)$$

Как видим, в адиабатическом случае воздушный объём обладает в γ раз большей жесткостью (а частота резонанса выше в $\gamma^{1/2}$ раз), чем в изотермическом. Заметим, что адиабатическая (фактическая, лапласова) скорость звука в свободной воздушной среде также в $\gamma^{1/2}$ раз больше изотермической (ньютоновской).

Предположим, что в некоторой части объема полости резонатора, равной V_a , реализуется адиабатический газовый процесс, а в другой (оставшейся) части объема полости, равной V_i , реализуется изотермический газовый процесс (см. рис. 2). Определим частоту свободных колебаний такого комбинированного резонатора.

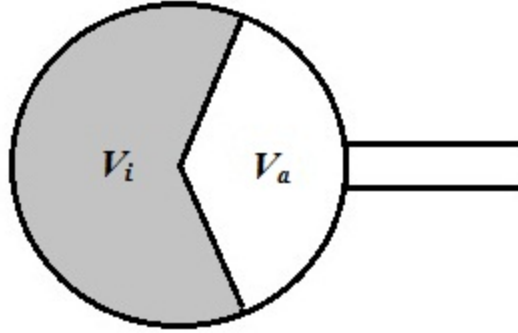


Рис. 2. Схематическое изображение комбинированного резонатора Гельмгольца

Смещение воздушной пробки в сторону резонатора на расстояние $|\delta x|$ ($\delta x < 0$) вызовет повышение давления как в адиабатической части объема полости, так и в изотермической. Объем воздуха, вошедшего в резонатор ($|\delta V| = |\sigma \cdot \delta x|$), распределится между адиабатической и изотермической частями объема полости. В адиабатическую часть войдет объем δV_a , а в изотермическую – объем δV_i , при этом $\delta V_a + \delta V_i = \delta V$. Запишем выражение (7), с учетом (9), для адиабатической и изотермической частей объема полости:

$$\delta V_a = -\frac{V_a}{\rho c^2} \delta P_a, \quad (15)$$

$$\delta V_i = -\frac{\gamma V_i}{\rho c^2} \delta P_i. \quad (16)$$

Очевидно, что значения δP_a и δP_i равны между собой, т.к. адиабатическая и изотермическая части объема полости не изолированы друг от друга.

Сложим левые и правые части уравнений (15) и (16), введя обозначение $\delta P = \delta P_a = \delta P_i$. После несложных преобразований получим:

$$\delta V = -\frac{V_a + \gamma V_i}{\rho c^2} \delta P. \quad (17)$$

Отсюда можем получить выражение для коэффициента упругости воздушного объема рассматриваемого комбинированного резонатора:

$$k = \frac{\rho c^2 \sigma^2}{V_a + \gamma V_i}. \quad (18)$$

Частота свободных колебаний этого резонатора определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{h(V_a + \gamma V_i)}}. \quad (19)$$

И, наконец, рассмотрим комбинированный резонатор, полость которого состоит из адиабатического объема V_a и объема V_n , где реализуется политропический газовый процесс. Политропический процесс описывается уравнением (4), в котором вместо параметра γ необходимо подставить параметр n – показатель политропы. Повторяя приведенные выше преобразования, получаем вместо выражений (11) или (14) выражение:

$$f_n = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{\frac{\gamma}{n} h V}}, \quad (20)$$

а вместо выражения (19) получаем выражение:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{h(V_a + \frac{\gamma}{n}V_n)}}. \quad (21)$$

Формулу (21) можно обобщить для резонатора, состоящего из двух политропических объемов V_{n_1} и V_{n_2} с показателями политропы n_1 и n_2 .

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{h(\frac{\gamma}{n_1}V_{n_1} + \frac{\gamma}{n_2}V_{n_2})}}. \quad (22)$$

Показатель политропы n меняется от 1 до 1,4 в зависимости от интенсивности теплообмена между скелетом пористого материала и непосредственно прилегающим к скелету воздухом. Если при действующей частоте колебаний давления в каждый момент времени температура воздуха равна температуре твердого скелета (интенсивный теплообмен – мелкая ячейка), газовый процесс можно считать изотермическим ($n = 1$). В другом предельном случае, когда теплообмен отсутствует (крупная ячейка или среда за пределами пористого материала), газовый процесс является адиабатическим ($n = \gamma = 1,4$). Очевидно, что существуют и промежуточные ситуации, зависящие от частоты f и среднего размера ячеек пористого материала, когда теплообмен происходит, но не является полным. В этом случае n принимает значение от 1 до 1,4.

