

# Расчет звукоизоляции акустически однородных ограждающих конструкций

Щелоков Ю.А.

ООО “Акустические расчеты”

*info@acoustic-services.ru*

**Аннотация:** В работе рассмотрены основные методы расчета звукоизоляции акустически однородных преград. Рассмотрен графоаналитический метод определения изоляции воздушного шума массивных конструкций. Для чисто теоретического решения задачи определения звукоизоляции массивных конструкций введен параметр - фактор переизлучения. Получено выражение для коэффициента прохождения звука с учетом сдвиговых волн и фактора переизлучения. Получены универсальные аналитические зависимости для расчета звукоизоляции акустически однородных конструкций. Произведено сравнение предлагаемого расчетного метода с графико-аналитической методикой Свода Правил СП 23-103-2003 “Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий” на 5 строительных конструкциях

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

Особое место при строительстве жилых и общественных зданий занимают акустически однородные конструкции. К акустически однородным конструкциям относят гомогенные однослойные конструкции, а также конструкции состоящие из двух или более слоев твердых материалов (бетона, кирпичной кладки, дерева и т.д.), жестко связанных между собой по всей площади ограждения [1].

Теоретические исследования звукоизолирующей способности акустически однородных конструкций выполнены Л. Беранеком, А. Лондоном, Б. Шарпом, М. Хеклем, В. Крейтаном, Л. Кремером, В. Заборовым, М. Седовым, И. Боголеповым, Б. Уотерсом, Л. Осиповым и др.

Согласно данным исследованиям массивные и тонкие акустически однородные конструкции имеют различный частотный характер звукоизоляции.

В 1942 г. Кремер [2] для коэффициента прохождения через стену представил выражение

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

где  $Z(\theta)$  - импеданс преграды,  $\theta$  - угол падения,  $\rho_0$  - плотность воздуха,  $c_0$  - скорость звука в воздухе.

Выражение для расчета импеданса пластины [3] имеет вид

$$Z(\theta) = i \left[ \omega m - \frac{D(1+i\eta)\omega^3 \sin^4(\theta)}{c_0^4} \right], \quad (2)$$

где  $i = \sqrt{-1}$  - мнимая единица,  $\omega = 2\pi f$  - циклическая частота,  $m$  -

поверхностная масса пластины,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  - цилиндрическая жесткость пластины,  $E$  - модуль Юнга,  $h$  - толщина пластины,  $\mu$  - коэффициент Пуассона,  $\eta$  - коэффициент механических потерь.

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

$$\tau_{diff} = \frac{\int_0^{78^\circ} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta}{\int_0^{78^\circ} \cos \theta \sin \theta}. \quad (3)$$

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

$$R = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{\tau_{diff}} \right). \quad (4)$$

Характерный вид частотной зависимости звукоизоляции листовых материалов представлен на рис. 1.

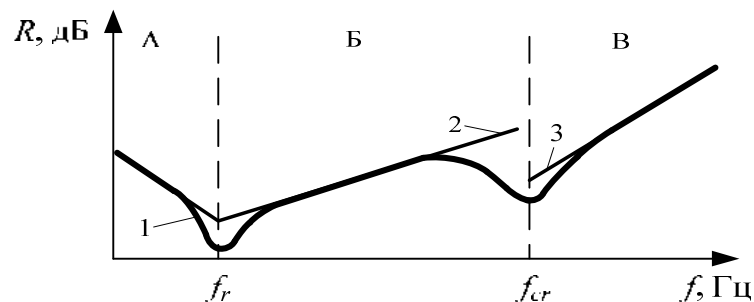


Рис. 1. Характерный вид частотной зависимости звукоизоляции тонких пластин

Как видно, из рис.1 частотная характеристика звукоизоляции пластины имеет 3 области: А - область спада звукоизоляции на резонансной частоте, Б - область роста звукоизоляции по закону массы и спада на критической частоте, В - область роста звукоизоляции.

Представленные формулы справедливы только для тонких листовых конструкций, где звук распространяется в виде изгибных волн.

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.

Ряд авторов (М. Седов [4], Л. Осипов [5]) после трудоемких вычислений получили результаты близкие к экспериментальным, однако практическое использование их затруднено.

