

## Расчет изоляции воздушного шума (звукоизоляции) однослойных плит

Щелоков Ю.А.

Генеральный директор, ООО «Акустические расчеты»,  
РФ, г. Санкт-Петербург, пр. Пискаревский д.25

### Аннотация

В работе рассмотрена методика определения изоляции воздушного шума массивных конструкций, согласно Своду Правил СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий». Рассмотрены основные недостатки графоаналитического метода. Приведена классическая методика расчета звукоизоляции, а также способы ее корректировки для возможности расчета массивных преград (плит). Получена универсальная теоретическая модель расчета звукоизоляции акустически однородных конструкций. Проведено сравнение результатов расчета по предлагаемой методике с данными лабораторных исследований звукоизоляции преграды из стеновых силикатных блоков.

**Ключевые слова:** звукоизоляция, строительная акустика, коэффициент механических потерь, фактор переизлучения, защита от шума.

### *Calculation of airborne sound insulation for single-layer plates*

*Schelokov Y\**

*General Director, LLC "Acoustic calculations", Piskarevsky pr., h. 25, Saint-Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The paper considers the method of determining airborne sound insulation massive structures, according to a set of rules SP 23-103-2003 "Design of sound insulation enclosing structures of residential and public buildings." The paper considers the main disadvantages of graphic-analytical method. The paper shows the classical method of calculating of the sound insulation, as well as ways of calculating with adjustment for the calculation sound insulation of massive barriers (plates). Universal theoretical model were received for calculating the sound insulation of acoustically homogeneous structures. In the article author did the comparison of the calculation results by the proposed method with laboratory data for the wall of silicate blocks.*

**Key words:** *sound insulation, building acoustics, mechanical loss factor, the factor of re-emission, protection against noise.*

### **Введение**

При проектировании жилых и общественных зданий разработка и применение конструкций, отвечающих нормативным требованиям по эффективности защиты от шума, имеет большое значение.

В качестве основной инструктивно-нормативной документации по вопросам расчета и разработки звукоизоляции конструкций применяют Свод Правил СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».

Основную долю гражданского строительства в современных городах составляют многоквартирные дома, в которых преобладают массивные однослойные внешние и внутренние ограждающие конструкции постоянного сечения.

Растущая потребность акустического комфорта и большая распространенность

подобных конструкций требует качественного подхода при расчете изоляции воздушного шума.

### 1. Графоаналитический метод расчета звукоизоляции

Для расчета звукоизоляции подобных конструкций в Своде Правил используют графоаналитический метод, заключающийся в построении частотной характеристики изоляции воздушного шума, изображая ее в виде ломаной линии, аналогичной линии ABCD на рисунке 1 [1].

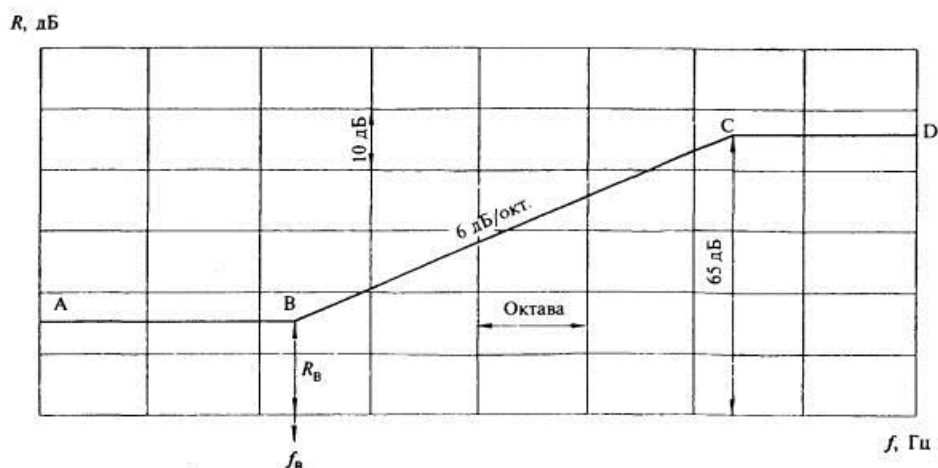


Рис. 1. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойным плоским ограждением

Координаты точки *B* частотной характеристики зависят от плотности и толщины ограждающей конструкции, которые определяются по эмпирическим данным соответствующих графиков и таблиц.

