УДК 699.844.1 DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-41-51

С.Н. ОВСЯННИКОВ[1,2]
[1]Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия
[2]Научно-исследовательский институт строительной физики, Москва, Россия

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация. *Исследовалась нерезонансная и резонансная звукопередача через ограждающую конструкцию. Использовался метод статистического энергетического анализа, в систему уравнений энергетического баланса добавлены нерезонансные энергетические связи. Рассмотрен известный вариант представления нерезонансной звукопередачи непосредственно из помещения в помещение, минуя ограждающую конструкцию. Предложена схема энергетических связей между элементами, в которой показана нерезонансная звукопередача от помещения к панели, предложены формулы расчета коэффициентов нерезонансной энергетической связи от помещения к панели через вычисление импеданса поперечных колебаний панели с учетом импеданса массы, изгибной жесткости и потерь в панели. Представлены результаты расчета и измерения уровней звука в реверберационных камерах и виброускорения на стеклянной пластине между ними. Показана удовлетворительная сходимость между результатами расчета и измерения, что позволяет использовать приложенную методику расчета параметров звука и вибрации в более сложных виброакустических системах.*

Ключевые слова: *звукоизоляция, нерезонансная звукопередача, метод статистического энергетического анализа, импеданс.*

S.N. OVSYANNIKOV[1,2]
[1] Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia
[2] Research Institute of building physics, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING SOUND INSULATION USING THE METHOD OF STATISTICAL ENERGY ANALYSIS

Abstract. *Non-resonant and resonant sound transmission through the enclosing structure was investigated. The method of statistical energy analysis was used, non-resonant energy links were added to the system of energy balance equations. A well-known variant of representing non-resonant sound transmission directly from room to room, bypassing the enclosing structure, is considered. A scheme of energy connections between the elements is proposed, which shows non-resonant sound transmission from room to panel, formulas for calculating the coefficients of non-resonant energy connection from room to panel are proposed by calculating the impedance of transverse vibrations of the panel, taking into account the impedance of mass, bending stiffness and losses in the panel. The results of calculating and measuring sound levels in reverberation chambers and vibration acceleration on a glass plate between them are presented. A satisfactory convergence has been shown between the calculation and measurement results, which makes it possible to use the applied methodology for calculating sound and vibration parameters in more complex vibroacoustic systems.*

Keywords: *Sound insulation, non-resonant sound transmission, statistical energy analysis method, impedance.*

© Овсянников С.Н., 2025

1. Введение

Проблемы проектирования качественной звукоизоляции в зданиях в значительной мере вызваны отсутствием достаточно понятных проектировщику аналитических методов расчета звукоизоляции помещений для целого ряда современных конструктивных систем зданий. Легкие внутренние и наружные ограждающие конструкции получили широкое распространение, однако, проектировщик пока не вооружен инженерной методикой расчета звукоизоляции легких многослойных ограждающих конструкций кроме частного случая двойных остеклений и обшивных перегородок и без учета звукопередачи по каркасу. Акустической особенностью легких конструкций из листов небольшой толщины является преобладание инерционной звукопередачи в области частот до критической, т.е. практически во всем нормируемом диапазоне частот.

В России первые расчеты и измерения звукоизоляции двойных конструкций выполнены Г.Л. Осиповым, который в 1959 году опубликовал результаты обширных исследований звукоизоляции одинарных и двойных оконных и дверных конструкций, исследовал влияние толщины воздушного промежутка на дополнительную звукоизоляцию двойных остеклений, а также влияние на звукоизоляцию герметичности притворов [1]. Значительный вклад в развитие отечественной теории и методологии расчета и проектирования звукоизоляции внес В.И. Заборов [2], который развил теоретические представления зарубежных исследователей (Рэлея, Р. Бергера, Л. Кремера, А. Лондона, М. Хекла) о прохождении звука через однослойные и двойные ограждения и предложил аналитические решения для определения коэффициента прохождения звука через одно- и двухслойные массивные ограждения. В исследованиях М.С. Седова [3, 4 и др.] впервые в России были показаны механизмы инерционной и резонансной звукопередачи через одинарные и двойные тонкие конструкции ограниченных размеров, что позволило получить выражения для вычисления коэффициентов инерционного и резонансного прохождения звука. Его учениками решен ряд задач расчета звукоизоляции однослойных, слоистых вибродемпфированных конструкций, конструкций с регулируемой изгибной жесткостью, экспериментально исследована звукоизоляция трехслойных светопрозрачных конструкций. Работы Р.Ю. Винокура и Э.М. Лалаева [5], посвященные разработке инженерной методики расчета звукоизоляции двойных и тройных легких глухих и светопрозрачных конструкций, легли в основу «Руководства по расчёту и проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций зданий» 1983 г., ставшего основой действующего СП 275.

