

## РАСЧЁТ ПЕРВОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ПЕРВОГО РЕЗОНАНСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА МР

© 2009 Е. А. Изжеуров<sup>1</sup>, М. В. Дегтярев<sup>1</sup>, Цзян Хунюань<sup>2</sup>, У Гочи<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup>Харбинский политехнический университет г. Харбин, Китай

Материал МР является однородным упругим пористым материалом, обладает газопроницаемостью, поэтому относится к пористым звукопоглощающим материалам. Можно выражать звукопоглощающее свойство материала МР первой резонансной частотой  $f$  и первым резонансным коэффициентом звукопоглощения  $\alpha_r$ . Чтобы вывести уравнение приближённого расчёта первой резонансной частоты материала МР предполагается распространение звуковой волны в материале МР без затухания. В работе получено уравнение расчёта первой резонансной частоты материала МР в функции  $\cos$ , из которой графическим способом получена первая резонансная частота. После сравнения значений первой резонансной частоты, полученных в результате решения формулы со значениями, полученными методом длинных линий, сделан вывод о большей точности нового метода.

*Материал МР, коэффициент звукопоглощения, акустический импеданс, резонанс, резонансная частота*

Первая резонансная частота и первый резонансный коэффициент звукопоглощения пористого звукопоглощающего материала являются важными параметрами, выражающими звукопоглощающие свойства пористого материала. Поэтому по структурным свойствам и формулам расчёта акустических параметров материала МР соответственно выведены формулы расчёта первой резонансной частоты и первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР. Результаты исследования являются теоретической основой изучения способности шумопоглощения материала МР.

1 Расчёт первой резонансной частоты материала МР

Основными параметрами звукопоглощающих свойств материала МР являются коэффициенты звукопоглощения  $\alpha_0$  и акустический импеданс  $Z_s$ , которые характеризуют звукопоглощающие свойства. Кривая звукопоглощающего свойства материала МР аналогична кривым других пористых звукопоглощающих материалов: с увеличением

частоты коэффициент звукопоглощения возрастает, возникают первая резонансная частота  $f_r$  и первый резонансный коэффициент звукопоглощения  $\alpha_r$ . Свыше резонансной частоты  $f_r$  величина коэффициента звукопоглощения находится между максимумом и минимумом, и с увеличением частоты коэффициент звукопоглощения стремится к постоянному. Поэтому можно выражать звукопоглощающее свойство материала МР первой резонансной частотой и первым резонансным коэффициентом звукопоглощения.

На практике материал МР расположен на жесткой стенке или с воздушным зазором. Метод расположенного на определённом расстоянии от жесткой стенки МР может улучшить низкочастотное поглощение. Структурные параметры материала МР, толщина воздушного зазора  $l$  и частота  $f$  обуславливают звукопоглощающие свойства материала МР.

Чтобы вывести уравнение приближённого расчёта первой резонансной частоты материала МР, по методу, приведенному в

источнике [6], предполагается распространение звуковой волны в материале МР без затухания. Акустический импеданс является чисто мнимым числом, и резонанс возникает, когда акустический импеданс равен нулю. Комплексный коэффициент отражения  $r$  в произвольной точке в материале:

$$r = \frac{Z_S - W}{Z_S + W} = R \exp(j2\Delta),$$

где  $W$  – волновой импеданс. Поэтому акустический импеданс равен

$$Z_S = -jW \cos \Delta. \tag{1}$$

Волновой импеданс материала МР равен

$$W = \frac{\sqrt{\chi}}{\sigma} \rho_0 c_0, \tag{2}$$

где  $\rho_0 c_0$  - волновой импеданс воздуха,  $\chi$  - структурный фактор материала, имеющий вид [7]

$$\chi = \chi_\omega \left\{ 0.68 \left[ \exp\left(\frac{0.25(1-\sigma)}{\sigma d}\right) - 1 \right] + 1 \right\},$$

где  $\chi_\omega$  является фактором от 1 до 4/3 и с увеличением частоты падает.