Значение изоляции воздушного шума  $R_B$  в точке *B* определяется по формуле

$$R_B = 20 \log(m_{\text{э}}) - 12, \quad (1)$$

где  $m_{\text{э}} = K \cdot m$  – эквивалентная поверхностная плотность,  $\text{кг/м}^2$ ;

$m$  – поверхностная плотность;  $\text{кг/м}^2$ ;

$K$  – коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения из бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и т.п. по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью.

Сложность построения частотной характеристики изоляции воздушного шума по вышеизложенной методике состоит в том, что координаты точки *B* и значение коэффициента  $K$  можно определить для ограниченного количества материалов:

- керамзитобетон;
- перлитобетон;
- аглопоритобетон;
- шлакопемзобетон;
- газобетон, пенобетон;
- кирпич;
- гипсобетон, гипс.

В последнее время появилось много новых видов строительных материалов

(полистиролбетон, вспененная древесина, арболит, биоматериалы и др.), которые рассматриваются проектировщиками как перспективные, при этом рассчитать их звукоизоляцию по методике Свода Правил не получается.

Более того, для известных материалов использование графоаналитического метода сопряжено с дополнительными ошибками, за счет округления значения критической частоты  $B$  до среднегеометрической частоты третьоктавной полосы, в пределах которой находится  $f_B$ .

Кроме графоаналитического метода простого расчетного способа определения звукоизоляции толстых, массивных конструкций найдено не было.

Результаты трудоемких вычислений, проведенных рядом авторов (М. Седов [5], Л. Осипов [6]) использовать на практике не удалось.

## 2. Классическая теория звукоизоляции

В данной работе для расчета изоляции воздушного шума массивных, толстых конструкций рассматривается возможность применения скорректированной классической теории звукоизоляции, не имеющей вышеизложенных недостатков.

В 1942 г. Кремер [3] для коэффициента прохождения через стену представил выражение

$$\tau(\theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{Z(\theta) \cdot \cos(\theta)}{2\rho_0 c_0} \right|^2}, \quad (2)$$

где  $Z(\theta)$  – импеданс преграды, [кг/м<sup>2</sup>с];

$\theta$  – угол падения, [градусы];

$\rho_0$  – плотность воздуха, [кг/м<sup>3</sup>];

$c_0$  – скорость звука в воздухе, [м/с].

Выражение для расчета импеданса пластины [4] имеет вид

$$Z(\theta) = i \left[ \omega m - \frac{D(1+i\eta)\omega^3 \sin^4(\theta)}{c_0^4} \right], \quad (3)$$

где  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$  – циклическая частота, [рад/с];

$f$  – частота, [Гц];

$m$  – поверхностная масса пластины, [кг/м<sup>2</sup>];

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  – цилиндрическая жесткость пластины, [Па·м<sup>3</sup>];

$E$  – модуль Юнга, [Па];

$h$  – толщина пластины, [м];

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\eta$  – коэффициент механических потерь.

В реальных условиях звуковое поле, падающее на ограждающую конструкцию можно считать диффузным. Коэффициент прохождения для диффузного поля [7] определяется как

$$\tau_{diff} = \frac{\int_0^{78^\circ} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta)}{\int_0^{78^\circ} \cos(\theta) \sin(\theta)}. \quad (4)$$

С учетом диффузного коэффициента прохождения звукоизоляция пластины  $R$  будет равна

$$R = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{\tau_{diff}} \right). \quad (5)$$

Расчет звукоизоляции по формулам (2) - (5) справедлив для тонких конструкций, таких как стекло, гипсокартонные листы, сталь и другие материалы, где звук распространяется в виде изгибных волн.

Применение классической теории для толстостенных конструкций приводит к неверному результату: наклон расчетной кривой роста звукоизоляции с частотой выше наклона экспериментальной кривой.

### 3. Корректировка классической теории звукоизоляции

Распространение акустических волн через массивные конструкции (из тяжелого, легкого бетона, кирпичной кладки и т.п.) сопровождается возникновением не только изгибных, но и продольных сдвиговых колебаний. В результате чего, характерные частотные характеристики массивных и тонкостенных конструкций не совпадают.

