

УДК: 534

OECD: 01.03.AA ACOUSTICS

Потери акустической энергии при прохождении звуковой волны через пористо-волокнистый материал

Герасимов А.И.¹, Васильев М.Д.^{2*}, Светлоруссова А.М.³¹ Доцент, к.т.н, МГСУ, Москва, Россия² Студент-магистр, МГСУ, Москва, Россия³ Студент-магистр, МГСУ, Москва, Россия

Аннотация

В настоящей статье рассматривает вопрос наличия и учет потерь звуковой энергии волны при ее прохождении в пористо-волокнистых материалах, рассматривается роль динамической вязкости материала в данном процессе. Рассматривается сопротивление вязкого трения в зависимости от размера пор. Вывод формулы потери акустической энергии при прохождении звуковой волны через пористо-волокнистый материал, а, следовательно, поглощение акустической энергии, вызванные вязкостью (коэффициент вязкости – коэффициент потерь) и теплопроводностью (коэффициент теплопроводности) материала.

Ключевые слова: потери акустической энергии, пористо-волокнистые материалы, акустические материалы.

Loss of Acoustic Energy During the Passage of a Sound Wave Through a Porous Fibrous Material

Gerasimov A.I.¹, Vasilyev M.D.^{2*}, Svetlorussova A.M.²¹ PhD, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia² Master's student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia³ Master's student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Abstract

We consider the issue of the presence and accounting of the losses of sound energy of a wave during its passage in porous-fibrous materials; the role of the dynamic viscosity of the material in this process is considered. Viscous friction resistance is considered depending on the pore size. The derivation of the formula for the loss of acoustic energy during the passage of a sound wave through a porous fibrous material, and, consequently, the absorption of acoustic energy caused by the viscosity (viscosity coefficient - loss coefficient) and thermal conductivity (thermal conductivity) of the material.

Keywords: loss of acoustic energy, porous fibrous materials, acoustic materials.

Введение

Как известно [1,4], по своим механическим характеристикам акустические материалы из минерального и стеклянного волокна, относятся к упруго-вязким и

*E-mail: mick03vasil@mail.ru (Васильев М.Д.)

материалам, механические свойства которых определяются главным образом модулем упругости и вязкостью. При распространении звука в атмосфере на значительные расстояния существенную роль играет поглощение звука – часть энергии звуковой волны превращается в тепло. Эти потери энергии пропорциональны полной энергии волны, т.е. на каждой единице длины пути распространения рассеивается одна и та же относительная доля всей энергии волны. При поглощении поток звуковой энергии переходит в тепловой поток, а при рассеянии остается звуковым, но уходит из направленно распространяющегося пучка. Поглощение звука обуславливается внутренним трением и теплопроводностью среды. Для одной и той же среды поглощение поперечных волн меньше, чем продольных, так как они не связаны с адиабатическими изменениями объема, при которых появляются потери на теплопроводность [2,4].

1. Вывод формулы потери акустической энергии при прохождении звуковой волны через пористо-волоконистый материал

Ранее было изучено [4,5], что акустическая эффективность данных пористо-волоконистых материалов в значительной степени определяется их физико-механическими и волновыми параметрами, характеризующих их свойства: динамический модуль упругости, коэффициент потерь, постоянная распространения и волновое сопротивление в теории линейной вязкоупругости по аналогии с Законом Гука ($\sigma = E \cdot \varepsilon$), принято считать функцию $E_{(iw)}^*$ – комплексным динамическим модулем упругости.

$$E_{(iw)}^* = R_e \cdot E_{(iw)}^* + I_m \cdot E_{(iw)}^*, \quad (1)$$

где: $R_e \cdot E_{(iw)}^* = E_{\Delta}(\omega)$ – действительная часть – динамический модуль упругости;

$I_m \cdot E_{(iw)}^* = E\eta(\omega)$ – мнимая часть – модуль потерь;

η – коэффициент потерь при колебаниях в результате внутренних потерь в материале.

Как известно, процесс прохождения звука через слой пористо-волоконистого материала сопровождается затуханием и поглощением энергии звуковых волн в порах материала, вызванной механической вязкостью (трением) и динамической теплопроводностью [1].

В акустических системах, которые представляют собой пористо-волоконистые материалы, звуковая энергия превращается в тепловую в результате вязкого сопротивления за счет передачи звуковых волн через поры (узкие каналы) [2,3].