За рубежом в основу метода расчета однослойных ограждений конечных размеров положены работы Sewell K.B., Josse, R., Lamure J., Maidanik G. На теории этих исследователей, учитывающей инерционное и резонансное прохождение звука, построена методология расчета звукоизоляции ограждающих конструкций конечных размеров в европейских нормах, которые в России приняты в ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012. Современные зарубежные исследования звукоизоляции одно-двух и трехслойных ограждений представлены в работах [7, 8, 9, 10], однако предложенная авторами методика расчета не учитывает нерезонансную звукопередачу в области ниже критической частоты, а в области высоких частот расчётная звукоизоляция значительно выше измеренной. В работах [11, 12, 13] предложены аналитические решения для инженерных расчетов звукоизоляции одно-…пятислойных остеклений, которые показали хорошую сходимость с результатами измерений. В работе [14] предложена методика расчета звукоизоляции многослойных остеклений с учетом прохождения звука через вентиляционные каналы. Для использования предложенных методик в инженерной практике необходимо исследовать влияние размеров конструкций, дистанционных рамок и других звукопроводных элементов, экспериментально уточнить значения коэффициентов общих потерь в расчетной системе.

Значительный интерес представляют и вопросы расчета звукоизоляции современных деревянных конструкций, в том числе с использованием клееных панелей CLT. Особенностью

таких конструкций является малая поверхностная масса (в 5 раз меньше, чем железобетона), но достаточно высокая изгибная жесткость, что в сочетании резко снижает характеристики звукоизоляции воздушного и ударного шума. Для конструкций из клееной древесины недостаточно изучены и динамические характеристики: динамический модуль упругости и коэффициент потерь. За рубежом более 30 лет существует мода на «Sustainable housing», поэтому технологии деревянного домостроения развиты гораздо шире, чем в России, несмотря на наличие в России практически неограниченной сырьевой базы. Конструкции из CLT применяются в сочетании с массивными железобетонными «плавающими» полами, обшиваются многослойными листовыми материалами на виброизолирующих подвесах, что обеспечивает нормативную звукоизоляцию и огнестойкость. Поэтому достаточно много современных работ, посвященных звукоизоляции конструкций из клееных деревянных панелей в сочетании с другими элементами, улучшающими их звукоизоляцию [16-19]. Основываясь на результатах зарубежных исследований и выполнив экспериментальные исследования изоляции воздушного и ударного шума конструкций из CLT в сочетании с дополнительными элементами в стенах и перекрытиях, можем получить достаточно простые инженерные методики расчета и проектирования звукоизоляции. Для расчетов звукоизоляции каркасных деревянных конструкций с многослойными обшивками могут быть использованы расчетные формулы [12] для многослойных остеклений с корректировкой на звукопередачу по элементам каркаса.

Постановка задач прохождения звука через сложные многослойные ограждающие конструкции со звукопроводными элементами, связывающими конструктивные слои возможна на основе энергетического подхода, путем записи уравнений баланса звуковой энергии и решения частных задач на основе волновой теории. Такой подход применяется и для решения наиболее сложных задач расчета уровней звукового давления в смежных и удаленных помещениях с учетом структурной звукопередачи. В отечественной практике снижение структурного шума достигается конструктивными рекомендациями в СП 51 и СП 275. Вместе с тем, современные здания имеют конструктивные особенности, которые являются причиной преобладающей структурной звукопередачи. Например, в зданиях с безригельным каркасом, массивной плитой перекрытия и легкими обшивными или легкобетонными перегородками звукопередача по массивной плите перекрытия преобладает по сравнению с энергией звука, проходящей через легкую перегородку, поэтому измеренная звукоизоляция перегородки в таком здании оказывается на 4…6 дБ ниже, чем при измерениях в лабораторных условиях реверберационных камер, где нет структурной звукопередачи.

Как видим, решение ряда задач расчета звукоизоляции требует моделирования прохождения звуковой энергии по нескольким путям звукопередачи и с учетом многовариантности конструктивных решений ограждающих конструкций, их положения в планировочной и конструктивной системе здания. В этом направлении, на наш взгляд, и должна развиваться методология расчета и проектирования звукоизоляции. За рубежом для этой цели широко применяется методология СЭА – статистического энергетического анализа. Однако, сама теория СЭА основана на статистических принципах распределения энергии в элементах расчетной виброакустической системы пропорционально плотности (числу) мод собственных колебаний в связанных конструктивных элементах и помещениях. Поэтому СЭА позволяет записать уравнения энергетического баланса только для потоков резонансной энергии, т.е. энергии мод собственных колебаний в рассматриваемой полосе частот. Учет потоков энергии вынужденных колебаний, т.е. нерезонансной энергии, является актуальной задачей, особенно для расчетов звукоизоляции легких конструкций, для которых нерезонансная звукопередача преобладает практически во всем диапазоне частот.

