

Универсальная формула расчета звукоизоляции однослойных преград

Щелоков Ю.А.

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

Аннотация

Однослойные конструкции являются наиболее часто применимым типом конструкции в строительстве и технике. В данной статье рассматривается аналитический метод расчета звукоизоляции однородных конструкций, разработанный на основе классической теории Кремера. Проведена оценка применимости метода, на основе результатов расчета графоаналитическим методом Свода Правил СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».

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

Universal formula of calculation of sound insulation of single-layer barriers

Schelokov Y.

General Director, LLC "Acoustic calculations", Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Single-layer designs are the most often applicable type of a design in construction and engineering. In this article the universal analytical method of calculation of sound insulation of designs developed on the basis of the classical theory of Kremer is considered. The assessment of applicability of a method, on the basis of results of calculation by a graphic-analytical method of the Set of rules of the joint venture 23-103-2003 "Design of sound insulation of the protecting designs of residential and public buildings" is carried out.

Keywords: sound insulation, building acoustics, mechanical loss factor, factor of re-radiation, noise protection.

1. Классическая теория расчета звукоизоляции тонких пластин

Звукоизоляция ограждающей конструкции R может быть определена на основе известного коэффициента прохождения звука $\tau(\theta)$:

$$R = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\tau(\theta)} \right), \text{ [дБ]} \quad (1)$$

В реальных условиях звуковое поле, падающее на ограждающую конструкцию можно считать диффузным. Коэффициент прохождения для диффузного поля [1] определяется как

$$\tau_{diff} = \frac{\int_0^{78^\circ} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta)}{\int_0^{78^\circ} \cos(\theta) \sin(\theta)}. \quad (2)$$

Для коэффициента прохождения звука через бесконечную тонкую пластинку в 1942 г. Кремером [2] была предложена формула

$$\tau(\theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{Z(\theta) \cdot \cos(\theta)}{2\rho_0 c_0} \right|^2}, \quad (3)$$

где $Z(\theta)$ – импеданс безграничной пластины для вынужденных изгибных колебаний, [кг/м²с];

θ – угол падения, [рад];

ρ_0 – плотность воздуха, [кг/м³];

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

Выражение для расчета импеданса бесконечной тонкой пластины [3] имеет вид

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

где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица;

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

f – частота, [Гц];

m – поверхностная масса пластины, [кг/м²];

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины, [Па·м³];

E – модуль Юнга, [Па];

h – толщина пластины, [м];

μ – коэффициент Пуассона;

η – коэффициент механических потерь;

θ, c_0 – то же, что в формуле (3).

Характерной особенностью кривой звукоизоляции тонких конструкций является наличие эффекта волнового совпадения, который проявляется в уменьшении звукоизоляции на определенной частоте $f_0 = \frac{c_0}{1.8 \cdot c_{np} h}$ [Гц], где c_{np} – скорость продольных волн в материале преграды, [м/с].

Расчеты по формулам (1) - (4) хорошо согласуются для тонких конструкций (гипсокартонные листы, оконное стекло и др.) с графоаналитическим методом Свода Правил СП 23-103-2003 [4].

Суть графоаналитического метода определения звукоизоляции заключается в построении кривой звукоизоляции, имеющей на определенных участках линейную зависимость с конкретным углом наклона (см. рис.1).

