

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 117–140.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (6): 117–140.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.844.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140

EDN: TAIVPW

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ЗДАНИИ

Сергей Николаевич Овсянников^{1,2}, Михаил Сергеевич Овсянников³

¹*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

²*Научно-исследовательский институт строительной физики,
г. Москва, Россия*

³*Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность работы обусловлена недостаточностью существующих инженерных методов расчета звукоизоляции, которые не учитывают потери энергии, размеры конструкций, влияние примыкающих элементов и структурную звукопередачу, особенно актуальную при использовании легких и многослойных ограждений. Отсутствие инструментов для прямого расчета уровней звука и вибрации затрудняет оценку соответствия проектов санитарным нормам.

Цель исследования – разработка основ математического моделирования распространения звука в зданиях для создания инженерных методов и программного комплекса, позволяющих рассчитывать звукоизоляцию ограждающих конструкций, уровни звукового давления в помещениях и параметры вибрации с учетом прямой, косвенной и структурной передачи энергии.

Материалы и методы исследования включают энергетические методы (постановка общей задачи баланса звуковой энергии) и волновую теорию (расчет частных задач прохождения звуковой энергии). Представлены аналитические модели для расчета звукоизоляции одно- и многослойных конструкций, а также модели распространения звука в комплексных фрагментах здания с использованием методологии ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 и метода статистического энергетического анализа (СЭА).

Результаты. Разработаны математические модели и алгоритмы для трехуровневой системы расчетов: собственной звукоизолирующей способности конструкций; звукоизо-

ляции с учетом косвенной и структурной передачи; уровней звука и вибрации в помещениях на основе СЭА. Модели являются основой для создания параметрического программного комплекса проектирования звукоизоляции в зданиях с учетом структурной звукопередачи.

Ключевые слова: звук, вибрация, звукоизоляция, структурная звукопередача, математическое моделирование

Финансирование: работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.5.

Для цитирования: Овсянников С.Н., Овсянников М.С. Математическое моделирование распространения звука в здании // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 117–140. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140. EDN: TAIVPW

ORIGINAL ARTICLE

MATHEMATICAL SIMULATION OF SOUND PROPAGATION IN A BUILDING

Sergei N. Ovsyannikov^{1,2}, Mikhail S. Ovsyannikov³

¹*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

²*Research Institute of Structural Physics, Moscow, Russia*

³*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Abstract. The relevance of this work is determined by inadequacy of engineering methods for calculating sound insulation, which do not consider energy losses, dimensions of constructions, influence of adjacent elements, and structural sound transmission, which is particularly relevant in using lightweight and multi-layer enclosures. The lack of tools for direct calculation of sound and vibration levels makes it difficult to assess the compliance of projects with sanitary standards.

Purpose: The aim of this work is to develop bases for mathematical simulation of the sound propagation in buildings in order to create engineering methods and software for calculating the sound insulation of enclosing structures, sound pressure levels in rooms, and vibration parameters with regard to direct, indirect, and structural energy transmission.

Methodology: Energy methods (sound energy balance) and wave theory (sound energy transmission). Analytical models are used to calculate the sound insulation of single- and multi-layer structures, models of sound propagation in complex building fragments in accordance to GOST R EN 12354-1–2012 and the statistical energy analysis.

Research findings: Mathematical models and algorithms are developed for a three-level calculation system: inherent sound insulation capacity of structures, sound insulation with indirect and structural transmission, sound and vibration levels in rooms based on statistical energy analysis. The proposed models form the basis for the creation of parametric software to design sound insulation in buildings, taking into account structural sound transmission.

Keywords: sound, vibration, sound insulation, structural sound transmission, mathematical simulation

Funding: this work was financially supported by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Project No. 3.1.4.5).

For citation: Ovsyannikov S.N., Ovsyannikov M.S. Mathematical Simulation of Sound Propagation in a Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 117–140. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140. EDN: TAIVPW

Введение

Существующие в настоящее время и используемые проектным сообществом России методы расчетов звукоизоляции практически не изменились за последние полвека и основаны на графоаналитическом построении частотных характеристик изоляции воздушного шума простейших одно- и двухслойных ограждающих конструкций или табличного определения индексов изоляции воздушного и приведенного уровня ударного шума по СП 275.1325800.2016. При этом расчет ведется без учета потерь энергии, размеров самих конструкций, а также влияния примыкающих конструкций на звукоизоляцию. Нет и методов расчета непосредственно уровней звука и вибрации при заданных характеристиках источников, что не позволяет оценить выполнение санитарных норм при проектировании зданий, оснащенных различным оборудованием. Известны зарубежные компьютерные программы Insul, Bastian и др., позволяющие получать частотные характеристики и индексы изоляции воздушного и ударного шума ограждающих конструкций достаточно широкой типологии. Однако, как указывают их разработчики, с увеличением сложности и числа слоев в конструкции существенно снижается сходимость результатов расчета с результатами измерений: точность расчетов для однослойных конструкций оценивается в 3...4 дБ, для многослойных – существенно меньше, что является следствием теоретических упрощений. Bastian позволяет моделировать структурную звукопередачу между двумя помещениями для уточнения индекса звукоизоляции ограждений.

Для отечественной проектной практики целесообразно предложить аналитические решения задач расчета звукоизоляции разнообразных одно- и многослойных конструкций, реализованные в виде программных модулей, которые можно интегрировать в технологии информационного моделирования (ТИМ) зданий. При использовании легких и многослойных ограждающих конструкций на звукоизоляцию существенно влияет структурная звукопередача по примыкающим конструкциям, снижая фактические индексы изоляции воздушного и ударного шума до 10 дБ. Поэтому расчет и проектирование звукоизоляции следует вести через моделирование потоков энергии звука и вибрации в рассматриваемом фрагменте здания, состоящем как минимум из двух смежных помещений. Для проектной практики актуальна разработка программного комплекса, который рассчитывает звукоизоляцию, уровни звука и вибрации по описанию конструктивных особенностей исследуемого характерного фрагмента здания и по заданным параметрам мощности источников. Создание программного комплекса для расчета уровней звука и вибрации в характерных фрагментах здания при заданных параметрах мощности источников и детальном описании особенностей конструктивной системы здания является актуальной задачей для проектной практики. Для практических целей можно предложить 3 уровня сложности виброакустических расчетов зданий: 1) расчет собственной звукоизолирующей способности одно- и многослойных конструкций; 2) расчет звукоизоляции одно- и многослойных конструкций с учетом косвенной и структурной звукопередачи через непосредственно примыкающие к ограждению конструкции; 3) расчет уровней звукового давления и параметров вибрации на конструкциях в фрагменте здания из нескольких помещений и ограждающих их конструкций.