Трудности испытываемые при расчете звукоизоляции чисто теоретическими методами послужили причиной появления практических методов расчета изоляции воздушного шума массивных акустически

однородных конструкций .

Путем обобщения экспериментальных результатов Б. Уоттерс, Л. Беранек, С. Алексеев и В. Заборов предложили схожие графоаналитические методы расчета звукоизоляции. Суть методов заключается в представлении частотной характеристики звукоизолирующей способности в виде ломаной линии (см. Рис.2). В области прилегающей к граничной частоте, располагается горизонтальный отрезок прямой - “плато”, до и после него - наклонные отрезки прямых.

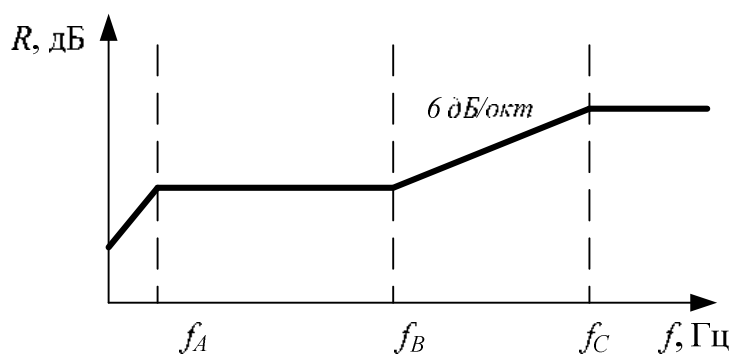


Рис. 2. Характерный вид частотной зависимости звукоизоляции массивных конструкций

Графоаналитический метод положен в основу методики Свода Правил СП 23-103-2003 “Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий”.

Согласно методике Свода Правил абсциссу точки В определяют в зависимости от толщины и плотности материала конструкции. Учет упругих свойств материала обеспечивается введением эмпирического коэффициента  $K$ , определенного для 8 видов материалов: бетон, аглопоритобетон, шлакопемзобетон, газобетон, кладка из кирпича, гипсобетон, перлитобетон, керамзитобетон.

В настоящей работе рассматривается методика определения звукоизоляции акустически однородных конструкций путем модернизации рассмотренных аналитических зависимостей.

Предположим, что полученная Кремером формула (1) для коэффициента прохождения толстостенной конструкции справедлива с импедансом преграды  $Z'(\theta)$ , учитывающим сдвиговые волны и фактор переизлучения.

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,  $z_S = -\frac{i\omega G h}{c_0^2} \sin^2 \theta$  - импеданс сдвига,

$G = \frac{E}{2(1 + \mu^2)}$  - модуль сдвига.

Для учета фактора переизлучения перепишем формулу (1) следующим

образом

$$\tau'(\theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{\Phi(\theta) \cdot Z'(\theta) \cdot \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right|^2}, \quad (7)$$

где  $\tau'(\theta)$  - коэффициент прохождения звука, учитывающий сдвиговые волны в материале преграды и фактор переизлучения,  $\Phi(\theta) = \begin{cases} 1 \\ \tan(\theta) \end{cases}$  - фактор переизлучения, равный 1 для 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 (3) и (4), соответственно.

В качестве примера рассчитаем звукоизоляцию строительных конструкций, параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры исследуемых конструкций

| № п/п | Материал       | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Толщина, мм | Модуль Юнга, ГПа | Коэффициент Пуассона | Коэффициент механических потерь |
|-------|----------------|------------------------------|-------------|------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1     | Керамзитобетон | 1400                         | 120         | 12               | 0,35                 | 0,015                           |
| 2     | Кирпич         | 1600                         | 110         | 10               | 0,4                  | 0,04                            |
| 3     | Кирпич         | 1600                         | 380         | 10               | 0,4                  | 0,04                            |
| 4     | Бетон          | 2300                         | 100         | 23               | 0,2                  | 0,05                            |
| 5     | Бетон          | 2300                         | 500         | 23               | 0,2                  | 0,05                            |

На рис. 3-7 представлены кривые звукоизоляции, полученные посредством формул (6), (7), (3), (4) и графоаналитическим методом свода Правил 23-103-2003 "Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий".