Из формулы (1) видно, что резонанс возникает, когда  $\Delta = (2n+1) \pi / 2$ . Из условия непрерывности импеданса на границе слоя материала МР и воздушного зазора, при том, что  $\Delta_l$  - половина фазового угла комплексного коэффициента отражения на границе в материале со стороны зазора в сумме с  $(2\pi f \sqrt{\chi} / c_0) h$  имеет в результате  $(2n+1)\pi/2$ ,

получаем уравнение расчёта первой резонансной частоты материала МР, где  $c_0$  - скорость звука в воздухе:

$$\cos\left(\frac{2\pi f}{c_0}(l + h\sqrt{\chi})\right) = \frac{1 - \sigma/\sqrt{\chi}}{1 + \sigma/\sqrt{\chi}} \cos\left(\frac{2\pi f}{c_0}(l - h\sqrt{\chi})\right). \tag{3}$$

Если правая и левая части уравнения (3) равны  $y$ , то первая резонансная частота материала МР получается графическим решением (рис. 1). На рис. 1 величина абсциссы

первой точки пересечения двух кривых является величиной первой резонансной частоты  $f_r$  материала МР. Сравниваем первую резонансную частоту, полученную графическим решением, с первой резонансной частотой, измеренной методом длинных линий. Результаты сравнения приведены в табл. 1.

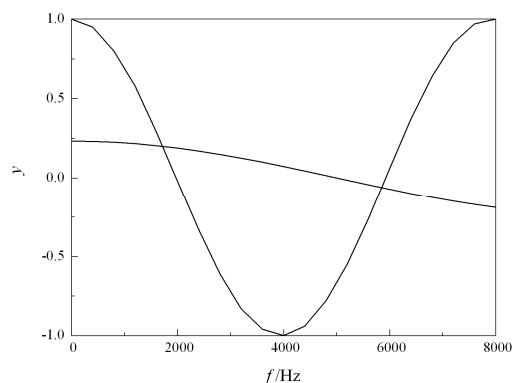


Рис. 1. Расчёт первой резонансной частоты материала МР графическим методом

Таблица 1- Сравнение расчётных значений первой резонансной частоты материала МР с измеренными значениями

Структурные параметры		Расчётные значения	Измеренные значения
$P=0.81, d=0.1\text{mm}, h=20\text{mm}$	$l=0\text{mm}$	3300	3400
	$l=20\text{mm}$	1600	1700
	$l=50\text{mm}$	950	1000
	$l=100\text{mm}$	600	630
$P=0.81, d=0.2\text{mm}, h=20\text{mm}$	$l=50\text{mm}$	1000	1100
$P=0.6, d=0.2\text{mm}, h=10\text{mm}$	$l=20\text{mm}$	1800	1700

Из табл. 1 видно, что значения первой резонансной частоты материала МР, полученные путём решения уравнением (3), более точны. Поэтому этот метод является лучшим методом расчёта первой резонансной частоты материала МР.

2 Расчёт первого резонансного коэффициента звукопоглощения МР

В общем случае акустический импеданс является комплексной величиной, на-

пример  $Z_s = X + jY$ . Резонанс возникает, когда мнимая часть составляющей акустического импеданса равна нулю, следовательно, коэффициент звукопоглощения является резонансным максимумом. Результаты экспериментальных исследований показывают, что резонансный максимум коэффициента звукопоглощения материала МР главным образом зависит от структурных параметров, а воздушный зазор в меньшей степени влияет на него. Поэтому при одинаковых структурных параметрах максимум первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР, расположенного на жесткой стенке, приближенно равен максимуму первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР, расположенного с воздушным зазором.