Аналитические решения задачи расчета звукоизоляции впервые были представлены в работах Р. Бергера и Рэля. Л. Кремером [1] предложен механизм волнового совпадения. В более поздних работах в механизме прохождения звука через однослойную панель были выделены нерезонансная (инерционная) и резонансная звукопередачи за счет излучения свободных волн на резонансных частотах. В России двойная природа прохождения звука исследовалась М.С. Седовым и его учениками [2, 3, 4]. Теоретическую и методологическую основу расчета звукоизоляции однослойных конструкций за рубежом заложили труды Е. Сэвелла [5], Г. Майданика [6], Р. Жосса и Дж. Ламура [7]. На их базе были разработаны сначала европейские, а затем и российские нормативы, утвержденные в ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012¹ (ч. 1, прил. В). Данный стандарт обеспечивает удовлетворительную сходимость результатов расчета с лабораторными измерениями.

При определении резонансных и инерционных коэффициентов излучения звука конструкцией конечных размеров за рубежом используются также более сложные экспериментальные и аналитические результаты С. Уоллеса [8] и Ф. Леппингтона [9]. Звукоизоляцию двухслойных конструкций впервые описал А. Лондон [10], показав закономерности влияния воздушного промежутка на прохождение звука. В зарубежных программных комплексах используются формулы К. Гезеле [11] для расчета двойных конструкций с воздушным промежутком, они применяются и в более современных работах, хотя на практике неприемлемо завышают звукоизоляцию на высоких частотах [12]. Наиболее полное современное состояние теории прохождения звука через ограждающие конструкции и методологии расчета звукоизоляции различных типов конструкций представлены в книге Д. Риндела [13].

Расчетам распространения звука во фрагменте здания с учетом прямой и структурной звукопередачи посвящено множество научных трудов, однако в практике проектирования они до настоящего времени практически не используются. Родоначальником теории расчета структурной звукопередачи принято считать В. Вестфаля, впервые представившего конструктивную систему здания как совокупность связанных элементов, для которых можно записать уравнения баланса энергии изгибных волн с учетом потерь и передачи в смежные конструкции [14]. Из этой теории появились два методологических направления.

Первое – поточно-энергетический метод, который лег в основу методики В.И. Заборова [15], предназначенной для расчета звукоизоляции смежных помещений с учетом структурной звукопередачи, и методики расчета распространения звуковой вибрации на судах [16]. Зарубежные многочисленные исследования на основе поточно-энергетического метода реализованы в ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012. Ограничением данной методики является возможность расчета звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи только для двух смежных помещений. Такой расчет требует от проектировщика значительных трудозатрат и погружения в теорию виброакустики. Примером компьютерной реализации этой методики является программа Cadna B от Bastian.

¹ ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012. Акустика зданий. Методы расчёта акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 1. Звукоизоляция воздушного шума между помещениями. Москва: Стандартинформ, 2013. 78 с.

Второе направление реализовано в методе статистического энергетического анализа (СЭА), принципиально отличающееся от поточно-энергетического метода учетом только резонансной составляющей энергообмена между подсистемами, в качестве которых рассматриваются помещения и конструкции [17]. Расчет резонансной звукопередачи основан на определении числа и плотности мод колебаний. Коэффициенты энергетической связи между подсистемами определяются через отношения модальных плотностей в подсистемах, что уменьшает объем вычислений. В России данный подход использован в ряде наших последних работ [18, 19], за рубежом наиболее известны исследования в этом направлении Р. Крэйка [20] и К. Хопринса [21]. Основной проблемой СЭА является представление инерционной звукопередачи как дополнительного обходного пути прохождения звука в составе математической модели распространения звуковой энергии, что впервые было предложено М. Крокером и А. Прайсом [22] и используется до настоящего времени. В работе [23] предпринята попытка записать инерционную звукопередачу через импеданс возбуждаемой звуковым полем панели с учетом ее массы, изгибной жесткости и внутренних потерь, это дает возможность математической записи инерционной и резонансной звукопередачи непосредственно между связанными элементами здания в уравнениях баланса звуковой энергии.

Аналитические решения задачи прямого прохождения звука через ограждения

В современных зданиях применяются не только однослойные массивные ограждающие конструкции, но и легкие многослойные: двухветвевые перегородки из легкобетонных материалов, легкобетонные ограждения с дополнительной обшивкой листовыми материалами и без них, каркасно-обшивные перегородки, перекрытия с «плавающими» полами и подвесными звукоизолирующими потолками. Для разработки программы расчета изоляции воздушного шума можно представить типологию ограждающих конструкций по принципам вычислений в виде схемы (рис. 1). Как показано на схеме, наибольшее разнообразие решений характерно для конструкций стен и перекрытий. Это связано, в частности, с применением клееных деревянных конструкций (CLT), которые являются новыми для российской строительной практики. Их особенность заключается в малой плотности материала (550 кг/м^2), в 5 раз ниже плотности железобетона, и достаточно высоком модуле упругости вдоль волокон (6,2 ГПа [13]). Для обеспечения огнестойкости и звукоизоляции ограждений с несущими панелями CLT необходимы обшивки по вариантам. Новыми для российской практики являются и многослойные каркасно-обшивные конструкции.

Значительное количество вариантов возникает и для наружных светопрозрачных конструкций, в которых применяются остекления с использованием силикатных стекол и клееных триплексов. Обеспечение нормируемой теплозащиты достигается за счет применения двухкамерных стеклопакетов, а на территориях с низкими расчетными температурами целесообразно применение конструкций в раздельных переплетах с количеством стекол до 5. Увеличение числа стекол и воздушных промежутков с разной их толщиной позволяет достичь высокой звукоизоляции – до 50 дБ и выше.

Типология ограждающих конструкций по принципам расчета изоляции воздушного шума			
1. Внутренние вертикальные	2. Внутренние горизонтальные	3. Наружные светопрозрачные	4. Наружные глухие
1.1. Однослойные массивные	2.1. Однослойные массивные, в т. ч. пустотные и ребристые с жесткими или изоляционными покрытиями (ТЗИЛ)	3.1. Однослойные из силикатного стекла в переплетах (деревянных, пластиковых или металлических с двух-трех-контурным уплотнением)	4.1. Бетонные или кирпичные однослойные
1.2. Однослойные массивные с обшивками листовыми материалами с одной или двух сторон с воздушными промежутками или упругими слоями	2.2. Однослойные массивные с «плавающими» полами со сборной или монолитной стяжкой по упругому слою	3.2. Однокамерные стеклопакеты из силикатного стекла в одинарных переплетах	4.2. Трехслойные бетонные или кирпичные с внутренним слоем утеплителя
1.3. Двухветвевые массивные с воздушным промежутком или с упругим слоем	2.3. Однослойные массивные с обшивкой листовым материалом снизу с воздушным промежутком или заполнением упругим слоем	3.3. Двухкамерные стеклопакеты из силикатного стекла в одинарных переплетах	4.3. Бетонные или кирпичные с утеплением снаружи совмещенной фасадной системой с тонким слоем штукатурки
1.4. Деревянные клееные (CLT) без обшивок	2.4. Однослойные массивные с «плавающими» полами со сборной или монолитной стяжкой по упругому слою, с обшивкой листовым материалом снизу с воздушным промежутком или заполнением упругим слоем	3.4. Трехкамерные стеклопакеты из силикатного стекла в одинарных переплетах	4.4. Бетонные или кирпичные с утеплением снаружи вентилируемой фасадной системой с листовыми обшивками
1.5. Деревянные двухветвевые клееные или (CLT) с каркасом и без	2.5. Деревянные клееные (CLT) без обшивок	3.5. В раздельных переплетах со стеклом в наружном переплете и однокамерным стеклопакетом во внутреннем переплете	4.5. Легкие многослойные стены с внутренними и наружными обшивками из листовых материалов и слоем утеплителя
1.6. Деревянные клееные (CLT) с обшивками листовыми материалами с одной или двух сторон с воздушными промежутками или с упругими слоями	2.6. Деревянные клееные (CLT) с «плавающими» полами и различными вариантами обшивок	3.6. В раздельных переплетах со стеклом в наружном переплете и двухкамерным стеклопакетом во внутреннем переплете	
1.7. Каркасно-обшивные с количеством обшивок от 1 до 5 с воздушными промежутками или с упругими слоями	2.7. Легкие балочные с обшивками снизу и сверху с воздушным промежутком или с заполнением упругим слоем	3.7. В раздельных переплетах с однокамерным стеклопакетом в наружном переплете и однодвухкамерным стеклопакетом во внутреннем переплете	