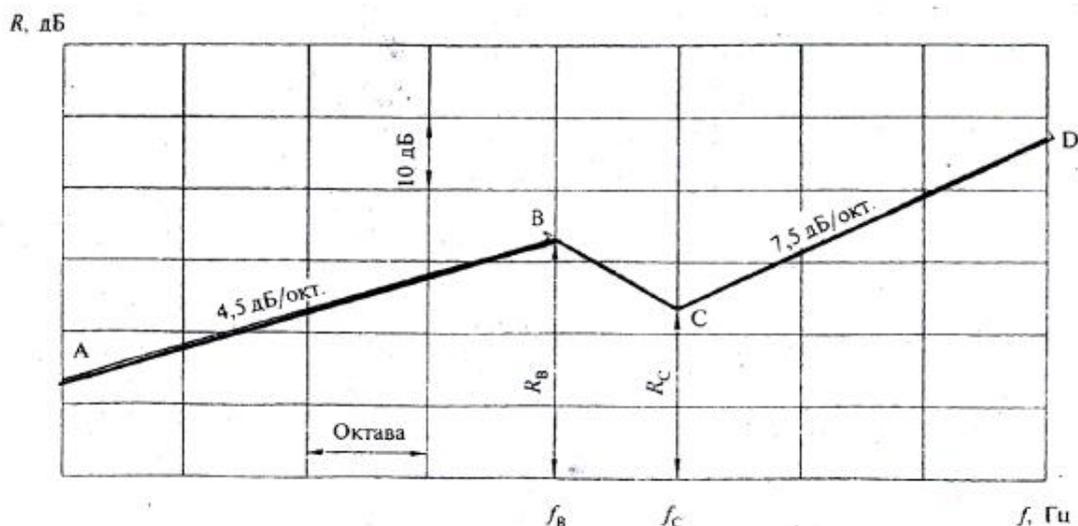


Рис. 1. Характерный вид кривой звукоизоляции тонких преград

2. Корректировка классической теории звукоизоляции

Применение классической теории расчета звукоизоляции, как было сказано выше, возможно только для тонких конструкций. Условие применимости [5] классической теории можно выразить соотношением:

$$\lambda_{np} \geq 10h, \text{ [м]} \quad (5)$$

где λ_{np} — длина продольной волны в материале [м],

h — то же, что в формуле (4).

Распространение звука через более толстые конструкции (из тяжелого, легкого бетона, кирпичной кладки и т.п.) сопровождается возникновением не только изгибных, но и продольных сдвиговых колебаний.

В результате, частотные характеристики звукоизоляции массивных и тонкостенных конструкций ведут себя по-разному:

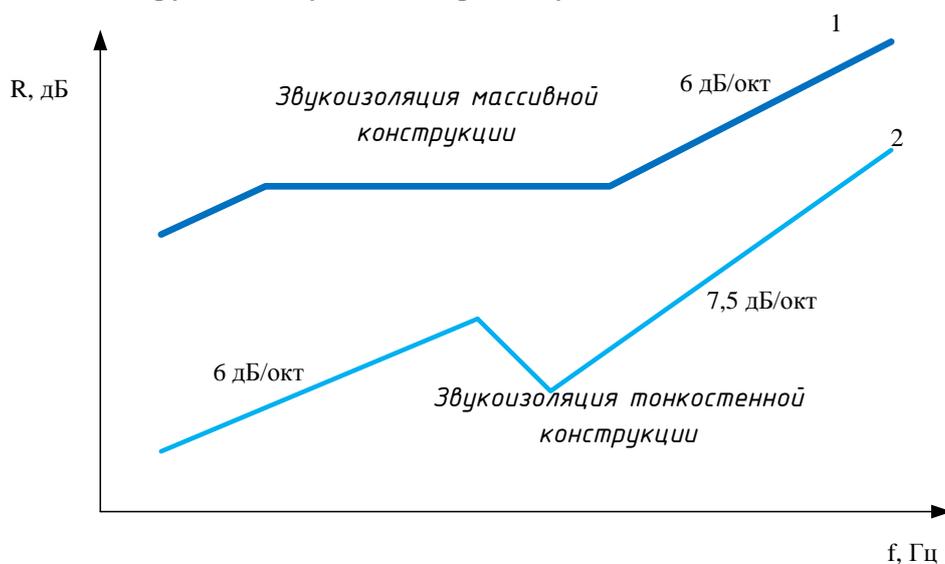


Рис. 2. Типичный вид кривых звукоизоляции «тонкой» и «толстой» конструкций

Для толстостенных конструкций частотная характеристика имеет ровное «плато», на котором звукоизоляция остается постоянной. Начиная с некоторой частоты, рост звукоизоляции составляет 6 дБ/окт.

Для тонкостенных конструкций частотная характеристика имеет подъем 6 дБ/окт, потом на частоте волнового совпадения, наблюдается провал звукоизоляции, после чего звукоизоляция растет линейно со скоростью 7,5 дБ/окт.

В настоящей работе предлагается аналитическая модель расчета звукоизоляции, учитывающая особенность распространения звука через преграду, в зависимости от ее толщины.

Импеданс толстостенной конструкции $Z'(\theta)$ определяется по формуле:

$$Z'(\theta) = \Phi(\theta) \cdot Z(\theta) = k_d \cdot \tan(\theta) \cdot Z(\theta) = \frac{2,5 \cdot d}{1000 \cdot c_0} \cdot \tan(\theta) \cdot Z(\theta), \quad (6)$$

где $\Phi(\theta)$ – фактор переизлучения k_d – коэффициент учитывающий толщину конструкции.

Для расчета звукоизоляции толстостенной (массивной) конструкции необходимо в формуле (3) вместо импеданса бесконечной пластины $Z(\theta)$ вставить импеданс толстостенной конструкции $Z'(\theta)$.

