

Анатолий ГЕРАСИМОВ, Екатерина НИКОНОВА  
Московский государственный строительный университет, Россия

## О ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВАХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

В статье рассматриваются свойства изоляции воздушного звука ограждающих конструкций с учетом волновых, физико-механических и структурных параметров материала заполнения воздушного пространства между наружными слоями из пористо-волоконистых материалов и минерального волокна ISOVER.

**Ключевые слова:** звукоизоляция, акустические импедансы, коэффициент затухания, оператор Лапласа, физико-механические параметры, волновые параметры

В практике строительства известны материалы, которые одновременно обладают высокими тепло- и звукоизоляционными качествами, а также способностью к звукопоглощению. Из их разнообразия следует отметить пористо-волоконистые минераловатные и стекловолоконистые маты и плиты. Пористо-волоконистые материалы представляют собой структурную композицию, состоящую из твердых включений (волокон) - скелета и пор - промежутков между волокнами, заполненных воздухом. К пористо-волоконистым материалам относятся маты и плиты из минерального и стеклянного волокна различной плотностью. Они имеют минимальную плотностью, максимальный объем сквозных пор и максимальную удельную площадь поверхности пор. Они обладают важными способностями изолировать и поглощать звук.

Процесс прохождения звука через слой сопровождается затуханием и превращением плоских звуковых волн в тепловые и вязкие волны в процессе рассеивания на границах волокон, расположенных послойно в горизонтальных плоскостях материала. Эффективность применения материалов в целях звукоизоляции ограждающих конструкций во многом определяется их волновыми, физико-механическими и структурными параметрами.

Колебательный процесс распространения звуковой волны в слое материала описывается уравнением для потенциала скоростей  $\Phi(x, t)$ , как функции координаты  $x$  и времени  $t$  [1]:

$$c^2 \Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

где:

$c$  - скорость звуковой волны в среде,

$\Delta$  - оператор Лапласа.

Звуковое поле возникает и определено, если в каждой точке координатой  $x$ , известно звуковое давление  $p$  и колебательная скорость частиц  $\bar{v}$ .

Решением уравнения (1) является:

$$p(x) = p_o \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-\gamma x} \quad (2)$$

$$\bar{v}(x) = v_o \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-\gamma x} \quad (3)$$

где:

$p_o$  и  $v_o$  - амплитуды избыточного звукового давления и колебательной скорости,

$\gamma$  - постоянная распространения [1/см],

$\omega$  - круговая частота,  $\omega = 2\pi f$  [Гц].

Постоянная распространения в общем случае является комплексной величиной:

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (4)$$

где:

$\alpha$  - коэффициент затухания (показатель затухания амплитуд звукового давления  $p_o$  и колебательной скорости  $v_o$ ) [1/см],

$\beta$  - фазовая постоянная, показывает с какой частотой и скоростью распространяется звуковая волна [см<sup>-1</sup>].

Постоянная распространения  $\gamma$  является важным волновым параметром материала и не зависит от координаты  $x$  и времени  $t$ .

Другим определяющим волновым параметром материала является волновое сопротивление  $W = p/\bar{v}$ .

Волновое сопротивление является комплексной характеристикой:

$$W = W_a - jW_i \quad (5)$$

где  $W_a$  и  $W_i$  - действительная и мнимая составляющие волнового сопротивления.

Эффективность пористо-волоконистых материалов с позиции способности изоляции воздушного и ударного звука определяется их физико-механическими параметрами: комплексным динамическим модулем упругости (объемный модуль):

$$E_d = E_o + j\omega E_o \cdot \eta \quad (6)$$

где:

$E_o$  - действительная часть [Па],

$E_o\eta$  - модуль потерь,

$\eta$  - коэффициент потерь.

Динамическая жесткость

$$S = \frac{E}{\delta} \left[ \frac{\text{Па}}{\text{м}} \right]$$

где  $\delta$  - толщина слоя [м].

Согласно теории распространения звуковых и модели Релея, получившей развитие в работах К. Цвиккера, К. Костена, В. Янсона [2, 3] и др. в пористо-волоконистых материалах распространяется два вида волн по воздуху в порах и по скелету.