2. Модели и методы

Постановка задачи вычисления энергии структурного звука, а затем и уровней звука в помещениях выполнена В. Вестфалем [20], записавшим систему уравнений баланса

нерезонансной звуковой энергии в здании через коэффициенты энергетической связи. М. Крокер и А. Прайс предложили использовать методологию СЭА для формирования уравнений баланса звуковой энергии в расчетах звукопередачи [21]. С точки зрения вычислений, особенность СЭА, отличающая его от поточно-энергетического метода, заключается в соотношении коэффициентов энергетической связи и плотности мод колебаний двух связанных элементов виброакустической системы:

$$\eta_{1,2} \cdot n_1 = \eta_{2,1} \cdot n_2, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – плотности мод собственных колебаний связанных элементов системы (панели и помещения; панели и панели)

$\eta_{1,2}$ и $\eta_{2,1}$ – коэффициенты энергетической связи от первого элемента ко второму и наоборот.

Поскольку метод СЭА рассматривает только резонансную звукопередачу, М. Крокер и А. Прайс предложили дополнительную связь непосредственно между помещениями, вычисляемую через коэффициенты нерезонансного прохождения звука τ_f через ограждающую конструкцию. Впоследствии этим приемом пользовались многие исследователи, особенно подробно он описан в работах Р. Крэйка [22 и др.].

На примере наиболее простой виброакустической системы, состоящей из двух смежных помещений и разделяющей их панели перегородки (рис. 1) покажем энергетические связи передачи энергии звука по модели М. Крокера и А. Прайса. В первом помещении с индексом *I* имеется энергия звука E_I за счет притока от источника с мощностью W_I , часть этой энергии теряется на звукопоглощение W_{Id}, а другая часть в форме резонансной звукопередачи передается панели $W_{I,1}$, а в форме нерезонансной звукопередачи $W_{I,II}$ передается непосредственно в смежное помещение с индексом *II*. При этом панель 1 имеет приток и отток энергии только в форме резонансной звукопередачи, что, очевидно, не вполне корректно. Нумерация арабскими и римскими цифрами принята для того, чтобы различать конструкции и помещения в более сложных расчетных виброакустических системах.

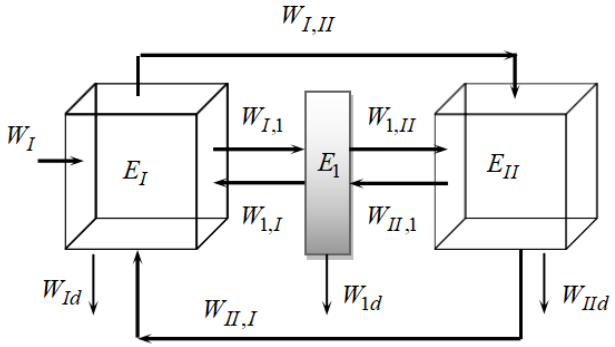

Рисунок 1 – Схема энергетического обмена между двумя помещениями и перегородкой

Уравнения энергетического баланса за цикл колебаний для каждого из трех элементов виброакустической системы при возбуждении только помещения *I* запишем, через коэффициенты энергетической связи:

$$W_I = \omega \cdot (\eta_{Id} + \eta_{I,1} + \eta_{I,II}) \cdot E_I - \omega \cdot \eta_{1,I} \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{II,I} \cdot E_{II}, \quad (2)$$

$$0 = \omega \cdot (\eta_{IId} + \eta_{II,I} + \eta_{II,1}) \cdot E_{II} - \omega \cdot \eta_{1,II} \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{I,II} \cdot E_I, \quad (3)$$

$$0 = \omega \cdot (\eta_{1d} + \eta_{1,I} + \eta_{1,II}) \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{I,1} \cdot E_I - \omega \cdot \eta_{II,1} \cdot E_{II}. \quad (4)$$

В этой системе уравнений особое значение имеет нерезонансная звукопередача в приемное помещение:

$$\eta_{I,II} = \frac{c_o \cdot S \cdot \tau_f}{8\pi \cdot f \cdot V_I}, \quad (5)$$

Коэффициент нерезонансной звукопередачи для однослойной панели τ_f можем определить по известным формулам Sewell K.B., Josse, R., Lamure J. через коэффициент излучения вынужденных волн σ_f. В работе [23] показано решение задачи о резонансном и нерезонансном прохождении звука через однослойную стеклянную пластину размерами 1,0x1,0 м, толщиной 4 мм между двумя реверберационными камерами с объемами V_I=30,04 м^3 и V_{II} =34,29 м^3. Показано, что учет только резонансной звукопередачи (отсутствие последних членов в первом и втором уравнениях) приводит к занижению уровней звукового давления в изолируемом помещении до 7 дБ. Расчетный уровень звука в приемном помещении с учетом нерезонансной звукопередачи хорошо сходится с результатами измерений. Однако, о результатах расчета по формулам (2…4) и измерения виброускорения нельзя сказать, что они хорошо сходятся вследствие того, что вынужденная звукопередача описана, минуя панель.

Для решения этой проблемы запишем уравнения баланса элементов виброакустической системы иначе, через коэффициенты нерезонансной и резонансной энергетической связи. В этом случае расчетная схема будет выглядеть как на рис. 2.