2. Экспериментальная проверка теоретических выводов

Для экспериментальной проверки возможности реализации изотермического газового процесса в резонаторе Гельмгольца был выбран современный пористый материал – вспененный меламин, представляющий собой вспененный пластик на основе полимера меламин-формальдегидной смолы (меламиновая губка). Плотность этого вспененного материала очень мала ($\rho = 7,3 \text{ кг/м}^3$), он обладает жесткостью, значительно превышающей жесткость поролона (важное свойство для сохранения первоначального фиксированного объема образцов, помещаемых в резонатор), обладает мелкоячеистой структурой (средний размер ячеек составляет примерно 0,1 мм, что в 2-3 раза меньше, чем у поролона). Как и поролон, вспененный меламин создает очень малое сопротивление движению воздуха, т.е. является легко продуваемым.

Эксперимент заключался в том, что в резонатор Гельмгольца помещались образцы определенного объема, вырезанные из меламиновой губки. Регистрировалась резонансная частота полого резонатора и частота резонатора с помещенными в него образцами вспененного меламинного материала различного объема. Резонансная частота с высокой точностью определялась с помощью модифицированного метода двух микрофонов [6, 7]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Как правило, установка была ориентирована вертикально, с резонатором внизу.

При помощи двух стандартных микрофонов, установленных стационарно на боковой поверхности волновода на определенном расстоянии друг от друга и от торцевой стенки волновода (импедансной стенки), измеряется звуковое давление P_1 и P_2 в двух сечениях волновода и разность фаз φ_{12} между колебаниями давления в этих точках на каждой частоте зондирующего полигармонического сигнала, генерируемого громкоговорителем. По этим данным для каждой частоты рассчитываются значения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения ($\bar{r} = re^{i\theta}$) от торцевой стенки волновода по формулам [6, 7]:

$$r = \frac{\sqrt{(N^2 - 1)^2 + 4N^2(\cos^2 kL + \cos^2 \varphi_{12}) - 4N(N^2 + 1) \cos \varphi_{12} \cdot \cos kL}}{N^2 + 1 - 2N \cos(kL + \varphi_{12})},$$

$$\theta = 2kl_2 + \operatorname{arctg} \left[\frac{2N \sin kL(N \cos kL - \cos \varphi_{12})}{N^2 - 1 - 2N \cos kL(N \cos kL - \cos \varphi_{12})} \right],$$

где r – модуль комплексного коэффициента отражения \bar{r} , θ – аргумент комплексного коэффициента отражения, k – волновое число, φ_{12} – разность фаз сигналов регистрируемых с двух микрофонов, L – расстояние между микрофонами, l_2 – расстояние от первого микрофона до торцевой стенки волновода, $N = P_1/P_2$ – отношение амплитуд давления, измеренных в двух точках волновода.

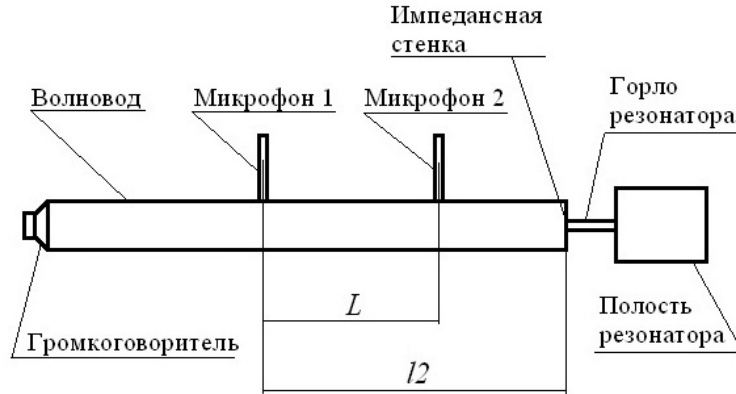


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

По величинам модуля коэффициента отражения (r) и его аргумента (θ) рассчитываются компоненты безразмерного удельного входного акустического импеданса исследуемого резонатора ($Z1 = R1 + iY1$) для каждой частоты по формулам [6, 7]:

$$R1(f) = \frac{1 - r^2}{1 + r^2 - 2r \cdot \cos \theta}, \quad Y1(f) = \frac{2r \sin \theta}{1 + r^2 - 2r \cdot \cos \theta}.$$

Таким образом, определялась зависимость реактивной составляющей входного удельного акустического импеданса резонатора от частоты, т.е. вид функции $Y1(f)$. Пересечение графика этой функции с осью абсцисс определяет частоту резонанса.