Формулы (1)-(6) позволяют определить звукоизоляцию однородной конструкции в более широком диапазоне толщин, нежели по модели расчета [6].

На рис. 2-3 представлены кривые звукоизоляции для кирпичной и газобетонной стен, различной толщины.

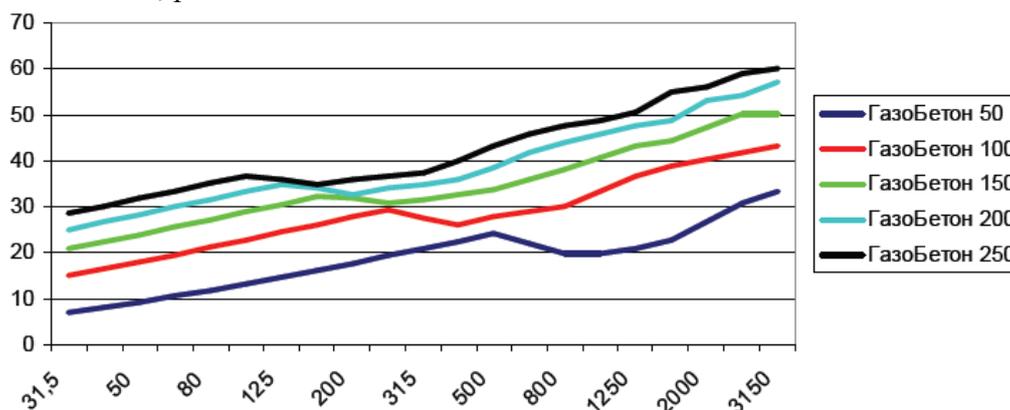


Рис. 3. Семейство расчетных кривых звукоизоляции для газобетонных стен с толщинами от 50 мм до 250 мм

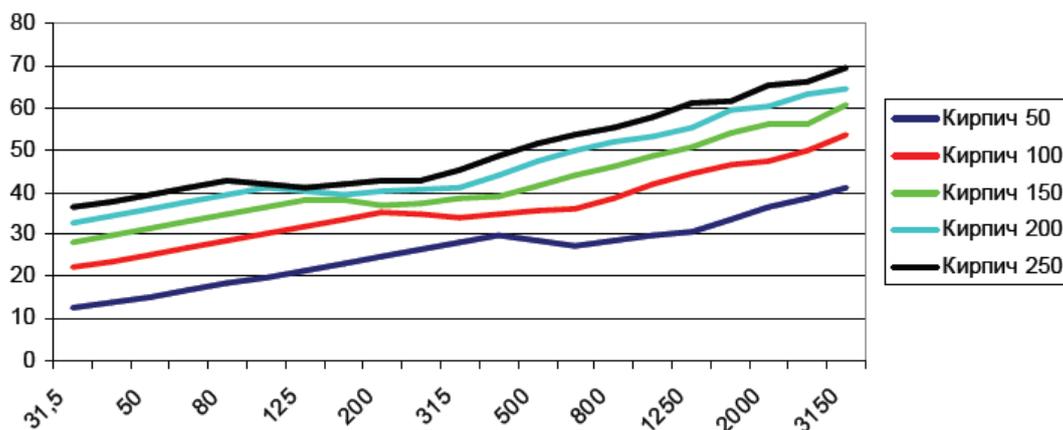


Рис. 4. Семейство расчетных кривых звукоизоляции для кирпичных стен с толщинами от 50 мм до 250 мм.

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что при увеличении толщины и массы конструкции, кривая звукоизоляции лежит выше, область «плато» проявляется сильнее и размещается в более низкочастотной области. При малых толщинах и массе, кривая звукоизоляции толстостенных конструкций вырождается в кривую звукоизоляции тонкостенных конструкций, с характерным падением звукоизоляции на частоте волнового совпадения.

На рисунке 5 представлены графики звукоизоляции, полученные по формулам (1)-(6) и по графоаналитическому методу для кирпичной стены, толщиной 250 мм.

На рисунке 6 представлены графики звукоизоляции, полученные по формулам (1)-(6) и по графоаналитическому методу для газобетонной стены, толщиной 250 мм.