Поры – узкие каналы, являются примерами акустических сопротивлений. Кроме активного сопротивления имеется также реактивное сопротивление: отношение этих двух составляющих сопротивление, является функцией размеров. Данный факт виден из уравнения акустического импеданса узкого канала (щели) [1]:

$$Z_A = \frac{\mu \cdot l}{h^3 \cdot b} + j \frac{6\rho \cdot l \cdot \omega}{5b \cdot h}, \quad (2)$$

где: μ – коэффициент вязкости, равный для воздуха $1,86 \cdot 10^{-4}$ г/см³;

ρ – плотность материала, г/см³;

l – длина щели в направлении потока, см;

b – ширина щели в направлении потока, см;

h – высота щели в направлении потока, см;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с.

Рассмотрим процесс поглощения, обусловленный вязкостью. Уравнение распространения плоской звуковой волны в пористой среде с учетом сопротивления,

которое представляет влияние вязкости [4]:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + R \cdot v \quad (3)$$

Если поры (каналы) очень малы, – сопротивление вязкого трения значительно превосходит инерционное и уравнение (3) принимает вид:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial x} = R \cdot v \quad (4)$$

Введем смещение, и получим следующий вид:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial x} = R \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

Воздушное сопротивление R (активное) прямо пропорционально динамической вязкости μ и обратно пропорционально квадрату радиуса канала (в соответствии с моделью Рэлея):

$$R = \frac{8\mu}{a^2} \quad (6)$$

С другой стороны с учетом уравнения непрерывности (непосредственные вычисления изменения давления ρ в зависимости от сжатия воздуха в порах материала) имеет вид:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где S – динамическая жесткость воздуха.

Из уравнений (2) и (6) получим:

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (8)$$

В соответствии с [4], в узких порах (каналах) контакт с поверхностью значителен и это приводит к тому, что теплообмен совершается мгновенно и процесс протекает скорее изотермически, чем адиабатически, при этом:

$$\frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial V}{V} = 0; \quad pV = const, \quad (9)$$

где V – объем пор, заполненных воздухом.

$$S = -\frac{\partial V}{V \partial \rho} = \frac{1}{\rho}. \quad (10)$$

Для скорости распространения звука в вязкой среде [5]:

$$c_1^2 = \frac{1}{\rho_0 S} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{c^2}{b}, \quad (11)$$

где b – отношение удельных теплот при постоянном давлении и постоянном объеме.

Откуда: $\frac{1}{S} = \frac{\rho_0 \cdot c_0^2}{b}$.

С учётом выражения (11) и уравнения (8) запишем в виде:

$$\frac{\rho_0 \cdot c_0^2}{b} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (12)$$

или

$$c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{b \cdot R}{\rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (13)$$

Решением уравнения может быть:

$$P(x) = \rho_0 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-\gamma x}, \quad (14)$$

$$\bar{V}(x) = V_0 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-\gamma x}, \quad (15)$$

где p_0 и V_0 – амплитуды избыточного звукового давления и колебательной скорости;

γ – постоянная распространения 1/см;

ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$, Гц.

$\gamma = \alpha + i\beta$, где α – коэффициент затухания амплитуды давления плоской звуковой волны в порах материала.

$$\beta = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{\omega}{c_0} - \text{фазовая постоянная.}$$

Фазовая постоянная воздуха в порах материала равно волновому числу $k = \frac{2\pi f}{c_0}$.

Комплексное волновое число состоит из действительной и мнимой составляющих:

$$\bar{k} = \frac{\omega}{c_0} + \frac{i\bar{\mu}}{2\rho_0 c_0} \quad (16)$$

Коэффициент вязкости μ можно определить через структурный фактор Q (структурная характеристика волокнистого материала) [4], по формуле:

$$Q = \frac{q + q_0}{\sqrt{k \cdot d_0}}, \quad (17)$$

где $q = 0,01\rho_1/\rho_0$ – приведенная плотность, пропорциональная отношению плотности материала ρ_1 , кг/м³ и воздуха ρ_0 , кг/м³, при $t = 20^\circ\text{C}$, тогда: $q = p/123$,

k – волновое число воздуха; $k = \frac{2\pi f}{c_0}$;

d_0 – диаметр волокна, мкм.

Отсюда $q_0 = (10q^2 + 0,5q^{-1} + 0,5 \cdot k^2 \cdot d^4 \cdot h^{-2})^{-1}$ – величина, учитывающая влияние податливости скелета волокнистой среды на ее акустические свойства, где h – длина волокна, см.

При прохождении звуковой волны процесс сжатия воздуха в порах (каналах) сопровождается теплообменом между воздухом и поверхностью пор.