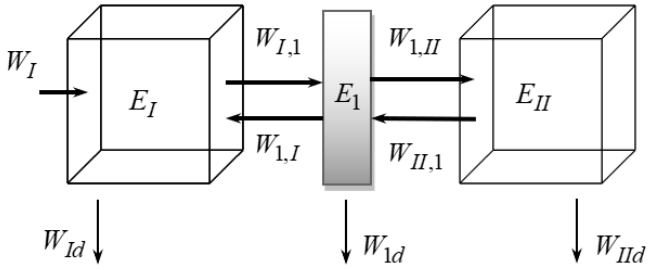

Рисунок 2 – Схема энергетического обмена между двумя помещениями и перегородкой. Резонансная и нерезонансная звукопередача происходит через перегородку

Полагаем, что все элементы виброакустической системы совершают как вынужденные (нерезонансные) так и собственные (резонансные) колебания, тогда и коэффициенты энергетической связи между элементами системы будем считать, как сумму нерезонансных и резонансных коэффициентов, например, $\eta_{1,II} = \eta^f_{1,II} + \eta^r_{1,II}$. Пренебрегая обратными потоками энергии, которые много меньше прямых потоков от помещения с источником звука, можем записать уравнения энергетического баланса для каждого из трех элементов виброакустической системы при возбуждении помещения I, через коэффициенты нерезонансной и резонансной энергетической связи за цикл колебаний:

$$W_I = \omega \cdot (\eta_{Id} + \eta^f_{I,1} + \eta^r_{I,1}) \cdot E_I, \tag{6}$$

$$0 = \omega \cdot \left(\eta_{IId} + \eta^f_{II,1} + \eta^r_{II,1}\right) \cdot E_{II} - \omega \cdot (\eta^f_{1,II} + \eta^r_{1,II}) \cdot E_1, \tag{7}$$

$$0 = \omega \cdot \left(\eta_{1d} + \eta^f_{1,I} + \eta^r_{1,I} + \eta^f_{1,II} + \eta^r_{1,II}\right) \cdot E_1 - \omega \cdot (\eta^f_{I,1} + \eta^r_{I,1}) \cdot E_I, \tag{8}$$

В уравнениях (5…7) суммы в скобках представляют собой коэффициенты полных потерь в помещениях:

$$\eta_I = \eta_{Id} + \eta^f_{I,1} + \eta^r_{I,1},$$

$$\eta_{II} = \eta_{IId} + \eta^f_{II,1} + \eta^r_{II,1}$$

и в панели:

$$\eta_1 = \eta_{1d} + \eta^f_{1,I} + \eta^r_{1,I} + \eta^f_{1,II} + \eta^r_{1,II}.$$

Эти коэффициенты общих потерь могут быть определены из измерения времени реверберации или расчетом.

Важным обстоятельством для упрощения вычисления является допущение о том, что нерезонансная звукопередача преобладает в диапазоне до критической частоты $f < f_c$, а

резонансная звукопередача – на частотах преимущественно выше $f > f_c$. Поэтому уравнения (6…8) для нерезонансной звукопередачи можем записать:

$$W_I = \omega \cdot \eta_I \cdot E_I, \tag{9}$$

$$0 = \omega \cdot \eta_{II} \cdot E_{II} - \omega \cdot \eta_{1,II}^{f} \cdot E_1, \tag{10}$$

$$0 = \omega \cdot \eta_1 \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{I,1}^{f} \cdot E_I. \tag{11}$$

Из последнего уравнения получим коэффициент энергетической связи от помещения к панели:

$$\eta_{I,1}^{f} = \frac{E_1}{E_I} \cdot \eta_1. \tag{12}$$

Заметим, что в СЭА этот коэффициент определяется только обратным вычислением через соотношение плотностей мод колебаний по формуле (1).

Теперь воспользуемся известными формулами для выражения энергии в элементах системы через параметры их колебаний [24]. В помещении, возбуждаемом источником звука, возникает потенциальная энергия, пропорциональная среднеквадратичному значению звукового давления $\langle p_I^2 \rangle$:

$$E_I = \frac{\langle p_I^2 \rangle \cdot V_I}{\rho \cdot c^2}. \tag{13}$$

где V_I – объем помещения с источником звука;

ρ – плотность воздуха;

c– скорость звука в воздухе.

Кинетическую энергию изгибных колебаний пластины можем записать через среднеквадратичное значение виброскорости $\langle v_1^2 \rangle$:

$$E_1 = m_1 \cdot S_1 \cdot \langle v_1^2 \rangle, \tag{14}$$

где $m_1 = \rho_1 \cdot h_1$– поверхностная масса панели;

S_1 – площадь панели.