Рис. 1. Типы ограждающих конструкций по принципам расчета звукоизоляции
 Fig. 1. Enclosing structures classified according to calculation principles of sound insulation

Современные наружные стены из легкогобетонных материалов с вентилируемыми или совмещенными фасадными системами также представляют интерес с точки зрения обеспечения звукоизоляции вследствие малой поверхностной массы несущей части конструкции и незначительного влияния на звукоизоляцию очень легкой и негерметичной фасадной системы.

В общем случае все типы наружных и внутренних конструкций сводятся к однослойным и многослойным с упругими слоями между панелями. Расчет звукоизоляции однослойных массивных и легких акустически однородных, сплошных и пустотных конструкций можно представить в виде последовательности процедур.

1. Первым расчетным элементом можно назвать блок расчета поверхностной массы и критической частоты ограждающей конструкции в зависимости от плотности, модуля упругости материала и с учетом конструкции ограждения. Для сплошных конструкций поверхностная масса определяется как произведение плотности материала на толщину $m = \gamma \cdot h$. Для пустотных конструкций (обычно перекрытий с круглыми или овальными пустотами) следует предварительно вычислить приведенную толщину, м:

$$h_{\text{пр}} = \frac{b \cdot h - \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}}{b}, \quad (1)$$

где b – ширина плиты перекрытия; h – толщина плиты перекрытия (плиты настила); d – диаметр пустот в плите перекрытия; n – количество пустот в плите перекрытия.

Для пустотных конструкций определим момент инерции, m^4 , для сечения конструкции. Так, для пустотных плит момент инерции

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{n \cdot \pi \cdot d^4}{64} \quad (2)$$

и изгибная жесткость $B = EJ$.

Получив эти результаты, определим критическую частоту, при которой длина изгибной волны совпадает со следом падающей звуковой волны из воздуха помещения (скорость изгибной волны в конструкции и скорость звука в воздухе равны), что приводит к увеличению амплитуды колебаний панели и снижению звукоизоляции:

$$f_c = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}, \quad (3)$$

где $c_o = 340$ м/с – скорость звука в воздухе.

Для массивных конструкций представляет интерес и частота вырождения волн чистого изгиба, на которой фазовая скорость распространения изгибных волн по элементарной теории равна фазовой скорости сдвиговых волн:

$$f_s = \frac{c_s^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}, \quad (4)$$

где c_s – скорость сдвиговой волны в материале конструкции.

2. Второй расчетный блок включает известные процедуры определения коэффициентов инерционной и резонансной звукопередачи для однослойной массивной или легкой ограждающей конструкции по методике ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 в расчетном частотном диапазоне от 100 до 3150 Гц. Для этой цели вычисляются коэффициенты излучения вынужденных волн [5]:

$$\sigma_f = 0,5 \left[\ln \left(\frac{2\pi f}{c_o} \sqrt{a \cdot b} \right) - \Lambda \right], \quad (5)$$

где $\Lambda = -0,964 - \left(0,5 + \frac{b}{\pi a} \right) \ln \frac{b}{a} + \frac{5b}{2\pi a} - \frac{c_o^2}{16a \cdot b \cdot \pi^3 \cdot f^2},$

где a и b – размеры ограждающей конструкции.

Необходимо определить также коэффициенты излучения свободных волн [6].

На частотах выше критической частоты

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \leq 2,0; \quad f > f_c. \quad (6)$$

В полосе критической частоты

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{a}{\lambda_{bc}}} + \sqrt{\frac{b}{\lambda_{bc}}} \leq 2,0; \quad f = f_c, \quad (7)$$

где $\lambda_{bc} = \frac{\pi \cdot h \cdot c_l}{\sqrt{3} \cdot c_o}$ – длина изгибной волны в панели на критической частоте.

На частотах ниже критической

$$\sigma_r = \frac{4c_o}{f_c} \delta_1 + \delta_2; \quad f < f_c, \quad (8)$$

где $\delta_1 = \frac{(1 - \lambda^2) \ln \left(\frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \right) + 2\lambda}{4\pi^2 (1 - \lambda^2)^{1,5}};$ (9)

$$\delta_2 = \frac{8c_o^2 (1 - 2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 a \cdot b \cdot \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}}, \quad f < \frac{1}{2} f_c; \quad (10)$$

$$\delta_2 = 0; \quad f > \frac{1}{2} f_c. \quad (11)$$

По коэффициентам излучения вычисляются коэффициенты инерционного прохождения звука однослойной конструкции:

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} 2\sigma_f; \quad f < f_c; \quad (12)$$

$$\tau_f = 0; \quad f \geq f_c, \quad (13)$$

а также коэффициенты резонансного прохождения звука в диапазонах:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \frac{f_c}{f} \frac{\pi \cdot \sigma_r^2}{2\eta_{tot}}; \quad f > f_c; \quad (14)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \frac{\pi \cdot \sigma_r^2}{2\eta_{tot}}; \quad f = f_c; \quad (15)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \frac{(a+b)^2}{a^2 + b^2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma_r^2}{\eta_{tot}}; \quad f < f_c. \quad (16)$$

Суммируя коэффициенты инерционного и резонансного прохождения, в каждой третьоктавной полосе частот определим звукоизоляцию:

$$R = -10 \lg(\tau_f + \tau_r). \quad (17)$$

3. В многослойных конструкциях с воздушными промежутками, упругими слоями и виброподвесами возникают резонансы типа «масса – упругость – масса» [24, 25, 26].

Для двойных ограждений с воздушным промежутком резонансная частота

$$f_o = 60 \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{d \cdot m_1 \cdot m_2}}, \quad (18)$$

где d – толщина воздушного промежутка; m_1 и m_2 – поверхностные массы панелей (обшивок, листов).