Пористо-волоконистые материалы могут иметь упругий, податливый скелет, либо жесткий скелет. Скелет считается упругим (податливым) если выполнено следующее условие:  $\rho_{\text{в}}/\rho_{\text{ск}} \leq 0,03$  и  $E_{\text{ск}}/E_{\text{в}} \leq 1$ , где:  $\rho_{\text{в}}$ ,  $E_{\text{в}}$  и  $\rho_{\text{ск}}$ ,  $E_{\text{ск}}$  - плотность и модуль упругого соответственно воздуха и скелета. Как показали исследования [4], этому условию соответствуют пористо-волоконистые материалы плотностью  $\rho < 100 \text{ кг/м}^3$ . Динамический модуль упругости является частотно независимой характеристикой. В пористо-волоконистой материале с упругим скелетом распространяются две независимые волны с постоянными распределения, они являются связанными, т.е. бегут одновременно и по скелету и по воздуху в двух направлениях:

$$\gamma_{\text{ск}}^2 \approx -\frac{\rho_{\text{ск}}\omega^2}{E_{\text{ск}}} + \frac{j\omega \cdot A}{h \cdot E_{\text{ск}}} \quad (7)$$

$$\gamma_{\text{в}}^2 \approx -\frac{\rho_{\text{в}}\omega^2}{E_{\text{в}}} + \frac{j\omega \cdot A}{h \cdot E_{\text{в}}} \quad (8)$$

где:  $A$  - коэффициент связи у К. Цвиккера и К. Костена [2]:

$A = S = \sigma \cdot h$ ,  $h$  - пористость материала,  $\sigma$  - воздушное сопротивление пор материала.

Постоянная распространения в воздухе совпадает с постоянной распространения для пористых материалов с жестким скелетом [4], следовательно постоянная  $\gamma_{\text{в}}$  не зависит от того, колеблется или неподвижен скелет материала. Динамический модуль упругости материала в основном определяется модулем воздуха и практически не зависит от частоты.

При плотности свыше  $\rho > 100 \text{ кг/м}^3$  жесткость скелета возрастает и оказывает существенное влияние на величину суммарного модуля упругости:  $E = E_{\text{ск}} + E_{\text{в}}$ , при этом динамический модуль упругости проявляет частотно-зависимый характер [5].

Фактическая динамическая жесткость  $S$  слоя материала:

$$S = S_{\text{ск}} + S_{\text{в}}[1 - \text{Re}(\varphi)] \quad (9)$$

где:

$S_{\text{ск}}$  - жесткость скелета материала [ $\text{н}/\text{м}^3$ ],

$S_{\text{в}}$  - то же воздуха в порах материала [ $\text{н}/\text{м}^3$ ],

$\text{Re}(\varphi)$  - учитывает влияние сопротивления продувания на динамическую жесткость.

На низких частотах

$$S_{\text{в}} = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\rho_0 \cdot C_0^2}{h \cdot \bar{\gamma}} [\text{кг}/\text{м}^2] \quad (10)$$

где:

$\bar{\gamma}$  - показатель адиабаты,

$\rho_0$  - плотность воздуха [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ],

$C_0$  - адиабатическая скорость звука в воздухе [ $\text{м}/\text{с}$ ].

Согласно закону сохранения энергии при падении звуковой волны на ограждение:

$$\tau = 1 - (r + \varepsilon) \quad (11)$$

$$\alpha = 1 - r \quad (12)$$

где:

$\tau$  - коэффициент звукопроводности,

$r$  - коэффициент отражения,

$\varepsilon$  - коэффициент рассеяния,

$\alpha$  - коэффициент поглощения.

Взаимосвязь между звукопроводностью и звукопоглощением может быть представлена в виде:

$$\tau = 1 - (\alpha - r) \quad (13)$$

Между физико-механическими и волновыми параметрами имеет место постоянная, обратная связь. Динамическую жесткость слоя материала и его коэффициент потерь определяется через волновое сопротивление и постоянную распространения из выражения:

$$S = \frac{\kappa(W_a \cdot \beta + W_i \cdot \alpha)}{d(\alpha^2 + \beta^2)} \quad (14)$$

где  $\kappa$  - волновое число [ $\text{см}^{-1}$ ].

$$\eta = \frac{2\alpha \cdot \beta}{\beta^2 - \alpha^2} \quad (15)$$

Особый практический интерес представляет оценка собственной звукоизоляции плиты (слоя) из звукопоглощающего пористо-волокнутого материала. В отличие от большинства строительных конструктивных материалов в акустическом плане данные материалы обладают рядом особенностей: отсутствием явления волнового совпадения; слабо выраженным резонансом; решающий вклад в прохождение звука вносят чисто вынужденные волны; функция отклика, которая отражает степень согласования падающей волны с формой смещений слоя выражена довольно слабо, поскольку данные материалы относятся к упруго-вязким и функция релаксации смещений (деформаций) носит запаздывающий характер.