Однако, предварительно был проведен опыт с изменением объема полости резонатора с помощью заливаемого в него определенного количества воды. Параметры резонатора были следующие: $V_0 = 198$ мл, $h = 4,5$ см, $\sigma = 1,662 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ (диаметр горла $d = 0,46$ см). С помощью резонансной частоты, полученной для пустой емкости, по формуле (2) определялось экспериментальное значение проводимости горла K , которое оказалось равным $3,246 \cdot 10^{-4}$ м и которое использовалось во всех последующих расчетах. Скорость звука в расчетах принималась равной 344 м/с в соответствии с температурой воздуха во время эксперимента. Эти значения параметров использовались для вычисления $f_{0\text{теор}}$ по той же формуле (2) для полости резонатора с помещенным в нее различным количеством воды. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные и теоретически полученные данные опыта с изменением объема полости резонатора

Номер эксперимента	V_s , мл	V_a , мл	$f0_{\text{теор}}$, Гц	$f0_{\text{эксп}}$, Гц	Относит. погрешность, %
Пустая емкость	0	198,0	70,1	70,1	0
1 (вода)	30,0	168,0	76,1	76,1	0,01
2 (вода)	60,0	138,0	84,0	84,3	0,36
3 (вода)	90,0	108,0	94,9	94,8	0,11

Из таблицы видно, что формулы (1)-(2) дают приемлемое согласие эксперимента с теорией, т.е. проводимость горла резонатора (см. формулу (2)) можно считать неизменной в используемом частотном диапазоне.

Возвращаемся к опытам с меламином и поролоном. Полученное ранее значение параметра K использовалось для расчета резонансной частоты в опытах с меламином и поролоном по формуле (19). Значение параметра c , как и ранее, принималось равным 344 м/с. Экспериментальные и теоретически рассчитанные значения параметров в этих опытах приведены в таблице 2.

Таблица 2

Экспериментальные и теоретически полученные данные опыта с помещением образцов из вспененного меламина и поролона в полость резонатора

Номер эксперимента	V_s , мл	M_s , г	V_i , мл	V_a , мл	$f0_{\text{теор}}$, Гц	$f0_{\text{эксп}}$, Гц	Относит. погрешность, %
Пустая емкость	0	0	0	198,0	70,1	70,1	0
1 (меламин)	47,9	0,35	47,7	150,1	67,0	67,1	0,21
2 (меламин)	52,0	0,38	51,8	146,0	66,7	67,0	0,38
3 (меламин)	95,8	0,70	95,4	102,2	64,2	64,5	0,48
4 (меламин)	147,8	1,08	147,2	50,2	61,6	61,9	0,47
5 (поролон)	174,1	5,38	169,7	23,9	61,0	62,0	1,58

Обозначения в таблице:

V_s – объем образца вспененного меламина или поролона;

M_s – масса образца;

V_i – изотермический объем, т.е. объем воздуха, содержащегося в образце ($V_i = V_s - M_s/\rho_s$), где ρ_s – плотность невспененного меламина (1570 кг/м³) или плотность полиуретана (невспененного поролона) (1200 кг/м³);

V_a – адиабатический объем – объем в полости, не занятый образцом ($V_a = V_0 - V_s$), где V_0 – объем полого резонатора (в описываемых опытах $V_0 = 198$ мл).

Как видно из таблицы 2, имеется хорошее соответствие между рассчитанной и экспериментально зарегистрированной резонансной частотой для образцов из вспененного меламина. Из этого ряда выбивается опыт с поролоном. По-видимому, для поролона, ячейки которого намного крупнее, чем у меламина, предположение об изотермичности газового процесса является неверным. Но и адиабатическим этот процесс также не является. Значение резонансной частоты, вычисленное в предположении адиабатичности процесса по формуле (2) (с учетом формулы (3)) равно 70,9 Гц, что еще больше отличается

от экспериментального значения. Совпадение теоретического и экспериментального значения частоты получается при применении формулы (21), если считать газовый процесс в поролоне политропическим с показателем политропы $n = 1,036$. Как видим, газовый процесс в поролоне все-таки является близким к изотермическому.