Предположим, что полученная Кремером формула (2) для коэффициента прохождения толстостенной конструкции справедлива с импедансом преграды  $Z'(\theta)$ , учитывающим сдвиговые волны.

Чтобы учесть сдвиговые волны в материале преграды [6] запишем импеданс в виде

$$Z'(\theta) = i\omega m + \frac{z_B z_S}{z_B + z_S}, \quad (6)$$

где  $z_B = -\frac{i\omega^3 D}{c_0^4} \sin^4(\theta)$  – импеданс изгиба, [кг/м<sup>2</sup>с];

$z_S = -\frac{i\omega Gh}{c_0^2} \sin^2(\theta)$  – импеданс сдвига, [кг/м<sup>2</sup>с];

$G = \frac{E}{2(1+\mu^2)}$  – модуль сдвига, [Па].

Однако при построении частотной характеристики звукоизоляции толстостенной преграды по формулам (2)-(6) даже с учетом сдвиговых волн ведет к неверному наклону кривой: рост изоляции воздушного шума с частотой получается более интенсивным, чем на практике.

Предполагая, что импеданс толстостенной преграды пропорционален тангенсу угла падения  $\theta$ , введем фактор переизлучения  $\Phi(\theta)$ , и перепишем формулу (2) следующим образом

$$\tau'(\theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{\Phi(\theta) \cdot Z'(\theta) \cdot \cos(\theta)}{2\rho_0 c_0} \right|^2} = \left| 1 + \frac{\left[ i\omega m - \frac{i\omega^3 hGD \sin^4(\theta)}{(\omega^2 D \sin^2(\theta) + Gh)c_0^4} \right] \cdot \sin(\theta)}{2\rho_0 c_0} \right|^{-2}, (7)$$

где  $\tau'(\theta)$  – коэффициент прохождения звука, учитывающий сдвиговые волны в материале преграды и фактор переизлучения,

$$\Phi(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{– фактор переизлучения (угловой фактор), равный 1 для} \\ \tan(\theta) & \text{тонкостенных конструкций и } \tan(\theta) \text{ – для массивных конструкций.} \end{cases}$$

тонкостенных конструкций и  $\tan(\theta)$  – для массивных конструкций.

Для определения звукоизоляции акустически однородной преграды при диффузном падении на нее акустической энергии, необходимо полученное выражение для коэффициента прохождения  $\tau'(\theta)$  подставить в формулы (4) и (5), соответственно.

#### 4. Экспериментальная проверка результатов расчета

Ранее [2] в качестве примера мы рассчитывали звукоизоляцию строительных конструкций по формуле (7), сравнивали с результатами расчета по графоаналитическому методу, и показали хорошую согласованность результатов.

18 июня 2015 г. в испытательном центре «ПКТИ-СтройТЕСТ» были проведены исследования звукоизоляционной способности ограждающей конструкции (см. рис.2) из стеновых силикатных блоков, плотностью 1740 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 130 мм.



Рис. 2. Испытываемая конструкция из силикатных блоков

Как правило, в качестве помещения высокого уровня (ПВУ) при измерениях звукоизоляции выбирают помещение больших размеров. В качестве помещения низкого уровня (ПНУ) выбирают смежное помещение меньшего размера. Однако согласно принципу взаимности: при изменении падения звука на обратное, звукоизоляция преграды не меняется [5].

С целью подтверждения данного принципа на практике, измерения проводились с размещением источника шума в обоих измерительных помещениях.

При размещении источника шума в большом помещении, измерения будем называть стандартными. При размещении источника шума в маленьком помещении, измерения будем называть реверсными.

В качестве расчетных данных были приняты следующие значения:

#### Таблица 1

Параметры исследуемой конструкции

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Модуль Юнга, 10 <sup>10</sup> Па	Коэффициент Пуассона <sup>[8]</sup>	Коэффициент механических потерь <sup>[8]</sup>
Силикатный бетон	1740	130	4	0,2	0,01

Результаты измерений и расчетов исследуемой конструкции, представлены на рис.3.