Для двойных ограждений с упругим слоем резонансная частота

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}}, \quad (19)$$

где $k = \frac{E_d}{d}$ – динамическая жесткость упругого слоя; E_d – динамический модуль упругости материала упругого слоя.

Для конструкций из трех панелей с воздушными промежутками имеем 2 резонансные частоты:

$$f_1 = 60 \sqrt{\frac{a + b - \sqrt{(a-b)^2 + 4 \frac{m_1^2 m_3^2}{d_1 d_2}}}{2m_1 m_2 m_3}}; \quad (20)$$

$$f_2 = 60 \sqrt{\frac{a + b + \sqrt{(a-b)^2 + 4 \frac{m_1^2 m_3^2}{d_1 d_2}}}{2m_1 m_2 m_3}}, \quad (21)$$

где $a = \frac{m_3(m_1 + m_2)}{d_1}$; $b = \frac{m_1(m_2 + m_3)}{d_2}$; m_1 , m_2 , m_3 – поверхностные массы панелей; d_1 , d_2 – толщины воздушных промежутков.

Для тройных ограждений с упругими слоями резонансные частоты

$$f_{1,2} = 60 \sqrt{\frac{a + b \pm \sqrt{(a - b)^2 + 4k_1 k_2 m_1^2 m_3^2}}{2m_1 m_2 m_3}}, \quad (22)$$

где $a = k_1 m_3 (m_1 + m_2)$; $b = k_2 m_1 (m_2 + m_3)$; k_1, k_2 – динамические жесткости упругих слоев.

Для конструкций из четырех панелей с тремя упругими слоями или воздушными промежутками резонансные частоты вычисляются из решения кубического уравнения относительно циклической частоты относительно ω^2 [25, 26]:

$$(\omega^2)^3 + b(\omega^2)^2 + c(\omega^2) + d = 0, \quad (23)$$

где

$$b = -\left(\frac{k_1 + k_2}{m_2} + \frac{k_2 + k_3}{m_3} + \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_3}{m_3}\right);$$

$$c = \left(\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{m_2 m_3} + \frac{k_1 k_3 + k_2 k_3}{m_2 m_4} + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3}{m_1 m_3} + \frac{k_2 k_3}{m_3 \cdot m_4} + \frac{k_1 k_3}{m_1 m_4} + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}\right);$$

$$d = -k_1 k_2 k_3 \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{m_1 m_2 m_3 m_4},$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 – поверхностные массы панелей; k_1, k_2, k_3 – динамические жесткости упругих слоев.

Решение данного кубического уравнения может быть найдено по формулам Кардано, однако более простым является численное определение собственных частот f_1, f_2, f_3 . Для конструкции с воздушными промежутками динамическая жесткость воздушного промежутка определяется его толщиной:

$$k_{en} = \frac{E_e}{d} = \frac{\rho_0 c_0^2}{d} = \frac{1,225 \cdot 340^2}{d} = \frac{14 \cdot 10^4}{d}.$$

Для конструкций из пяти панелей с четырьмя упругими слоями могут быть найдены четыре резонансные частоты «масса – упругость – масса» f_1, f_2, f_3, f_4 из численного решения уравнения четвертого порядка относительно ω^2 [25, 26]:

$$(k_1 + k_3 - m_3 \omega^2) a \cdot b \cdot k_1 \cdot k_4 - (k_1 - m_1 \omega^2) b \cdot k_2^2 \cdot k_4 - (k_4 - m_5 \omega^2) a \cdot k_1 \cdot k_3^2 = 0, \quad (24)$$

где $a = (k_1 + k_2 - m_2 \omega^2) \frac{k_1 - m_1 \omega^2}{k_1} - k_1$; $b = (k_3 + k_4 - m_4 \omega^2) \frac{k_4 - m_5 \omega^2}{k_4} - k_4$,

где m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 – поверхностные массы панелей; k_1, k_2, k_3, k_4 – динамические жесткости упругих слоев.

В наших последних работах [24, 25, 26] показаны аналитические и численные решения задачи определения резонансных частот на примере многослойных светопрозрачных конструкций.

4. Расчет звукоизоляции многослойной конструкции ведется через определение инерционных τ_f и резонансных τ_r коэффициентов прохождения звука через многослойную конструкцию с учетом резонансных частот «масса – упругость – масса». Следует отметить, что для конструкций с большим количеством слоев наибольшее значение для звукоизоляции имеет первая резонансная частота «масса – упругость – масса». Имеет значение и жесткость элементов каркаса или подвесов, соединяющих конструктивные слои. Если она меньше или сопоставима с жесткостью упругого слоя или воздуха, то влиянием подвесов можно пренебречь, но если жесткость подвесов значительно выше, то следует вычислять также коэффициенты прохождения энергии изгибных волн из панели в панель через элемент каркаса τ_k .

Звукоизоляция многослойной конструкции с учетом передачи звука через каркас находится следующим образом: $R = -10 \lg(\tau_f + \tau_r + \tau_k)$.

Инерционные коэффициенты прохождения через многослойные конструкции вычисляются в третьоктавных полосах в частотных поддиапазонах.

1. Область резонансов типа «масса – упругость – масса».

2. Область выше резонансной частоты начинается:

а) для конструкций с двумя панелями и упругим слоем – с полосы, расположенной на треть октавы выше резонансной частоты f_0 ;

б) для конструкций с тремя панелями и двумя упругими слоями – на треть октавы выше второй резонансной частоты f_2 ;

в) для конструкций с 4–5 панелями и упругими слоями между ними – на треть октавы выше среднегеометрической частоты резонансов $f_{cr} = \sqrt[3]{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3}$ или $f_{cr} = \sqrt[4]{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4}$.

Для тонких конструкций данная область распространяется до критической частоты панели, обращенной в изолируемое помещение.

Резонансные коэффициенты прохождения вычисляются в 3 поддиапазонах:

– область ниже критической частоты $f < f_c$;

– область критической частоты $f = f_c$;

– область выше критической частоты $f > f_c$.

Значения коэффициентов прохождения могут вычисляться по формулам, приведенным в работах [24, 25], с учетом коэффициентов общих потерь в конструкциях η_{tot} , которые по измерениям времени структурной реверберации имеют значения от 0,02 (при интенсивном оттоке энергии в примыкающие конструкции) до 0,001 (потери собственно в конструкционном материале).

Итогом предыдущих вычислений являлось определение звукоизолирующей способности одно- и многослойной конструкции без учета косвенной (по воздушным путям) или структурной звукопередачи по примыкающим конструкциям.