Заключение

Экспериментально подтверждена возможность реализации изотермического газового процесса в резонаторе Гельмгольца. Учет предложенного подхода позволит более точно рассчитывать характеристики резонансных звукопоглотителей, имеющих в своей конструкции пористые материалы [8-10], а также характеристики систем во всех случаях, когда используются резонаторы с наполнением из пористого материала [11, 12].

Учет вводимых поправок также может быть полезным в задачах диагностики дыхательной системы животных и человека с помощью акустического зондирования [7, 13], т.к. паренхима легких также представляет собой мелкоячеистую структуру с размером ячейки (альвеолы) порядка 0,2-0,3 мм. Изотермичность газовых процессов в паренхиме легких является фактически доказанной с помощью измерений скорости звука в легких животных и человека [14]. С помощью измерений скорости звука доказана также изотермичность газовых процессов в пене, субстанции близкой к паренхиме легких [15-17].

Схожие с изложенными в данной статье подходы были реализованы в работе [18], где в качестве поправки к определению частоты резонатора Гельмгольца рассматривался изотермический процесс в пристеночной области полости резонатора. Однако в своих последующих работах [19, 20] авторы фактически от этих подходов отказались.

Список литературы

1. Webster E.S., Davies C.E. The Use of Helmholtz Resonance for Measuring the Volume of Liquids and Solids // *Sensors*. – 2010. – 10. – P. 10663–10672.
2. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд-во Московского университета. – 1960. – 336 с.
3. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. О присоединенной длине отверстий // *Акустический журнал*. – 2012. – Т. 58, № 6. – С. 677–677.
4. Комкин А.И., Быков А.И. Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца // *Акустический журнал*. – 2016. – Т. 62, № 3. – С. 277–287.
5. Кезик В.И. Акустические характеристики резонаторов Гельмгольца с перфорированными микроотверстиями панелями, используемыми в качестве горла // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Т. 7, № 2 (24) . – С. 130–138.
6. Лебедева И.В., Драган С.П. Определение акустических характеристик в трубах с помощью двух микрофонов // *Измерительная техника*. – 1988. – № 8. – С.52.
7. Драган С.П., Кезик В.И., Богомолов А.В. Физиологические аспекты импедансометрии легких // *Известия РАН. Серия биологическая*. – 2022. – № 2. – С. 181–190.
8. Cox T. J., D'Antonio P. Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, design and application Spon Press, London and New York (2004), chapter 6.
9. Allard, J. F., Atalla N., Propagation of Sound in Porous Media: modeling sound absorbing materials, Elsevier 2nd Ed., (2009), chapter 9.

10. Tayong R., Dupont T., Leclaire P. Sound absorption of a micro-perforated plate backed by a porous material under high sound excitation: measurement and prediction // International Journal of Engineering and Technology. – September 2013. – 2(4) – P. 281–292.
11. Selamat A, Xu M.B, Lee I.-J., Huff N.T. Helmholtz resonator lined with absorbing material // J. Acoust. Soc. Am. – February 2005. – Vol. 117, № 2. – P. 725–733.
12. Deshmukh N.N., Ansari A., Samuel A.A. Investigation of Effect of Porous Material on Performance of Helmholtz Resonator International Conference on Vibration Engineering, Science and Technology, INVEST22 At: Fr. C. Rodrigues Institute of Technology, Vashi, Navi Mumbai December 2022.
13. Драган С.П., Богомолов А.В., Кезик В.И. Анализ импедансных характеристик дыхательной системы животных и человека // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 187–195.
14. Дьяченко А.И., Михайловская А.Н. Респираторная акустика (обзор) // Труды ИОФАН. – 2012. – Т. 68. – С. 136–181.
15. Замащиков В.В., Какуткина Н.А. Экспериментальные исследования акустических свойств пены // Акустический журнал. – 1991. – Т. 37, Вып. 3. – С. 484–489.
16. Pierre J., Guillermic R.-M., Elias F., Drenckhan W., Leroy V. Acoustic characterisation of liquid foams with an impedance tube // Eur. Phys. J. E. – 2013. – 36: 113.
17. Pierre J., Gaulon C., Derec C., Elias F., Leroy V. Investigating the origin of acoustic attenuation in liquid foams // 2017. – HAL Id: hal-0153666.
18. 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.
19. Комкин А.И., Миронов М.А. Характеристики поглощения резонатора Гельмгольца // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2014. – № 6. – С. 146304–1–146304–5.
20. Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 4. – С. 356–363.