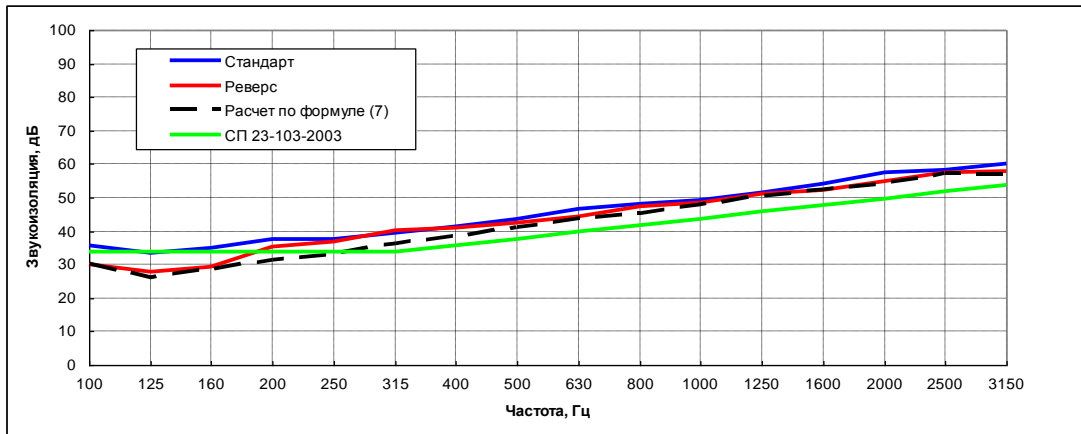


Рис.3. Результаты измерений и расчетов звукоизоляции конструкции из стеновых силикатных блоков

Анализируя данные рисунка 3 можно сделать следующие выводы:

1) При смене размещения источника шума (додэаэдра) из одного помещения в другое, меняется сторона ограждающей конструкции, на которую воздействует прямое акустическое поле источника. При этом звукоизоляционная способность конструкции в целом не меняется, что подтверждает справедливость принципа взаимности звукоизоляции.

2) Расчет по графоаналитическому методу дает частотную характеристику, лежащую ниже (правее) экспериментальной кривой звукоизоляции на частотах с 250 Гц, что может быть обусловлено неверным определением частоты  $f_B$ , ошибками, возникающими при округлении данного значения до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы, в пределах которой она была определена.

3) Расчет по скорректированной классической методике показывает большую согласованность с результатами эксперимента: более верно определены значения звукоизоляции, резонансная частота, наклон частотной характеристики.

### Заключение

Таким образом, корректировка классической методики расчета звукоизоляции за счет введенного фактора переизлучения (углового фактора)  $\Phi(\theta) = \begin{cases} 1 \\ \tan(\theta) \end{cases}$ , и учета сдвиговых волн в материале, позволяет определять звукоизоляционную способность однослойных преград из разных материалов и разной толщины, хорошо согласуясь с графоаналитическими методами и экспериментальными исследованиями.

### Список литературы

1. СП 23-103-2003. Звукоизоляция ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. – Санкт-Петербург, 2004.
2. Щелоков Ю.А. Расчет звукоизоляции акустически однородных конструкций / Ю.А. Щелоков // Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации»; Под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург, 2015. – с.349-354.
3. Cremer L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall / L. Cremer // Akustische Zeitschrift, 1942. – №.7. – S. 81-125.
4. Боголепов, И.И. Архитектурная акустика / И.И. Боголепов. – СПб: Политехника, 2001. - 158 с.
5. Седов, М. С. Расчёт звукоизоляции однослойных ограждений на низких частотах / М. С. Седов, В. Н. Бобылёв. – Горький: Изд-во ГГУ, 1976. – 46 с.
6. Осипов Г.Л. Звукоизоляция и звукопоглощение: Учеб. пособие для студентов вузов / Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов и др.; Под ред. Г.Л. Осипова, В.Н. Бобылева. — М.: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2004. — 450 с.
7. Marshall Long. Architectural Acoustics. 2nd Edition //M. Long, 2014. – 950 p.
8. Carl Hopkins. Sound Insulation //C. Hopkins . – New York, 2007. – 622 p.