Распространение и поглощение звука (звуковой волны, звуковой энергии) в пористом материале с учетом вязкости, вызывающей переход звуковой энергии в тепловую, описывается дифференциальным уравнением [4,5]:

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{Q}{\pi} \cdot \rho_0 \cdot \frac{dV}{dt} + rv, \quad (18)$$

где: v – скорость колебаний, м/с;

r – удельное сопротивление продуванию, Па·с/м.

Исходя из [4], поглощение акустической энергии, вызванной вязким сопротивлением описывается формулой:

$$\alpha_1 = \frac{8\pi^2\mu}{3\lambda^2\rho_0c_0}, \quad (19)$$

где λ – длина волны, м.

Рассмотрим механизм затухания, обусловленный теплопроводностью (без учета вязкого сопротивления) [5]. В этом случае в систему уравнений, описывающих распространение плоской звуковой волны в порах материала, добавляем уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (20.1)$$

Отсюда преобразуем:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (20.2)$$

Преобразуем вышеописанные формулы в систему:

$$\begin{cases} \rho_0 \cdot c_0 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ P = \rho \cdot \bar{R} \cdot T \end{cases} \quad (21)$$

где $\bar{R}$ – газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура, К.

При постоянном давлении уравнение теплопроводности имеет однородный вид:

$$Q = A_1 \cdot e^{i\gamma x} + A_2 \cdot e^{-i\gamma x}, \quad (22)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды бегущей (либо стоящей) волны и экспоненциально затухающих волн соответственно, м.

После ряда преобразований получаем дисперсное соотношение:

$$k = \pm \frac{\omega}{c_0} \sqrt{0,7(1 + \frac{i \cdot C_p \cdot \rho_0}{\lambda \cdot \omega}) \pm \sqrt{0,49(1 + \frac{i \cdot C_p \cdot \rho_0}{\lambda \cdot \omega} - 1,4 \frac{i \cdot C_p \cdot \rho_0}{\lambda \omega})}}, \quad (23)$$

где C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении,
 λ – коэффициент теплопроводности.

Знак «+» (плюс) под корнем дает характеристику акустической волны, а знак «–» (минус) – тепловой.

Потери акустической энергии, вызванные теплопроводностью можно оценить коэффициентом поглощения α_2 .

$$\alpha_2 = \frac{2\pi^2 \cdot f^2}{c_0^2 \cdot \rho_0 \cdot c_0} \cdot \frac{\lambda}{c_p} \cdot (\frac{c_p}{c_v} - 1) \quad (24)$$

Поскольку показатель адиабаты для воздуха $\frac{c_p}{c_v} = 1,4$, выражение (24) запишем в виде:

$$\alpha_2 = \frac{2\omega^2}{c_0^2 \cdot W_1} \cdot \frac{0,4 \cdot \lambda}{c_p} \quad (25)$$

где W_1 – волновое сопротивление воздуха.

Суммарные потери, а, следовательно, поглощение акустической энергии, вызванные вязкостью (коэффициент вязкости – коэффициент потерь) и теплопроводностью (коэффициент теплопроводности) материала, получим в виде:

$$\alpha_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \mu}{c_0^2 \cdot W_1} + \frac{2\omega^2}{c_0^2 \cdot W_1} \cdot \frac{0,4\lambda}{c_p} \quad (26)$$

Закключение

Как показали исследования [2,4,5], наиболее существенную роль в процессе потери звуковой энергии в пористо-волоконистых материалах играет динамическая вязкость ($\mu = \eta$), потери, вызванные теплопроводностью, составляют не более 10% от величины μ .