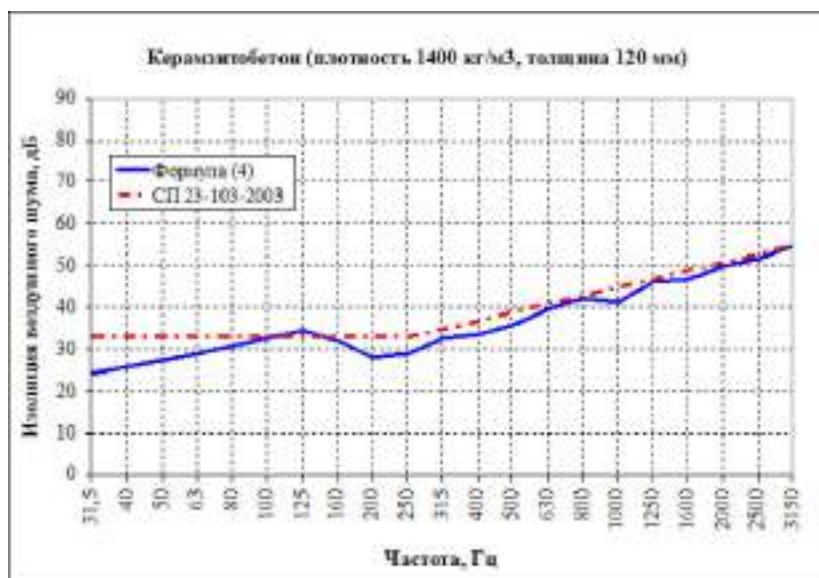


Рис. 3. График звукоизоляции конструкции №1

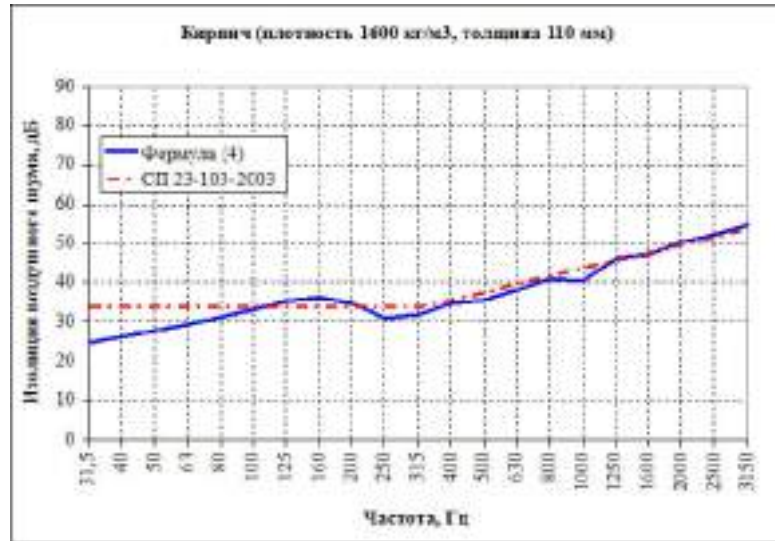


Рис. 4. График звукоизоляции конструкции №2

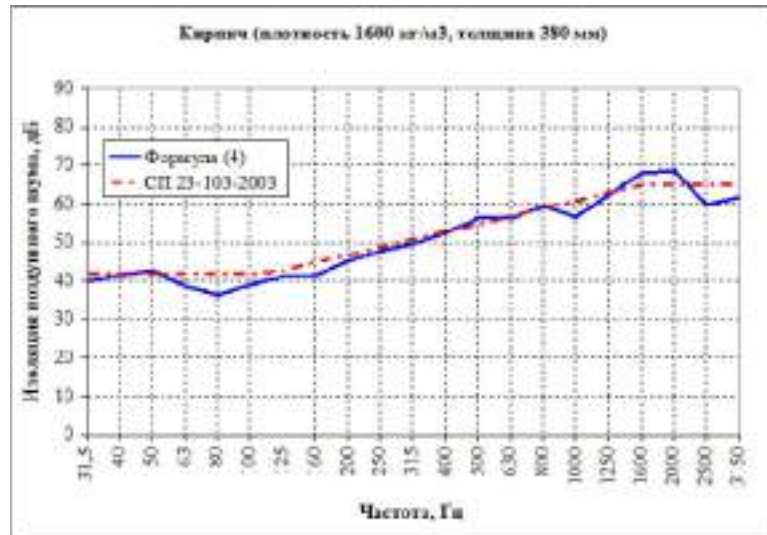


Рис. 5. График звукоизоляции конструкции №3

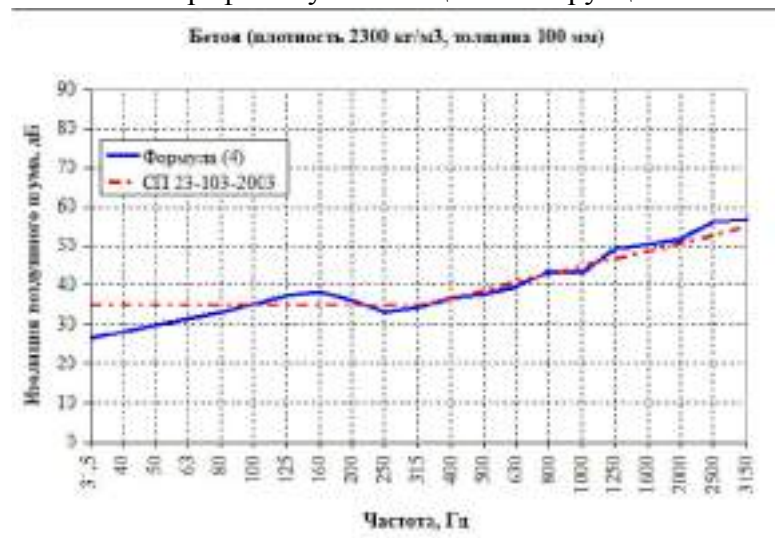


Рис. 6. График звукоизоляции конструкции №4

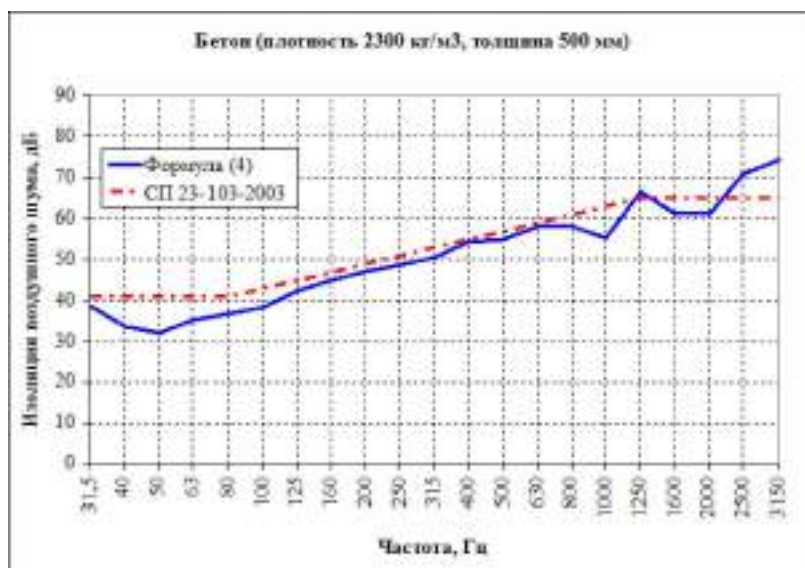


Рис. 7. График звукоизоляции конструкции №5

Как, видно из рис. 3-7, результаты расчетов звукоизоляции массивных однородных конструкций по предлагаемой методике хорошо согласуются с экспериментальными данными [3] и расчетными значениями по СП 23-103-2003 для всех исследуемых конструкций.

### Список литературы

1. Крейтан В.Г. Защита от внутренних шумов в жилых домах. Москва., 1990.- 171 с.
2. Cremer L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall / L. Cremer // Akustische Zeitschrift. – 1942. – №.7. – S. 81-125.
3. Боголепов, И.И. Архитектурная акустика / И.И. Боголепов. СПб: Политехника, 2001. - 158 с.
4. Седов, М. С. Расчёт звукоизоляции однослойных ограждений на низких частотах / М. С. Седов, В. Н. Бобылёв – Горький: Изд-во ГГУ, 1976. – 46 с.
5. 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.
6. Marshall Long. Architectural Acoustics. 2nd Edition /M. Long, 2014. - 950 p.