Чтобы исследовать звукопоглощающие свойства материала МР, нужны волновой импеданс  $W$  и постоянная распространения  $\gamma$ , которые полностью определяют акустическое поведение материала, и в общем случае являются комплексными величинами, зависящими от частоты и структурных свойств материала. Акустический импеданс материала МР, расположенного на жесткой стенке, имеет вид

$$Z_s = W \coth \gamma h. \quad (4)$$

На комплексной плоскости зависимость  $\coth \gamma h$  от частоты выглядит как логарифмическая спираль, которая с увеличением частоты стремится к единице. Когда мнимая часть равна нулю, значение  $\coth \gamma h$  находится между 0 и 1. Так как мнимая часть волнового импеданса  $W$  материала МР меньше вещественной части, то мнимая часть акустического импеданса приближается к нулю, когда  $\coth \gamma h$  становится вещественной величиной, возникает резонанс. Поэтому значение акустического импеданса приближено равно произведению вещественной части волнового импеданса и вещественной части  $\coth \gamma h$ .

Волновой импеданс  $W$  материала МР записывается в виде [8]

$$W = \sqrt{\frac{\chi \rho_0 k}{\sigma} - j \left( \frac{153(1-\sigma)^2 k \eta}{2\sigma^3 d^2 \omega} \right)}, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  - плотность воздуха,  $\eta$  - вязкость воздуха,  $\omega$  - угловая частота,  $k$  - модуль упругости материала.

Согласно формуле (5) вещественная часть  $W_x$  волнового импеданса  $W$  будет равна

$$W_x = \sqrt{\frac{A + \sqrt{A^2 + B^2}}{2}}, \quad (6)$$

где

$$A = \frac{1.3 \chi \rho_0 P_0}{\sigma^2} + \frac{198.9(1-\sigma)^3 \eta P_0}{\sigma^4 d^2 \omega (0.7(1-\sigma) + 25\sigma d)},$$

$$B = \frac{2.6 \chi \rho_0 P_0 (1-\sigma)}{\sigma^2 (0.7(1-\sigma) + 25\sigma d)} - \frac{99.45(1-\sigma)^2 \eta P_0}{\sigma^4 d^2 \omega}.$$

Постоянная распространения  $\gamma$  материала МР записывается в виде [8]

$$\gamma = j\omega \sqrt{\frac{\chi \rho_0}{\sigma k} - j \left( \frac{153(1-\sigma)^2 \eta}{2\sigma^3 d^2 k \omega} \right)}. \quad (7)$$

Полагаем далее постоянную распространения  $\gamma = \alpha + j\beta$ , где  $\alpha$  - коэффициент затухания,  $\beta$  - волновое число. Из формулы (7) получаем коэффициент затухания  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\omega}{2E} \sqrt{\frac{D(2CF + DE)}{C}}. \quad (8)$$

$\coth \gamma h$  можно записать [6]:

$$\coth \gamma h = \coth(\alpha + j\beta)h = \frac{\sinh 2\alpha h - j \sin 2\beta h}{\cosh 2\alpha h - \cos 2\beta h}. \quad (9)$$

Из формулы (9) и предыдущего анализа видно, что резонанс звукопоглощения материала МР возникает при  $2\beta h = \pi$ . Тогда формула (9) примет вид

$$\coth \gamma h = \frac{\sinh 2\alpha h}{\cosh 2\alpha h + 1} = \frac{\exp(2\alpha h) - \exp(-2\alpha h)}{\exp(2\alpha h) + \exp(-2\alpha h) + 2}. \quad (10)$$

Анализ результатов расчётных и экспериментальных исследований коэффициента затухания материала МР показывает, что результат расчёта меньше экспериментальных данных в области высоких частот. Это объясняется тем, что резонансы возникают в

порах материала, а теоретическая модель не учитывает часть затухания резонанса пор. Поэтому нужно делать поправку для формулы (10). Вставляем поправочный коэффициент 5 в формулу (10), тогда значение  $\coth \gamma h$  лучше совпадает с действительным значением. Так из формулы (10), при возникновении первого резонанса для материала МР, акустический импеданс равен:

$$Z_s = X = \frac{\exp(2\alpha h) - \exp(-10\alpha h)}{\exp(2\alpha h) + \exp(-0.4\alpha h) + 2} \sqrt{\frac{A + \sqrt{A^2 + B^2}}{2}}, \quad (11)$$