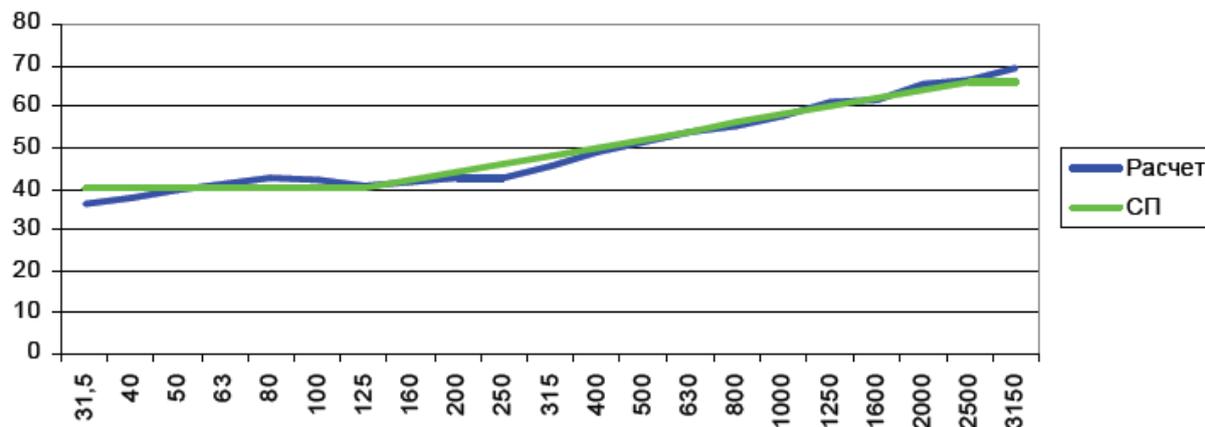


Рис. 5. Частотные зависимости звукоизоляции кирпичной стены, толщиной 250 мм

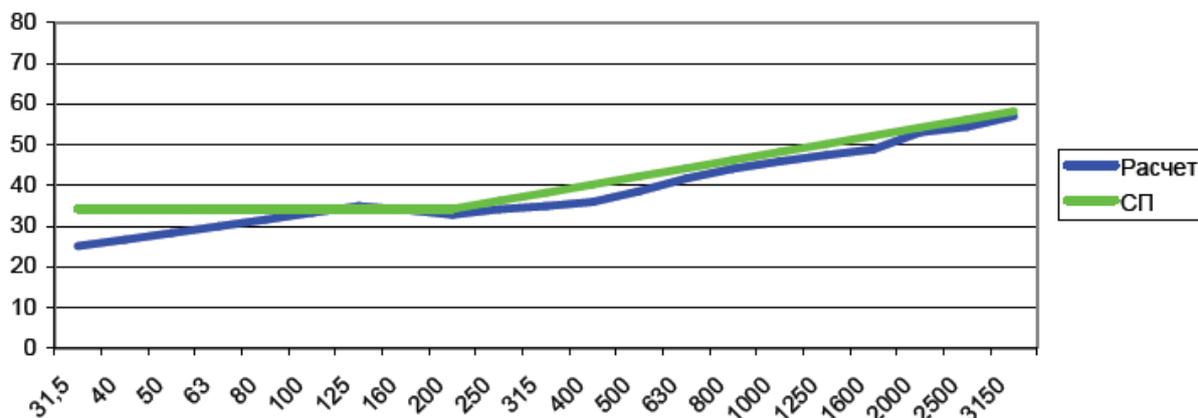


Рис. 6. Частотные зависимости звукоизоляции газобетонной стены, толщиной 250 мм

Из рисунков 5 и 6 видно, что расчетные кривые по универсальной методике хорошо согласуются с результатами расчета по графоаналитическому методу свода Правил СП 23-103-2003. При расчете по формулам (1) - (6) мы получаем дополнительную информацию о значении звукоизоляции на частотах ниже 100 Гц.

Заключение

Применение фактора переизлучения $\Phi(\theta)$, зависящего от тангенса угла падения звуковой волны на преграду, позволило рассчитать импеданс толстостенной ограждающей конструкции $Z'(\theta)$.

Подстановка полученного значения $Z'(\theta)$ в классическую теорию расчета

звукоизоляции, привела к возможности расчета звукоизоляции однослойных ограждений по единой методике, независимо от толщины ограждения, плотности и упругих характеристик материала.

Сравнение частотных характеристик звукоизоляции аналитическим и графическим методами, показало хорошую согласованность результатов расчета.

Список литературы

1. Marshall Long. Architectural Acoustics. 2nd Edition //M. Long, 2014. – 950 p.
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. СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. – Москва, 2004.
5. Щевьев Ю.П., Осташевский Е.Н. Средства акустической обработки помещений. – СПб, 2010. – 328 с.
6. 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.