Собственная звукоизоляция плиты (слоя) материала в предположении ее неподвижности может быть представлена следующим выражением:

$$R = 20 \lg \left| ch \gamma_a \cdot d + \frac{1}{2} \left( Z_a + \frac{1}{Z_a} \right) \cdot sh \gamma_a \cdot d \right| \text{ [дБ]} \quad (16)$$

где:

$Z_a$  - входной импеданс слоя,

$\gamma_a$  - постоянная распространения слоя,

$d$  - толщина слоя.

Импеданс слоя  $Z_a$  определяется через волновое сопротивление материала  $\overline{W}$  и  $\gamma_a$ :

$$Z_a = \overline{W} ctg \gamma_a \cdot d \quad (17)$$

Собственную изоляцию плиты по звукопоглощающего материала можно определить по формуле, предложенной Н.Н. Ворониной [6] через структурные параметры:

$$R = 20 \lg \left[ \frac{(1 + Q)^2 \cdot e^{\overline{\alpha} \cdot d}}{1 + Q^2 + \frac{e^{\overline{\alpha} \cdot d}}{1 + Q^2 + Q^{-2}}} \right] \text{ [дБ]} \quad (18)$$

где:

$Q$  - структурная характеристика,

$\overline{\alpha}$  - коэффициент затухания.

На рисунке 1, для примера, представлены частотные характеристики звукоизоляции минераловатной плиты  $\rho = 150 \text{ кг/м}^3$ , рассчитанные по формулам (16-18). Они достаточно согласуются в среднечастотном диапазоне.

Предварительные лабораторные исследования собственной изоляции плит ISOVER плотностью от 40 до 150  $\text{кг/м}^3$  показали, что допущение неподвижности плит выполнено для частот свыше 200 Гц [7]. На рисунке 2, в качестве примера показана измеренная частотная характеристика собственной звукоизоляции минераловатной плиты плотностью  $\rho = 100 \text{ кг/м}^3$ , толщиной 60 мм. Значения изоляции воздушного звука на частоте 100 Гц соответствует звуко-

изоляции тонкого слоя равной поверхностной плотностью («закону масс») - см. рисунок 2. Максимум на частоте 160 Гц для данных материалов означает возможную границу функционального перехода от изоляции «массивного» условно изотропного слоя к изоляции и поглощению анизотропного слоя. Сравнение полученных результатов измерений и расчетов по формулам (15-16) показало, что они достаточно согласуются.

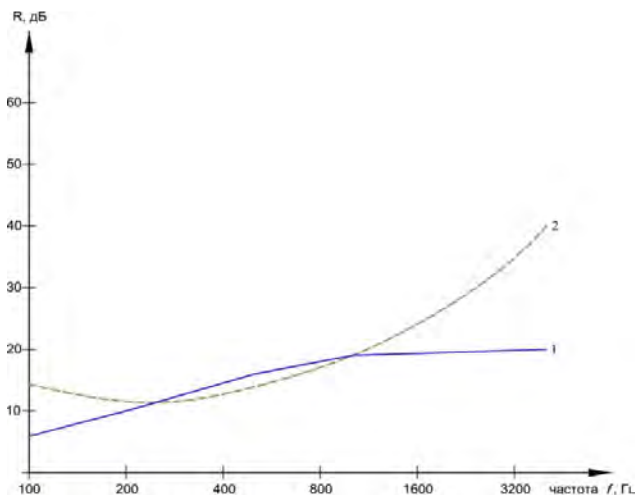


Рис. 1. Звукоизоляция минеральной плиты ISOVER плотностью  $\rho = 150 \text{ кг/м}^3$ , толщиной 60 мм, диаметр волокон  $d = 5 \text{ мк}$ . 1 - рассчитанная по формуле Н.Н. Ворониной (формула 18); 2 - то же по формулам (16), (17)