а формула расчёта первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР будет следующей:

$$\alpha_r = \frac{4X}{(X+1)^2}. \quad (12)$$

Подстановка формулы (11) в (12) дает первый резонансный коэффициент звукопоглощения материала МР. Результаты расчёта и измерения первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение расчётных значений первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР с измеренными значениями

Структурные параметры	Расчётные значения	Измеренные значения
$P=0.81, d=0.1\text{mm}, h=20\text{mm}$	0.92	0.94
$P=0.81, d=0.1\text{mm}, h=30\text{mm}$	0.95	0.97
$P=0.81, d=0.2\text{mm}, h=20\text{mm}$	0.68	0.70
$P=0.62, d=0.1\text{mm}, h=20\text{mm}$	0.80	0.82
$P=0.6, d=0.2\text{mm}, h=20\text{mm}$	0.99	0.97

Из табл. 2 видно, что расчётные значения первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР более точны. Поэтому этот метод может считаться точным методом расчёта первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР.

#### Вывод

1. Выведено уравнение расчёта первой резонансной частоты материала МР в функ-

ции  $\cos$ , учитывающее распространение колебаний без затухания в пористом материале. При графическом решении результаты расчёта первой резонансной частоты достаточно точные. Видно, что теоретический метод расчёта первой резонансной частоты материала МР более практичен и точен.

2. Выведена формула расчёта первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР по теоретическим формулам расчёта акустических параметров материала МР. Причём, учитывая влияние затухания резонанса пор материала, для  $\coth \gamma h$  сделана поправка. Результаты расчёта первого резонансного коэффициента звукопоглощения более точны. Результаты расчёта позволяют сказать, что формула расчёта первого резонансного коэффициента звукопоглощения материала МР достаточно точно и полно учитывает влияние на неё многих факторов.

#### Библиографический список

1. ZHANG Qiang, WANG Huaming, HU Zhangwei. Analysis for helicopter noise signal based on wavelet transform. *Acta Acustica*(In Chinese), 2001; 26(5): p.450—454.
2. Gerard A., Berry A., Masson P. Control of tonal noise from subsonic axial fan. Part 2: active control simulations and experiments in free field. *Journal of Sound and Vibration*, 2005; 288(4-5): p.1077—1104.
3. Audi M S. Optimum attenuation of gas turbine noise by acoustical corner treatment. *Applied Acoustics*, 1992; 35(4): p.283—295.
4. Tam C K W, Pastouchenko N N, Schlinker R H. Noise source distribution in supersonic jets. *Journal of Sound and Vibration*, 2006; 291(1-2): p.192—201.
5. Изжеуров, Е. А. Формирование элементов конструкций гидродинамического тракта энергетических установок из упругого пористого материала МР, / Е. А. Изжеуров.. М.: Машиностроение. 2001

6. C. Zwicker, C. W. Kosten. Sound absorbing materials. Beijing: Science press, 1960.

7. JIANG Hongyuan, WU Guoqi, Izzheurov E A. Research on sound absorption performance of metal rubber material. *Acta Acustica*(In Chinese), 2008.

8. JIANG Hongyuan, WU Guoqi, Izzheurov E A. Theoretical calculation and experiment study on the acoustic parameters of metal rubber material. *Acta Acustica*(In Chinese), 2007; 32(6): p.542—546.

### References

1. ZHANG Qiang, WANG Huaming, HU Zhangwei. Analysis for helicopter noise signal based on wavelet transform. *Acta Acustica*(In Chinese), 2001; 26(5): p.450—454.

2. Gerard A., Berry A., Masson P. Control of tonal noise from subsonic axial fan. Part 2: active control simulations and experiments in free field. *Journal of Sound and Vibration*, 2005; 288(4-5): p.1077—1104.