References

1. Webster E.S., Davies C.E. The Use of Helmholtz Resonance for Measuring the Volume of Liquids and Solids // Sensors. – 2010. – 10. – P. 10663–10672.
2. Rzhavkin S.N. Kurs lekcij po teorii zvuka. – М.: Izd-vo Moskovskogo universiteta. – 1960. – 336 s.
3. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. On the attached length of orifices // Acoustical Physics. – 2012. – Vol. 58, No. 6. – P. 628–632.
4. Komkin A.I., Bykov A.I. Inertial attached neck length of Helmholtz resonators // Acoustical Physics. – 2016. – Vol. 62, No. 3. – P. 269–279.
5. Kezik V.I. Akusticheskie harakteristiki rezonatorov Gel'mgol'ca s perforirovannymi mikrootverstiyami panyami, ispol'zuemymi v kachestve gorla // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 2 (24) . – S. 130–138.
6. Lebedeva I.V., Dragan S.P. Opredelenie akusticheskikh harakteristik v trubah s pomoshch'yu dvuh mikrofonov // Izmeritel'naya tekhnika. – 1988. – № 8. – S.52.
7. Dragan S.P., Kezik V.I., Bogomolov A.V. Physiological aspects of lung impedansometry // Biology Bulletin. – 2022. – Vol. 49, Issue 6. – P. 677–685.

8. Cox T. J., D'Antonio P. Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, design and application Spon Press, London and New York (2004), chapter 6.
9. Allard, J. F., Atalla N., Propagation of Sound in Porous Media: modeling sound absorbing materials, Elsevier 2nd Ed., (2009), chapter 9.
10. Tayong R., Dupont T., Leclaire P. Sound absorption of a micro-perforated plate backed by a porous material under high sound excitation: measurement and prediction // International Journal of Engineering and Technology. – September 2013. – 2(4) – P. 281–292.
11. Selamat A, Xu M.B, Lee I.-J., Huff N.T. Helmholtz resonator lined with absorbing material // J. Acoust. Soc. Am. – February 2005. – Vol. 117, № 2. – P. 725–733.
12. Deshmukh N.N., Ansari A., Samuel A.A. Investigation of Effect of Porous Material on Performance of Helmholtz Resonator International Conference on Vibration Engineering, Science and Technology, INVEST22 At: Fr. C. Rodrigues Institute of Technology, Vashi, Navi Mumbai December 2022.
13. Dragan S.P., Bogomolov A.V., Kezik V.I. Analysis of impedance characteristics of the respiratory systems of animals and human // Russian Journal of Biomechanics. – 2020. – Vol. 24, No. 2. – P.162–169.
14. D'yachenko A.I., Mihajlovskaya A.N. Respiratornaya akustika (obzor) // Trudy IOFAN. – 2012. – T. 68. – S. 136–181.
15. Zamashchikov V.V., Kakutkina N.A. Eksperimental'nye issledovaniya akusticheskikh svoystv peny // Akusticheskij zhurnal. – 1991. – T. 37, Vyp. 3. – S. 484–489.
16. Pierre J., Guillermic R.-M., Elias F., Drenckhan W., Leroy V. Acoustic characterisation of liquid foams with an impedance tube // Eur. Phys. J. E. – 2013. – 36: 113.
17. Pierre J., Gaulon C., Derec C., Elias F., Leroy V. Investigating the origin of acoustic attenuation in liquid foams // 2017. – HAL Id: hal-0153666.
18. 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.
19. Komkin A.I., Mironov M.A. Harakteristiki pogloshcheniya rezonatora Gel'mgol'ca // Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta MGU. – 2014. – № 6. – S. 146304–1-146304-5.
20. Komkin A.I., Mironov M.A., Bykov A.I. Sound absorption by a Helmholtz resonator // Acoustical Physics. – 2017. – Vol. 63, No. 4. – P. 385–392.