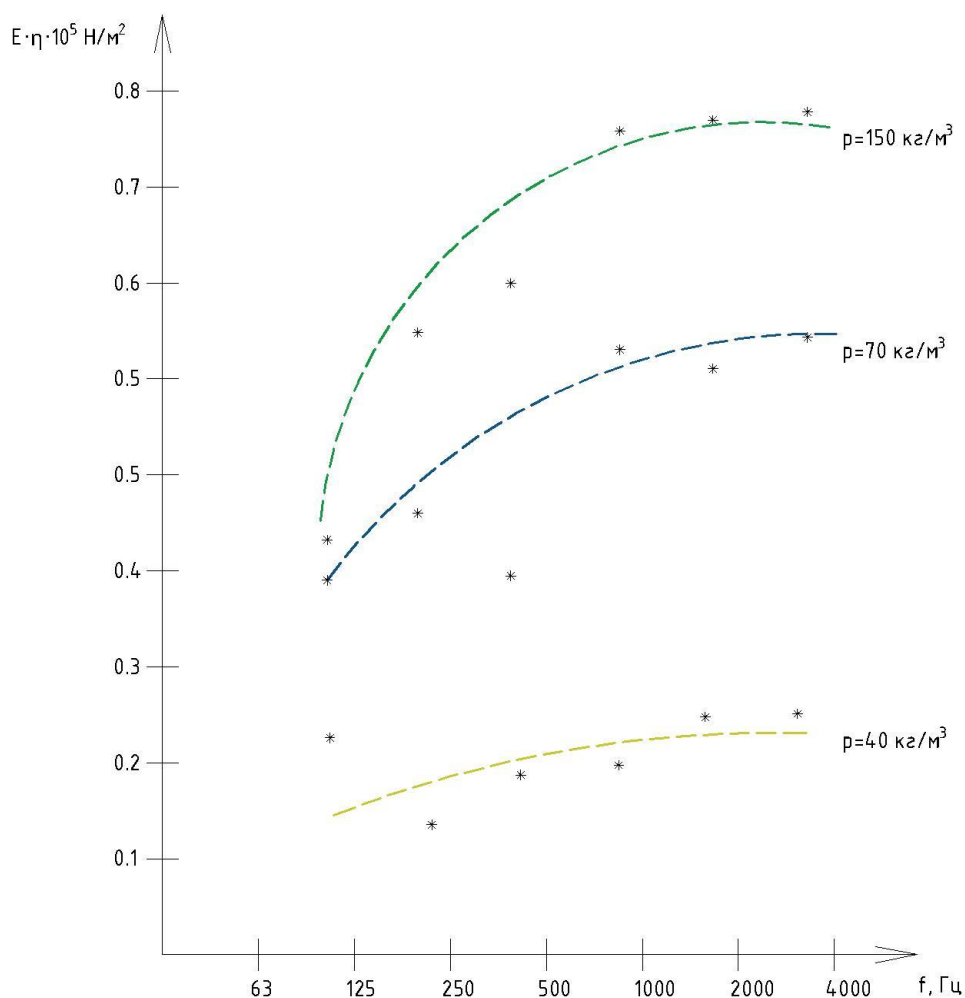


Рис. 1. Частотные характеристики динамического модуля потерь минераловатных материалов ISOVER толщиной 50 мм.

На рис. 1, в качестве примера, представлены экспериментальные частотные

характеристики динамического модуля потерь для минераловатных материалов ISOVER, толщиной 50 мм и плотностью $\rho = 40, 70$ и 150 кг/м^3 .

Таким образом, потери, вызванные динамической вязкостью, в основном определяют и сопровождают процесс поглощения звуковой энергии в пористо-волоконном материале. Для данного типа материалов величина коэффициента потерь может быть определена с помощью метода передаточной функции [5], либо по формуле (17) через волновые и структурные характеристики материала.

Список литературы

1. Цвиккер К., Костен К. Звукопоглощающие материалы, - М: ИЛ, 1952.
2. Герасимов А.И., Никонова Е.В. Звукоизоляция многослойных перегородок с учетом волновых параметров звукопоглощающего материала из минерального волокна ISOVER // Научное обозрение. – 2013. – № 9. – С. 142-145.
3. Мехелс Ф. Звукопоглощающие материалы и их назначение. Снижение шума в зданиях и жилых районах, - М: Стройиздат, 1987.
4. Иноземцев, А.А. Сопротивление упруго-вязких материалов, - Л.: Стройиздат, 1966. - 168 с.
5. Воронина Н.Н. Эмпирические выражения для расчета волновых параметров волокнистых звукоизоляционных материалов по их структурной характеристике // Труды НИИСФ (строительная акустика), выпуск 15, - М., 1976.

References

1. Zwicker K., Kosten K. Sound-absorbing materials, - M: IL, 1952.
2. Gerasimov A.I., Nikonova E.V. Sound insulation of multilayer partitions taking into account the wave parameters of sound-absorbing material from mineral fiber ISOVER // Scientific Review. - 2013. - No. 9. - S. 142-145.
3. Mechels F. Sound-absorbing materials and their purpose. Noise reduction in buildings and residential areas, - M: Stroyizdat, 1987.
4. Inozemtsev, A.A. Resistance of elastic-viscous materials, - L.: Stroyizdat, 1966. - 168 p.
5. Voronina N.N. Empirical expressions for calculating the wave parameters of fibrous soundproof materials according to their structural characteristics // Transactions of NIISF (building acoustics), edition 15, - M., 1976.