При возбуждении панели из воздушного объема помещения колебательная скорость панели зависит от ее импеданса:

$$\langle v_1^2 \rangle = \frac{2 \cdot \langle p_I^2 \rangle}{|Z_w|^2}. \tag{15}$$

Тогда энергию изгибных колебаний в панели можем записать:

$$E_1 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot S_1 \cdot \langle p_I^2 \rangle}{|Z_w|^2}, \tag{16}$$

Подставив (13) и (16) в выражение (12), получим формулу для определения коэффициента нерезонансной энергетической связи от объема помещения к панели:

$$\eta_{I,1}^{f} = \frac{2 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot m_1 \cdot S_1}{|Z_w|^2 \cdot V_I} \cdot \eta_1, \tag{17}$$

или выразив импеданс панели простейшей зависимостью $|Z_w|^2 = (\omega \cdot m_1)^2$, как импеданс массы получим:

$$\eta_{I,1}^{f} = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_1}{2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m_1 \cdot V_I} \cdot \eta_1, \tag{18}$$

Однако в расчетах следует принять импеданс панели с учетом изгибной жесткости и потерь [24]:

$$|Z_w|^2 = \left((1 + \eta_1) \cdot m_1 \cdot \omega + \frac{B_1}{\omega} \cdot \left(\frac{\omega}{c} \right)^4 \right)^2 \tag{19}$$

Данный подход может быть использован и для расчетов нерезонансной передачи звуковой энергии из одной пластины в другую в расчетах структурной звукопередачи, если подставлять импедансы конструкции [24, 25], соответствующие типу колебаний.

Коэффициент энергетической связи панели и помещения при вынужденных колебаниях выразим отношением энергии в пластине к излучаемой в помещение мощности:

$$\omega \cdot \eta_{1,II}^{f} \cdot E_1 = W_{изл}^{f}. \quad (20)$$

Излучаемая пластиной мощность:

$$W_{изл}^{f} = \rho \cdot c \cdot S_1 \cdot \langle v_1^2 \rangle \cdot \sigma^f. \quad (21)$$

Тогда, с учетом формулы (14) получим:

$$\eta_{1,II}^{f} = \frac{\rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_1} \cdot \sigma^f. \quad (22)$$

Резонансные коэффициенты энергетической связи запишем известными формулами [23] от панели 1 к помещению *II*:

$$\eta_{1,II}^{r} = \frac{\rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_1} \cdot \sigma^r. \quad (23)$$

Коэффициент резонансной энергетической связи от помещения *I* к панели 1 получим, используя соотношение (1) и значения плотности мод колебаний в панели и в объеме помещения в единичной полосе круговых частот:

$$n_1 = \frac{S_1 \cdot f_c}{2 \cdot c^2}, \quad (24)$$

$$n_I = \frac{2 \cdot f^2 \cdot V_I}{c^3}, \quad (25)$$

Тогда получим коэффициент резонансной связи от помещения к панели:

$$\eta_{I,1}^{r} = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_1 \cdot f_c}{8 \cdot \pi \cdot f^3 \cdot m_1 \cdot V_I} \cdot \sigma^r. \quad (26)$$

3. Результаты исследования и их анализ

Для проверки сходимости результатов расчета с учетом нерезонансной и резонансной звукопередачи непосредственно через панель по предлагаемым формулам расчета коэффициентов энергетической связи, выполним измерения в третьоктавных полосах частот от 100 до 3150 Гц уровней звукового давления в помещениях реверберационых камер L_I и L_{II} и виброускорений a_1 по 9 точкам на стеклянной панели с размерами 1,0х1,0 м толщиной 0,004 м в проеме между камерами с объемами V_I=30,04 м^3 и V_{II}=34,29 м^3.

Определим из измерений уровней звукового давления в помещении I величины подаваемой звуковой мощности в третьоктавах:

$$W_I = \frac{A_I}{4 \cdot 10^{12}} \cdot 10^{0,1 \cdot L_I} \quad (27)$$

Измерениями времени реверберации определим коэффициенты общих потерь η_Iи η_{II}в помещениях и эквивалентного звукопоглощения в помещениях камер А$_I$ и A_{II}. Измерениями времени структурной реверберации определим коэффициент общих потерь в пластине η_1.

Воспользуемся системой уравнений (6 – 8) и, обозначив суммарные коэффициенты энергетической связи $\eta_{1,II} = \eta_{1,II}^{f} + \eta_{1,II}^{r}$ и $\eta_{I,1} = \eta_{I,1}^{f} + \eta_{I,1}^{r}$, вычислим значения неизвестной энергии в каждом из трех элементов системы:

$$E_I = \frac{W_I}{\omega \cdot \eta_I}, \quad (28)$$

$$E_1 = \frac{\eta_{I,1} \cdot E_I}{\eta_1} = \frac{W_I}{\omega} \cdot \frac{\eta_{I,1}}{\eta_I \cdot \eta_1}, \quad (29)$$

$$E_{II} = \frac{\eta_{1,II} \cdot E_1}{\eta_{II}} = \frac{W_1}{\omega} \cdot \frac{\eta_{I,1} \cdot \eta_{1,II}}{\eta_I \cdot \eta_1 \cdot \eta_{II}}. \quad (30)$$

Определим и расчетные значения уровней звукового давления в помещениях:

$$L_I = 10\, lg \frac{E_I \cdot c}{10^{-12} \cdot V_I}, \quad (31)$$

$$L_{II} = 10\, lg \frac{E_{II} \cdot c}{10^{-12} \cdot V_{II}}, \quad (32)$$

и среднеквадратичное виброускорение на стеклянной панели:

$$\langle a_1^2 \rangle = \frac{a_1^2 + a_2^2 + \ldots a_n^2}{n} = \frac{\omega^2 \cdot E_1}{m_1 \cdot S_1} \quad (33)$$

Результаты расчетов и измерений уровней звукового давления показаны на рисунке 3, виброускорений на панели на рисунке 4.