3. Audi M S. Optimum attenuation of gas turbine noise by acoustical corner treatment. *Applied Acoustics*, 1992; 35(4): p.283—295.

4. Tam C K W, Pastouchenko N N, Schlinker R H. Noise source distribution in supersonic jets. *Journal of Sound and Vibration*, 2006; 291(1-2): p.192—201.

5. Izzheurov E.A. The forming of hydro-gas tract construction elements made from material MR. Moscow. Machinesindustry. 2001.

6. C. Zwicker, C. W. Kosten. Sound absorbing materials. Beijing: Science press, 1960.

7. JIANG Hongyuan, WU Guoqi, Izzheurov E A. Research on sound absorption performance of metal rubber material. *Acta Acustica* (In Chinese), 2008.

8. JIANG Hongyuan, WU Guoqi, Izzheurov E A. Theoretical calculation and experiment study on the acoustic parameters of metal rubber material. *Acta Acustica*(In Chinese), 2007; 32(6): p.542—546.

## CALCULATION OF THE FIRST RESONANT FREQUENCY AND THE FIRST RESONANT FACTOR OF A SOUND ABSORPTION OF MATERIAL MR

© 2009 E. A. Izzheurov<sup>1</sup>, M. V. Degtyarev<sup>1</sup>, Jiang Hongyuan<sup>2</sup>, Wu Guoqi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Kharbin Polytechnic University

It is possible to express sound-proof property of material MR (MR) by the first resonant frequency (FRF) and by the first resonant factor of a sound absorption  $a_g$ . In work the equation of calculation of the FRF of MR in function of  $\cos$ , from which the graphic way receives the FRF is received. After comparison of values of the FRF treated as a result of the decision of the formula with values, received by a method of long lines, it is drawn a conclusion on greater accuracy of new method. Considering influence of attenuation of a resonance of pores, for both  $\gamma$  the amendment is made. As a result of the decision of two equations are received the first resonant factor of a sound absorption  $a_g$ . After comparison with the measured values  $a_g$ , it is drawn a conclusion on accuracy of calculation information.

*Material MR, factor of a sound absorption, sound-proof property, acoustic impedance, resonance, resonant frequency*

### Информация об авторах

**Изжеуров Евгений Александрович**, доктор технических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: [izj@ssau.ru](mailto:izj@ssau.ru). Область научных интересов: перспективные материалы, теплопередающие конструкции энергетических установок, звукопоглощение пористых материалов.

**Дегтярёв Михаил Владимирович** – аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: [mvd.samara@gmail.com](mailto:mvd.samara@gmail.com). Область научных интересов: перспективные материалы в авиа-, ракетно- и двигателестроении, в медицинской технике и нефтегазовой промышленности.

**Цзян Хунюань**, профессор кафедры деталей машин Харбинского политехнического университета, г. Харбин, Китайская Народная Республика. Тел. 1086-451-6418028. Область научных интересов: звукопоглощение пористых материалов.

**У Гочи**, докторант кафедры деталей машин Харбинского политехнического университета, г. Харбин, Китайская Народная Республика. Область научных интересов: звукопоглощение пористых материалов.

**Izzheurov Evgeny Aleksandrovich**, doctor of science, professor of the Samara State Aerospace University. E-mail: [izj@ssau.ru](mailto:izj@ssau.ru). Area of research: sealing made of MR material.

**Degtyarev Michael Vladimirovich**, postgraduate of the Samara State Aerospace University. E-mail: [mvd.samara@gmail.com](mailto:mvd.samara@gmail.com). Area of research: sealing made of MR material.

**Jiang Hongyuan**, professor of Kharbin Polytechnic University. Phone: 1086-451-6418028. Area of research: sealing made of MR material.

**Wu Guoqi**, postgraduate of Kharbin Polytechnic University. Area of research: sealing made of MR material.