Модели прохождения звука через ограждения с учетом косвенной и структурной звукопередачи

Расчет звукоизоляции с учетом косвенной звукопередачи по воздушным каналам требует предварительно полученных частотных характеристик приве-

денной разности уровней звукового давления D_n по ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012². Воздушный канал может представлять собой щели в притворах дверей, отверстия в стене, воздуховоды, воздухообменные устройства и рассматривается как «малый технический элемент» малой площади, акустические характеристики которого зависят от целого ряда параметров, связанных с формой, размерами и материалами. Для некоторых простейших «малых технических элементов» звукоизоляция воздушного канала может быть рассчитана, но для более сложных воздушных каналов она должна быть измерена в реверберационных камерах, в проеме между которыми имеется стена с высокой звукоизоляцией и с исследуемым элементом косвенной звукопередачи. Звукоизоляция ограждающей конструкции с воздушным каналом будет равна

$$R_{w(OK+BK)} = 10 \lg \frac{S_{OK}}{\frac{S_{OK}}{10^{0,1R_{WOK}}} + 10^{(1-0,1D_{mv})}}, \quad (25)$$

где $R_{w(OK+BK)}$ – звукоизоляция ограждающей конструкции с малым техническим элементом (воздушным каналом); R_{WOK} – звукоизоляция глухой ограждающей конструкции без воздушных каналов.

Пример влияния воздушного канала (воздухообменного устройства) на звукоизоляцию ограждения показан в работе [27]: отверстие диаметром 125 мм в стене, начиная с частот 250 Гц, снижает звукоизоляцию, и это снижение составляет до 18 дБ на частоте 3150 Гц. При формировании программного комплекса для расчетов звукоизоляции нужно создать отдельный блок вычисления приведенной разности уровней звукового давления D_n и суммарной звукоизоляции ограждения, а также базу данных по звукоизоляционным характеристикам наиболее широко распространенных воздушных каналов в гражданских зданиях.

Расчет звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи представляет собой более сложную задачу, поскольку включает в себя расчеты параметров передачи энергии звуковой вибрации между связанными панелями. В общем виде в строительных конструкциях распространяются изгибные, продольные и сдвиговые волны, которые преобразуются друг в друга в каждом стыке. Однако в фрагменте здания, состоящем из двух помещений и 11 ограждающих их конструкций, влиянием продольных и сдвиговых волн можно пренебречь и учитывать только изгибные колебания конструкций. Данная задача может быть решена с использованием методики ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012, а в качестве расчетной модели может быть использована схема ниже (рис. 2).

В этой схеме есть 2 помещения и 11 панелей, разделительным элементом является панель 6, исключается энергетический обмен с панелями 1 и 11, нет и энергетического обмена боковых конструкций между собой в одном помещении. Панель 6 может иметь плавающие полы и/или звукоизолирующие потолки с дополнительной звукоизоляцией $\Delta R_{6,1}$ и $\Delta R_{6,2}$ к звукоизоляции несущей панели $R_{6,0}$. Каждая примыкающая конструкция имеет звукоизоляцию: R_i в по-

² ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012. Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума. Москва : Стандартинформ, 2013. 21 с.

мещении с источником звука и R_j – в изолируемом помещении. Звукоизоляция конструкции b с учетом структурной звукопередачи может быть вычислена следующим образом:

$$R' = -10 \lg \left[10^{-0,1R_6} + \sum_{i=2}^5 \left[10^{-0,1R_{i,6}} + 10^{-0,1R_{6,j}} + 10^{-0,1R_{i,j}} \right] \right], \quad (26)$$

где $R_6 = R_{6,0} + \Delta R_{6,1} + \Delta R_{6,2}$ – звукоизоляция разделительного элемента (стены, перекрытия) с дополнительными слоями; $R_{i,j}$ – изоляция структурной звукопередачи по трем основным путям прохождения звуковой вибрации.

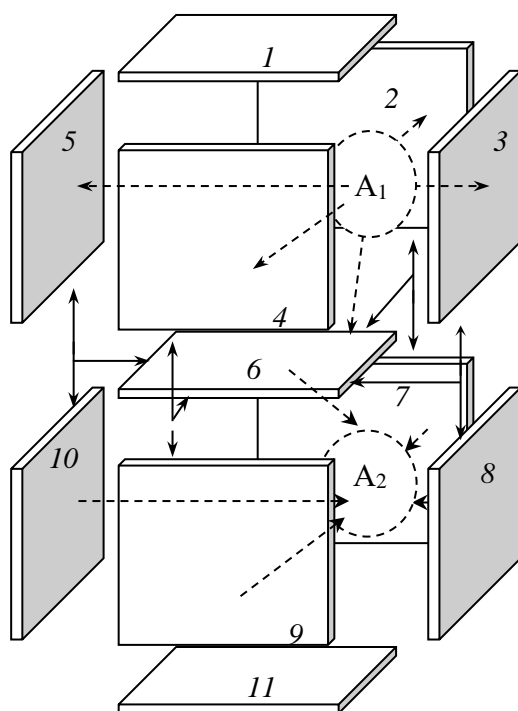


Рис. 2. Модель прямой и структурной звукопередачи между двумя помещениями по ГОСТ Р EN 12354-1-2012

Fig. 2. Schematic of direct and structured sound transmission between two rooms according to GOST R EN 12354-1-2012

В формуле (26) $j = i + 4$. Для всех примыкающих конструкций звукоизоляция несущих панелей R_i обозначена с индексами $i = 2, 3, 4, 5$ в верхнем помещении с источником звука и R_j с индексами $j = 7, 8, 9, 10$ в изолируемом нижнем помещении. Звукоизоляция этих примыкающих конструкций также может быть усилена дополнительными слоями ΔR_i и ΔR_j .

Изоляция структурной звукопередачи стыками конструкций определяется по формуле

$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \Delta R_i + \frac{R_j}{2} + \Delta R_j + K_{ij} - 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} + 10 \lg \frac{S_6}{\sqrt{S_i S_j}}, \quad (27)$$

где K_{ij} – индекс снижения вибрации; l_{ij} – длина стыка между конструкциями i и j .

$$a = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_o T_{si}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \approx \frac{2S_i}{T_{si} \sqrt{f}}, \quad (28)$$

где a – эквивалентная длина поглощения конструкций i или j ; S – площадь конструкции i или j ; T_{si} – время структурной реверберации i конструкции.

Индексы снижения вибрации K_{ij} соединений конструкций определяют в соответствии с ГОСТ Р ИСО 10848-1–2012³ в лабораторных условиях. Индекс K_{ij} для стыков однородных панелей может быть вычислен через коэффициент прохождения энергии изгибной волны τ_{ij} :

$$K_{ij} = -10 \lg \tau_{ij} - 15 \lg f_{ci} = -10 \lg \tau_{ji} - 15 \lg f_{cj}, \quad (29)$$

где f_c – критическая частота конструкций i или j .

Для ряда стыков наиболее широко применяемых конструкций в ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 (прил. Е) они даны в виде эмпирических формул в зависимости от отношения поверхностных масс сопрягаемых элементов и конфигурации стыков. Характеристики изоляции дополнительными слоями (обшивками) ΔR_i могут быть определены по прил. D в зависимости от резонансной частоты «масса – упругость – масса» и собственной звукоизоляции несущей конструкции.

Методика ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 схожа с методикой расчета звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи В.И. Заборова [15], и с ее помощью с некоторым приближением могут быть определены и уровни звукового давления в приемном помещении при заданных уровнях шума в помещении с источником.