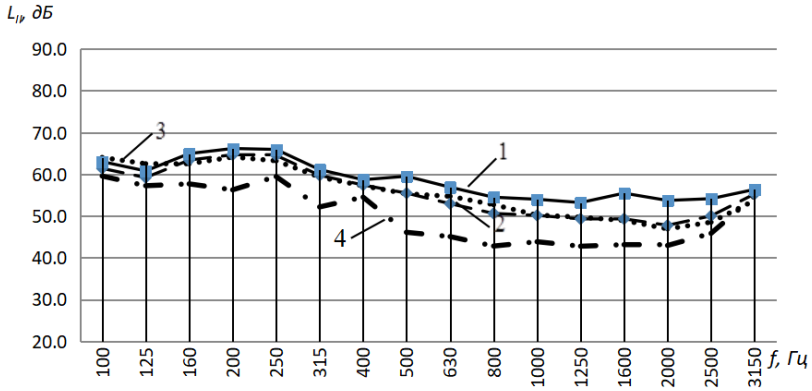

Рисунок 3 – Результаты расчета и измерения уровней шума в камере низкого уровня:
1 – расчет по предлагаемой методике, учитывающей нерезонансную звукопередачу через панель; 2 – расчет по методике М. Крокера и А. Прайса, учитывающей нерезонансную звукопередачу из помещения в помещение; 3 – измеренные уровни шума; 4 – расчет по методике СЭА без учета нерезонансной звукопередачи

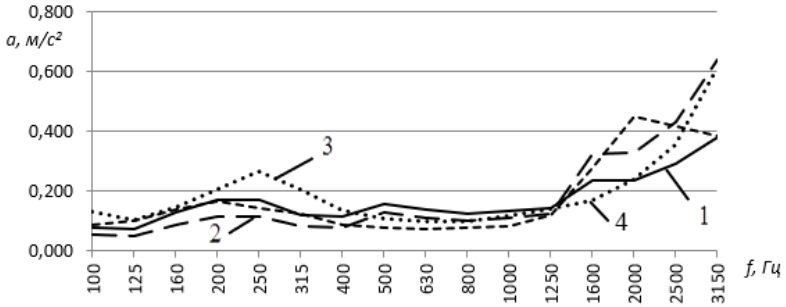

Рисунок 4 – Результаты расчета и измерения виброускорения на стеклянной панели, разделяющей камеру высокого и низкого уровня:
1 – расчет по предлагаемой методике, учитывающей нерезонансное возбуждение панели; 2 – расчет по методике М. Крокера и А. Прайса, учитывающей нерезонансную звукопередачу из помещения в помещение; 3 – измеренные виброускорения лазерным виброметром Polytec RSV-150; 4 – измеренные виброускорения многоканальным виброанализатором ZETLAB

Из рисунка 3 можем видеть, что расчет без учета нерезонансной звукопередачи (линия 4) дает заниженные до 7 дБ уровни шума в изолируемом помещении в различных третьоктавных полосах частот. Наиболее точный результат (линия 2), близкий к результатам измерения (линия 3) дает расчет по методике СЭА с представлением нерезонансной звукопередачи из помещения с источником в изолируемое помещение (методика М. Крокера и А. Прайса). Расчет по методике СЭА с представлением нерезонансной звукопередачи через панель (линия 4) дает хорошую сходимость на низких частотах и несколько завышенные (до 5 дБ) уровни на средних частотах. В данном случае требуются дополнительные исследования для более точного вычисления импеданса возбуждаемой звуком панели, что позволит уточнить предлагаемую методику.

Рисунок 4 демонстрирует достаточно хорошую сходимость результатов расчета по предлагаемой методике (линия 1) и результатов измерения многоканальным виброанализатором ZETLAB (линия 4) и лазерным виброметром Polytec RSV-150 (линия 2). Это позволяет видеть, что расчет энергии изгибных колебаний возбуждаемой звуком панели через импеданс панели дает адекватные результаты, что можно использовать в расчетах более сложных виброакустических систем.

4. Заключение

1. В практике защиты от шума в зданиях существует ряд задач, которые не решить существующими методиками расчета звукоизоляции. Современные конструктивные системы имеют легкие ограждающие конструкции и конструктивные связи, являющиеся звуковыми мостиками. Моделирование распространения звука и вибрации через такие сложные системы требует применения энергетических методов. Наиболее широко в мире применяется метод статистического энергетического анализа (СЭА), который учитывает только резонансную звукопередачу.