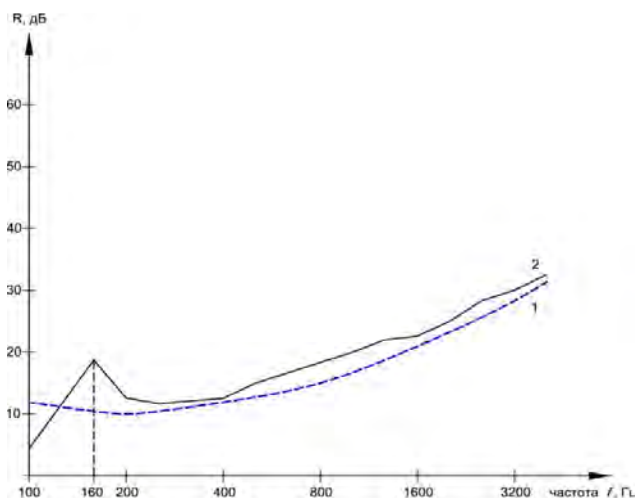


Рис. 2. Звукоизоляция слоя минеральной плиты ISOVER плотностью  $\rho = 100 \text{ кг/м}^3$ , толщиной 60 мм, диаметр волокон  $d = 5 \text{ мк}$ . 1 - по результатам расчета; 2 - по результатам измерений

На рисунке 3 представлены частотные характеристики звукоизоляции минераловатных плит ISOVER плотностью  $\rho = 40, 70$  и  $150 \text{ кг/м}^3$ . У слоя

с жестким скелетом (материал  $\rho = 150 \text{ кг/м}^3$ ) выше, чем с упругим податливым скелетом ( $\rho = 40$  и  $70 \text{ кг/м}^3$ ). Наиболее существенная разница в диапазоне высоких частот.

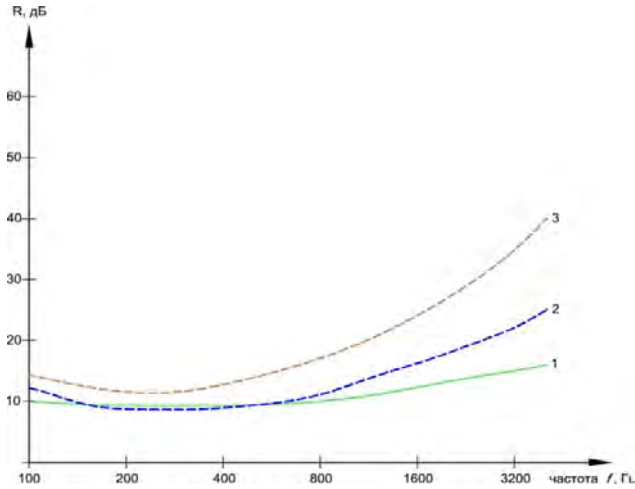


Рис. 3. Звукоизоляция слоя минеральной плиты толщиной 60 мм: 1 - плотностью  $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$ ; 2 - плотностью  $\rho = 70 \text{ кг/м}^3$ ; 3 - плотностью  $\rho = 150 \text{ кг/м}^3$

Сочетание функций звукоизоляции и звукопоглощения у пористо-волоконистых материалов привело к появлению эффективных облегченных акустических конструкций. Пример конструкции и ее частотная характеристика звукоизоляции показаны на рисунке 4.

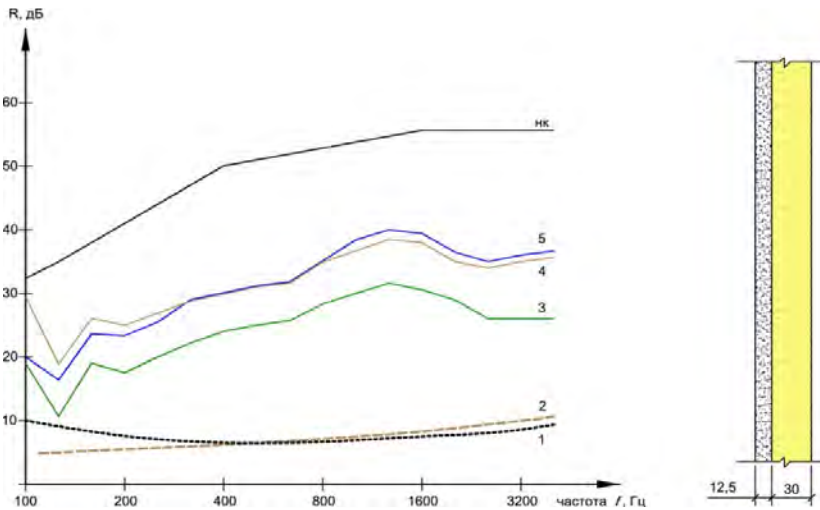
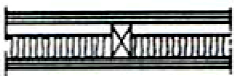