Расчеты уровней звукового давления в смежном и удаленном помещении и виброускорений на панелях могут быть выполнены с использованием модели, построенной на методе статистического энергетического анализа (СЭА). Каждая конструкция и помещение рассматриваются как подсистема, имеющая достаточно большое количество собственных форм колебаний в рассматриваемой полосе частот, энергообмен между подсистемами может быть записан в виде уравнений энергетического баланса с учетом перетока энергии между подсистемами и преобразования в стыках изгибных, продольных и сдвиговых волн. В качестве расчетной модели наибольший интерес представляет фрагмент здания из 3 помещений и 16 ограждающих их панелей (рис. 3).

В расчетной модели фрагмента здания каждая панель представляет собой 3 подсистемы с энергией изгибных, продольных и сдвиговых волн. Каждое по-

³ ГОСТ Р ИСО 10848-1–2012. Акустика. Лабораторные измерения косвенной передачи воздушного и ударного шума между смежными помещениями. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2013. 36 с.

мещение – это подсистема, также имеющая спектр собственных колебаний звуковых волн в воздухе. Источники звука могут вносить энергию в любую подсистему-помещение. Источники вибрации могут вносить энергию в подсистемы изгибных колебаний панелей. В некотором приближении можно упростить систему, оставив в ней только подсистемы изгибных колебаний панелей, однако такое упрощение возможно только для фрагмента из двух помещений и 11 панелей, при увеличении расчетного фрагмента существенное влияние на энергетический баланс оказывают сдвиговые и продольные волны.

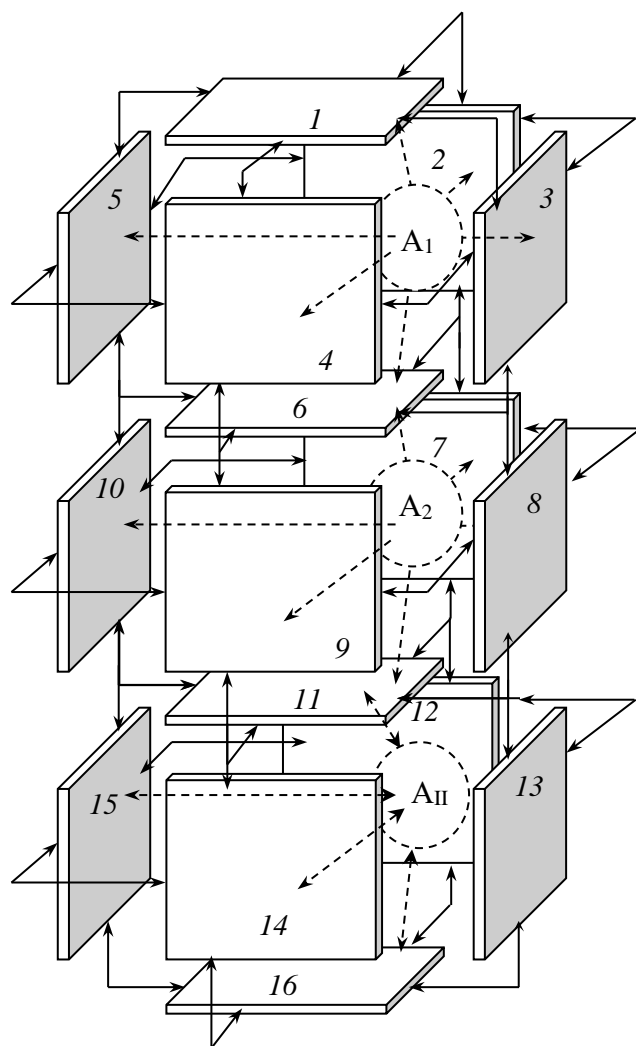


Рис. 3. Расчетная схема фрагмента здания, состоящего из 3 помещений и ограждающих их 16 панелей по методу СЭА

Fig. 3. Calculation diagram of a building fragment consisting of 3 rooms and 16 enclosing panels using statistical energy-dispersive analysis

Квазипродольные и сдвиговые волны в массивных конструкциях также имеют существенное значение в связи с их вкладом в излучение звука в поме-

щение на высоких частотах. В классическом варианте СЭА энергетический обмен между помещениями и конструкциями рассматривается только для резонансных форм колебаний конструкций, а вынужденная (нерезонансная) звукопередача представляется непосредственной энергетической связью между смежными помещениями [20, 21, 22]. В зданиях с массивными ограждениями нерезонансная звукопередача влияет на результаты расчета только в области низких частот, и ею в какой-то мере можно пренебречь, но если конструкции легкие со значениями критической частоты в области высоких частот, то нерезонансная звукопередача существенно снижает звукоизоляцию практически во всем диапазоне частот.

В уравнениях энергетического баланса учесть нерезонансную звукопередачу можно, разложив коэффициенты энергетической связи на инерционные и резонансные, например, между помещением и панелью $\eta_{k,i} = \eta_{k,i}^f + \eta_{k,i}^r$ или от панели к помещению $\eta_{i,k} = \eta_{i,k}^f + \eta_{i,k}^r$. Коэффициенты резонансной энергетической связи между помещениями и панелями можно записать известными формулами через коэффициенты излучения свободных волн [22].

От панели i к помещению k

$$\eta_{i,k}^r = \frac{\rho \cdot c}{2\pi \cdot f \cdot m_i} \sigma_i^r, \quad (30)$$

и, наоборот, коэффициент резонансной энергетической связи от помещения k к панели i получим, используя соотношение

$$\eta_{k,i}^r = \eta_{i,k}^r \frac{n_i}{n_k}, \quad (31)$$

где n_i и n_k – плотности мод собственных колебаний связанных элементов системы соответственно панелей и помещений; $\eta_{i,k}^r$ и $\eta_{k,i}^r$ – резонансные коэффициенты энергетической связи от панели к помещению и, наоборот, от помещения к панели.