2. Передача звуковой энергии происходит в результате распространения вынужденных (нерезонансных) колебаний и излучения звука в результате собственных (резонансных) колебаний конструкций и отклика помещений. В современных конструктивных системах с легкими ограждающими конструкциями практически во всем диапазоне частот преобладает нерезонансная звукопередача. Предложено в уравнения баланса звуковой энергии по СЭА включить нерезонансную звукопередачу от помещения к панелям, что позволяет учесть нерезонансное возбуждение ограждающих конструкций, в отличие от известной методики учета нерезонансной звукопередачи непосредственно от помещения к помещению. Предложены формулы расчета коэффициентов нерезонансной энергетической связи от помещения к панели через вычисление импеданса поперечных колебаний панели с учетом импеданса массы, изгибной жесткости и потерь в панели.

3. Расчет на тестовом примере прохождения звука через однослойное стеклянное ограждение 1,0х1,0 м, толщиной 4 мм показал адекватные результаты, с достаточно хорошей сходимостью с результатами измерений в реверберационных камерах. При формировании сложных виброакустических моделей распространения звука в системах с большим количеством элементов (помещения, панели, конструктивные связи) применение предложенных формул для вычисления коэффициентов нерезонансной энергетической связи позволит учесть нерезонансную звукопередачу по конструкциям.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов Г.Л. Звукоизоляция ограждений с оконными и дверными проемами // В кн.: Вопросы звукоизоляции и архитектурной акустики. По ред. В.Н. Никольского. М. 1959. С.49–87.

2. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций // 2-е издание переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1969. – 185 с.

3. Седов М.С. Звукоизоляция тонких однослойных пластин ограниченных размеров // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1964. № 5. С 130-134

4. Седов М.С. Звукоизоляция. Справочник «Техническая акустика транспортных машин»: Под ред. д-ра техн. наук профессора Н. И. Иванова. СПб: Политехника, 1992. Глава 4. С. 68–106.

5. Винокур Р.Ю., Лалаев Э.М. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляционных стеклопакетов // В книге: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. М.: МДНТП. 1982. с. 62-67.

6. Vinokur R. Transmission loss of triple partitions at low frequencies // Appl. Acoust., 1990, 29 (1), pp. 15-24.

7. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation // Applied Acoustics. 2001. Vol.62, pp. 307–325. https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)0032-3.

8. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities // European Journal of Mechanics A/Solids. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. https://doi.org/10.1016/euromechsol.2011.14.013

9. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements // Applied Acoustics. 2012. Vol.73, pp. 575–589. https://doi.org/10.1016/apacoust.2011.11.008

10. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J. J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise // Journal of Building Engineering. 2021.102773. pp. 1-10.

11. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Окна в раздельных переплетах с высокой тепло-звукоизоляцией // Строительные материалы. 2012. № 6. С. 42–43.

12. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукоизоляция однослойных остеклений, одно и двухкамерных стеклопакетов // Жилищное строительство. – 2023. – № 12. – С. 12 – 17.

13. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Шубин И.Л. Звукоизоляция многослойных остеклений в раздельных переплетах // Жилищное строительство – М., 2024. – № 12. – с. 20-28.

14. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукопередача через ограждения с малыми техническими элементами, включая воздухообменные устройства // Строительство и реконструкция. 2024. № 5. С. 31-43.

15. Caniato M., Bettarello F., Ferluga A., Marsicha L., Schmida C., Faustic P. Acoustic of lightweight timber buildings: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 80. C. 585–596. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110

16. Caniato M., Bettarello F., Granzotto N., Marzi A., Gasparella A. A comprehensive vibroacoustic investigation of a cross laminated timber floor // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 322. 126303. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126303

17. Hongisto V., Alakoivu R., Vitranen J. et al. Sound insulation dataset of 30 wooden and 8 concrete floors tested in laboratory conditions // Data in Brief. 2023. Vol. 49. 109393. https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109393

18. Churchill C., Hopkins C. Prediction of airborne sound transmission across a timber–concrete composite floor using Statistical Energy Analysis // Applied Acoustics. 2016. Vol. 110. C. 145–159. http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.031

19. Martins C., Santos P., Almeida P., Godinho L., Dias A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. C. 684–691. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142

20. Westphal W. Ausbreitung vor Korperschall in Gebauden // Acustica. 1957. Vol. 7. C. 335-348.

21. Crocker M.J., Price A.J. Sound transmission through double panels using SEA // Journal of the Acoustical Society of America. 1970. Vol. 47. № 3. Pp. 688-693.

22. Craik R.J.M. Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis // Applied Acoustics. 2003. № 64. Pp. 325–341.

23. Овсянников С.Н. Расчет распространения звука методом СЭА с учетом нерезонансной звукопередачи // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: материалы XV Международной научно-практической конференции, 12–14 марта 2025 г. Часть 2 / под ред. Т.Ю. Овсянниковой. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2025.– с. 48-56.

24. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis Group, LLC. – 2018.– 476 P. DOI: https://doi.org/10.1201/9781351228206

25. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure-borne sound. – Springer Verlag, 1973. – 528 p.

REFERENCES

1. Osipov G.L. Sound insulation of fences with window and door openings. In: Nikolsky V.N. (ed.) Issues of sound insulation and architectural acoustics. Moscow, 1959. Pp. 49-87. (rus)

2. Zaborov V.I. Theory of sound insulation of enclosing structures. 2nd ed. Moscow: Stroyizdat, 1969. 185 p. (rus)

3. Sedov M.S. Sound insulation of thin single-layer plates of limited dimensions. *Izvestiya VUZov. Stroitelstvo i Arkhitektura*. 1964. No. 5. Pp. 130-134. (rus)

4. Sedov M.S. Sound insulation. In: Ivanov N.I. (ed.) Technical acoustics of transport vehicles. St. Petersburg: Polytechnic, 1992. Ch. 4. Pp. 68-106. (rus)

5. Vinokur R.Yu., Lalaev E.M. Theoretical and experimental studies of soundproof double-glazed windows. In: Combating noise and sound vibration. Moscow: MDNTP, 1982. Pp. 62-67. (rus)

6. Vinokur R. Transmission loss of triple partitions at low frequencies. *Applied Acoustics*. 1990. Vol. 29. No. 1. Pp. 15-24. DOI: 10.1016/0003-682X(90)90003-4

7. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. *Applied Acoustics*. 2001. Vol. 62. Pp. 307-325. DOI: 10.1016/S0003-682X(00)00032-3

8. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30. Pp. 770-782. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2011.04.013

9. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements. *Applied Acoustics*. 2012. Vol. 73. Pp. 575-589. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.11.008

10. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J.J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering*. 2021. 102773. Pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102773

11. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Windows in separate bindings with high thermal insulation. *Stroitelnye Materialy*. 2012. No. 6. Pp. 42-43. (rus)

12. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound insulation of single-layer glazing, single and double-glazed windows. *Zhilishchnoe Stroitelstvo*. 2023. No. 12. Pp. 12-17. (rus)

13. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S., Shubin I.L. Sound insulation of multilayer glazing in separate bindings. *Zhilishchnoe Stroitelstvo*. 2024. No. 12. Pp. 20-28. (rus)

14. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound transmission through fences with small technical elements, including air exchange devices. *Stroitelstvo i Rekonstruktsiya*. 2024. No. 5. Pp. 31-43. (rus)

15. Caniato M., Bettarello F., Ferluga A., Marsich L., Schmid C., Fausti P. Acoustic of lightweight timber buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 80. Pp. 585-596. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.110

16. Caniato M., Bettarello F., Granzotto N., Marzi A., Gasparella A. A comprehensive vibroacoustic investigation of a cross laminated timber floor. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 322. 126303. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126303

17. Hongisto V., Alakoivu R., Vitranen J. et al. Sound insulation dataset of 30 wooden and 8 concrete floors tested in laboratory conditions. *Data in Brief*. 2023. Vol. 49. 109393. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109393

18. Churchill C., Hopkins C. Prediction of airborne sound transmission across a timber-concrete composite floor using Statistical Energy Analysis. *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 110. Pp. 145-159. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.03.031

19. Martins C., Santos P., Almeida P., Godinho L., Dias A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 684-691. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142

20. Westphal W. Ausbreitung vor Korperschall in Gebauden. *Acustica*. 1957. Vol. 7. Pp. 335-348.

21. Crocker M.J., Price A.J. Sound transmission through double panels using SEA. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1970. Vol. 47. No. 3. Pp. 688-693. DOI: 10.1121/1.1911939

22. Craik R.J.M. Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis. *Applied Acoustics*. 2003. Vol. 64. Pp. 325-341. DOI: 10.1016/S0003-682X(02)00110-0

23. Ovsyannikov S.N. Calculation of sound propagation by the SEA method, taking into account non-resonant sound transmission. In: Ovsyannikova T.Y. (ed.) Investments, urban planning, technologies as drivers of socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference, March 12-14, 2025, Part 2*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University of Architecture and Building, 2025. Pp. 48-56. (rus)

24. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis, 2018. 476 p. DOI: 10.1201/9781351228206

25. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure-borne sound. Springer, 1973. 528 p.

Информация об авторах

Овсянников Сергей Николаевич
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий»
ФГБУ НИИСФ РААСН, главный научный сотрудник.
E-mail: ovssn@tsuab.ru,

Information about authors

Ovsyannikov Sergey N.
Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia,
Research Institute of Building Physics (NIISF RAASN), Moscow, Russia,
Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department "Architecture of Civil and Industrial Buildings",
Chief Research Scientist,
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Статья поступила в редакцию 15.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 15.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025