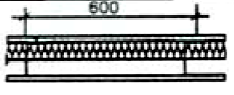
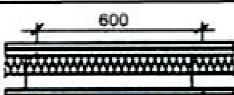
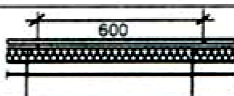


Рис. 4. Звукоизоляция: 1 - минеральной плиты  $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$  толщиной 30 мм (рассчитанной по формуле (16)); 2 - то же по формуле (18); 3 - гипсокартонные листы ГКЛ толщиной 12,5 мм; 4, 5 - то же листа облицованного минеральной плитой с одной стороны; нк - стандартная кривая

Гибкая плита из гипсокартона (ГКЛ) толщиной 12,5 мм и слоя минераловатной плиты  $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$ , толщиной 30 мм. Звукоизоляция комбинированной облицовки равна сумме звукоизоляции отдельных слоев индекс изоляции воздушного шума конструкции облицовки  $R_{IV} = 34 \text{ дБ}$ . Данное решение используется для улучшения изоляции воздушного шума базовой конструкции.

В таблице 1 представлены конструктивные решения облегченных перегородок на каркасе системы Тиги-Кнауф с применением звукоизоляционных, звукопоглощающих минераловатных плит. Значения индексов изоляции воздушного шума получены в результате расчетов с использованием аналоговых схем, методом импедансов с учетом волновых и физико-механических параметров материалов.

Таблица 1. Рекомендуемые конструкции перегородок

Конструкция перегородок (горизонтальный разрез)	Состав конструкции	Индекс изоляции воздушного шума $R_{IV}$ , дБ
	2 слоя гипсокартонных плит 50 мм – воздушный зазор деревянный каркас 50 мм – минераловатные плиты, $\rho = 50 \text{ кг/м}^3$ (+isover+) 2 слоя гипсокартонных плит	48
	2 слоя гипсокартонных плит 75 мм – воздушный зазор деревянный каркас 75 мм – минераловатные плиты, $\rho = 50 \text{ кг/м}^3$ (+isover+) 2 слоя гипсокартонных плит	52
	1 слой гипсокартонных плит 50 мм – минераловатные плиты, $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$ (+isover+) 50 мм – воздушный зазор металлический каркас 1 слой гипсокартонных плит	47
	2 слоя гипсокартонных плит 50 мм – минераловатные плиты, $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$ (+isover+) металлический каркас 50 мм – воздушный зазор 2 слоя гипсокартонных плит	49
	2 слоя гипсокартонных плит 75 мм – минераловатные плиты, $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$ (+isover+) металлический раздельный каркас 100 мм – воздушный зазор 2 слоя гипсокартонных плит	54

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Боголепов И.И., Промышленная звукоизоляция, Судостроение, Л.: 1986.
- [2] Цвиккер К., Костен К., Звукопоглощающие материалы, М.: 1952.
- [3] Kosten C.W., Janssen J.H., Acoustic properties of flexible and porous materials, Acta Acustica united with Acustica 1957, 7, 6, 372-378(7).
- [4] Мехель Ф., Звукопоглощающие материалы и их назначение. Снижение шума в зданиях и жилых районах, Стройиздат, М.: 1987.
- [5] Аль Фарадж Иссам, Применение звукоизоляционных минеральных материалов в ограждающих конструкциях жилых зданий, Дис. канд. техн. наук, М.: 2001.



- [6] Воронина Н.Н., Эмпирические выражения для расчета волновых параметров волокнистых звукопоглощающих материалов по их структурной характеристике, Труды НИИСФ, вып. 15, Строительная акустика, М.: 1976.
- [7] Gerasimov A., Excellent sound isolation properties of ISOVER mineral wool Ahlstrom, Helsinki 1991.

## **ON THE ACOUSTIC PROPERTIES OF SOUND-ABSORBING MATERIALS WHICH ARE USED IN EXTERNAL PARTITIONS**

**The article considers the insulation properties of air sound enclosure structures subject to wave, physico-mechanical and structural parameters of the material filling the air space between the outer layers of porous fibrous material and the mineral wool ISOVER.**

**Keywords: acoustic insulation, acoustic impedances, the attenuation factor, Laplace operator, physico-mechanical parameters, wave parameters**