Плотности мод колебаний в единичной полосе круговых частот в панели

$$n_i = \frac{S_i \cdot f_{ci}}{2c_o^2} \quad (32)$$

и в объеме помещения

$$n_k = \frac{2f^2 \cdot V_k}{c_o^3}. \quad (33)$$

Тогда коэффициент резонансной связи от помещения к панели

$$\eta_{k,i}^r = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_i \cdot f_{ci}}{8\pi \cdot f^3 \cdot m_i \cdot V_k} \sigma_i^r.$$

Коэффициент нерезонансной энергетической связи от панели к помещению определяется в зависимости от коэффициента излучения вынужденных волн [23]:

$$\eta_{i,k}^f = \frac{\rho \cdot c_o}{2\pi \cdot f \cdot m_i} \sigma_i^f. \quad (34)$$

Нерезонансный коэффициент энергетической связи от помещения к панели вычислим через импеданс изгибных колебаний панели [23]:

$$\eta_{k,i}^f = \frac{2\rho \cdot c_o^2 \cdot m_i \cdot S_i}{|Z_{wi}|^2 V_k} \eta_i, \quad (35)$$

где импеданс панели определим с учетом циклической частоты, изгибной жесткости, поверхностной массы и коэффициента потерь панели [13]:

$$|Z_{wi}|^2 = \left((1 + \eta_i) m_i \cdot \omega + \frac{B_i}{\omega} \left(\frac{\omega}{c} \right)^4 \right)^2. \quad (36)$$

Коэффициенты энергетической связи между подсистемами изгибных, продольных и сдвиговых колебаний панелей определим по формулам [18]:

$$\eta_{ij}^{bm} = \frac{2}{\pi} \frac{L_{ij}}{S_i} \frac{\tau_{ij}^{bm}}{k_{bi}}; \quad (37)$$

$$\eta_{ij}^{lm} = \frac{1}{\pi} \frac{L_{ij}}{S_i} \frac{\tau_{ij}^{lm}}{k_{li}}; \quad (38)$$

$$\eta_{ij}^{sm} = \frac{1}{\pi} \frac{L_{ij}}{S_i} \frac{\tau_{ij}^{sm}}{k_{si}}, \quad (39)$$

где $m = b, l, s$ – индекс, указывающий на тип прошедшей или отраженной волны; L_{ij} – длина стыка между i -й и j -й панелями; $\tau_{ij}^{bm}, \tau_{ij}^{lm}, \tau_{ij}^{sm}$ – соответственно средние по углу падения коэффициенты прохождения энергии падающих изгибных, продольных и сдвиговых волн в энергию типа « m », определяемые из расчета виброизоляции стыков [18]; k_{bi}, k_{li}, k_{si} – волновые числа изгибной, продольной и сдвиговой волн в i -й панели.

Как можно обнаружить, коэффициенты энергетической связи между панелями не нужно делить на инерционные и резонансные составляющие, однако в расчетах следует избегать использование соотношения плотностей мод колебаний вида (31), предназначенного только для резонансных форм колебаний. Вычислять коэффициенты энергетической связи будем только по формулам (37) – (39) для соответствующих пар конструкций.

Вычислив значения коэффициентов энергетической связи для фрагмента здания из 3 помещений и 16 панелей (рис. 2), можем сформировать уравнения энергетического баланса для каждого элемента. Всего получим систему из 51 линейного алгебраического уравнения, вид которых дан в монографии [18]. Решение системы уравнений при заданной мощности источников звука и/или вибрации относительно неизвестных значений звуковой энергии в помещении E_k^A и энергии изгибных E_i^b , продольных E_i^l и сдвиговых E_i^s волн в панелях в пределах частот позволит определить уровни звукового давления в помещениях:

$$L_k = 10 \lg \frac{E_k^A \cdot c_o}{I_o \cdot V_k}, \quad (40)$$

где $I_o = 10^{-12}$ Вт/м² – пороговое значение интенсивности,

Можно также определить среднеквадратическое значение виброускорения на панелях:

$$a_i^2 = \frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n} = \frac{\omega^2 \cdot E_i^b}{\rho_i \cdot h_i \cdot S_i}. \quad (41)$$

Общий алгоритм расчета звукоизоляции, уровней звукового давления в помещениях и виброускорений на панелях

Для многих задач обоснования проектных решений является достаточным расчет индексов изоляции воздушного шума в зависимости от конструктивного исполнения ограждения. В помощь проектировщику нужна достаточно простая компьютерная программа 1-го уровня сложности, которая включает в себя 4 блока.

1. Описания типа ограждающей конструкции (рис. 1), геометрических и физических параметров конструктивных элементов, что целесообразно совместить с выбором из меню характеристик имеющихся на рынке материалов.

2. Расчеты поверхностных масс панелей в составе конструкции и резонансных частот: критической частоты панелей, частот «масса – упругость – масса».

3. Расчеты коэффициентов излучения вынужденных и свободных волн, определение коэффициентов инерционного и резонансного прохождения звука через конструкции в зависимости от их типа.

4. Вычисление индексов изоляции воздушного шума R_w или $R_{Атран}$ с учетом приведения к оценочным частотным характеристикам.

В ряде случаев возникает необходимость определить звукоизоляцию ограждающей конструкции, разделяющей два смежных помещения, с учетом косвенной и/или структурной звукопередачи. Эта необходимость возникает в случае устройства легких, в том числе многослойных, перегородок по монолитной плите перекрытия и в случае, если примыкающие ограждающие конструкции значительно отличаются по поверхностной массе.

Алгоритм расчета 2-го уровня сложности включает в себя ряд шагов.

1. Описание типов ограждающих конструкций, составляющих расчетную модель на рис. 1, геометрических и физических параметров конструктивных элементов каждого ограждения.

2. Расчеты звукоизоляции самой ограждающей конструкции и примыкающих к ней конструкций со стороны помещения с источником звука и смежного помещения. Если конструкции многослойные, то для упрощения задачи вычисляются частотные значения звукоизоляции несущих однородных панелей и величины усиления звукоизоляции дополнительными слоями ΔR_i .

3. Расчеты звукоизоляции ограждающей конструкции с учетом косвенной звукопередачи по воздушным путям.

4. Расчеты индексов снижения вибрации между панелями K_{ij} и значений звукоизоляции по путям передачи звука через стыки конструкций R_{ij} .

5. Расчет звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи R' по формуле (26).

6. Вычисление индекса изоляции воздушного шума с учетом структурной звукопередачи R'_w .

В случае если в здании находятся помещения с высокими уровнями звука или имеется виброактивное оборудование, передающее возбуждение изгибных колебаний на одно или несколько ограждений, то необходимо выполнить вычисления уровней звукового давления не только в смежном, но и в удаленном помещении. Для этой цели применяется алгоритм 3-го уровня сложности с использованием методологии СЭА по схеме на рис. 3.

1. Описание расчетного фрагмента здания (рис. 3): геометрических и акустических параметров помещений, геометрических параметров конструкций и их физических характеристик. Описание конструктивного исполнения стыков, их геометрии и характеристик материалов заполнения стыков. Описание конструкций целесообразно из вариантов типовых решений. Задание мощностей источников звука и вибрации.

2. Расчеты коэффициентов прохождения волн трех типов через стыки конструкций τ_{ij}^{bm} , τ_{ij}^{lm} , τ_{ij}^{sm} с учетом их преобразования, вычисление коэффициентов энергетической связи между конструкциями.

3. Расчеты коэффициентов инерционной и резонансной энергетической связи между помещениями и конструкциями.

4. Построение матриц системы уравнений энергетического баланса для 3 помещений и 16 конструкций, решение системы уравнений в октавных или третьоктавных полосах частот относительно неизвестных значений энергии в подсистемах.

5. Вычисление уровней звукового давления в помещениях и виброускорений на панелях.

Общий алгоритм расчета звукоизоляции и уровней шума и вибрации формирует расчетные блоки программного комплекса. Для его практического использования потребуется тестирование по результатам измерений на различных конструкциях в лабораторных и натурных условиях.

Общая схема организации программных компонентов

Проектируемый программный комплекс для решения поставленных задач вычисления звукоизолирующей способности, фактической звукоизоляции и уровней звука и вибрации представляет собой совокупность модулей, предполагающих акцент на подготовку исходных данных, предобработку и вывод итоговой расчетной модели. Исходя из поставленной задачи разработать программное решение с низким порогом входа было принято решение разделить разрабатываемое средство моделирования на два базовых модуля: визуальный конструктор сцены, предоставляющий простой и наглядный способ конфигурирования исходных параметров модели, и сервер расчетов, способный в режиме пакетной обработки обслуживать множество запросов от пользователей.

Архитектурно данное решение можно свести к классической модели клиент-серверного взаимодействия, где тонкий клиент, выполненный в виде веб-

приложения, позволяет специалисту визуально задать характеристики фрагмента здания. Клиент, представленный визуальным конструктором, взаимодействует с сервером расчетов посредством http-запросов через набор публичных АПИ (интерфейс программирования приложений – Application Programming Interface), предоставляющих доступ к формированию, запуску и отслеживанию результатов выполнения расчетных задач. Такая модель позволяет выстроить очередь исполнения для равномерного разделения вычислительных ресурсов между множеством пользователей.

Визуальный конструктор разработан в виде приложения Vue/Vite и доступен в браузере пользователя. В основе блока рендера используется библиотека tree.js, что предоставляет пользователю различные режимы 3D-визуализации и дает возможность оценить конфигурацию на соответствие целевой задаче. После периода первоначальной загрузки исходного кода конструктор автоматически запускается и предоставляет пользователю интерактивный интерфейс для внесения размеров и прочих характеристик фрагмента здания для модели расчета. По готовности пользователь инициирует отправку расчетной задачи на сервер посредством АПИ-вызова, что позволяет запустить расчетный модуль и получить уведомление о готовности результатов.

Ключевой особенностью визуального конструктора является параметрическая модель, позволяющая задать размеры двух смежных комнат, характеристики перекрытий и ограждающих конструкций.

Интерфейс конфигуратора позволяет задать исходные размеры и общие параметры панелей. В зависимости от исследуемой модели может быть выбрана конфигурация с едиными монолитными панелями или вариант с отдельными панелями, разделенными прокладкой. В предлагаемой параметрической панели для модели из двух помещений присутствуют 11 панелей и 26 упругих прокладок между ними. В зависимости от поставленной задачи число прокладок может меняться. Так, в случае с монолитной плитой будут отсутствовать прокладки между двумя верхними и двумя нижними панелями.

Вариант визуализации фрагмента здания из двух помещений с монолитными перекрытиями представлен на рис. 3.

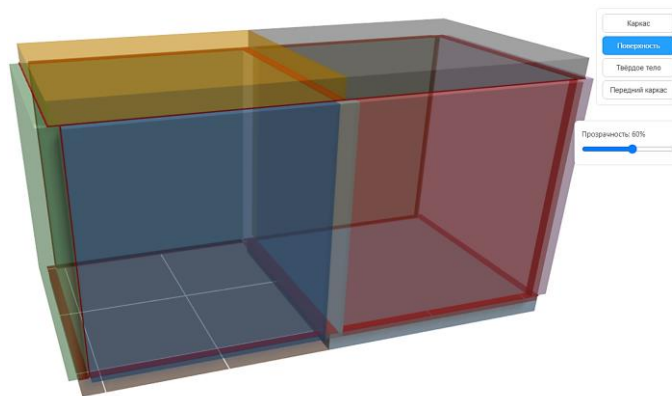


Рис. 3. Визуализация смежных помещений в режиме 60 % прозрачности
Fig. 3. Adjacent rooms visualized in 60% transparency mode

Параметрическая панель инструментов позволяет задавать общие геометрические характеристики для смежных помещений в рамках исследуемого фрагмента здания. Выбор конкретной панели для настройки ее геометрических и невизуальных свойств осуществляется с помощью мыши. При этом для трехмерной визуализации автоматически выбирается передняя панель (расположенная ближе всего к камере).

Чтобы настроить стык между панелями, необходимо последовательно выбрать две смежные панели. Это действие открывает доступ к панели параметров, где можно задать жесткость упругих элементов в стыке.

Сервер расчетов представляет собой приложение на языке Python 3, использующее библиотеку FastAPI для предоставления публичного АПИ в соответствии с концепцией REST. Генерация графиков для визуализации использует библиотеку matplotlib, а для вывода табличных данных применяется библиотека prettytable. Расчетный модуль также написан на языке Python 3 и осуществляет математическое моделирование для одиночной расчетной задачи благодаря библиотекам математических структур и алгоритмов numpy и scipy. Поскольку расчетный модуль выполнен отдельным компонентом, предполагается запуск множества отдельных экземпляров и использование очереди задач для получения исходных параметров модели и возврата результата. Таким образом, один экземпляр сервера АПИ и пул расчетных модулей может обслуживать запросы множества пользователей.

В начале работы пользователь открывает страницу сервиса и загружает в браузер веб-приложение – визуальный конструктор. После определения геометрических и невизуальных параметров модели пользователь может инициировать запуск расчетов, а по готовности получить уведомление и результаты расчетов, оформленные в виде таблиц и графиков. Для удобства пользователя результаты работы могут быть экспортированы в формате PDF.

Заключение

Для практики проектирования звукоизоляции в зданиях целесообразно создание программного комплекса, который предусматривает 3 уровня сложности задач в зависимости от конструктивной схемы здания, типа ограждающих конструкций и наличия мощных источников звука и вибрации, воздействие которых может приводить к высоким уровням звука и вибрации в смежных и удаленных помещениях.

В составе программного комплекса разработан ряд алгоритмов для решения следующих задач:

- а) определение собственной звукоизолирующей способности одно- и многослойных ограждений;
- б) расчет звукоизоляции с учетом косвенной и структурной передачи звука в смежное помещение;
- в) расчет параметров прохождения волн трех типов через стыки строительных конструкций, формирование расчетных матриц и вычисление уровней звука и вибрации в смежных и удаленных помещениях с учётом инерционной и резонансной звукопередачи.

Тестирование отдельных блоков и программного комплекса в целом по результатам измерений для конкретных конструкций и планировочных решений в перспективе позволит вывести этот продукт на рынок проектной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cremer L.* Theorie der Schall dämmung dünner Wände bei Schrägen Einfall // *Akustische Zeitschrift*. 1942. № 7. S. 81–104.
2. *Седов М.С.* Звукоизоляция тонких однослойных пластин ограниченных размеров // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1964. № 5. С. 130–134.
3. *Седов М.С.* Звукоизоляция // *Техническая акустика транспортных машин*. Санкт-Петербург : Политехника, 1992. С. 68–106.
4. *Бобылев В.Н., Тишков В.А., Монич Д.В.* Изоляция воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. 67 с. ISBN 978-5-528-00004-6.
5. *Sewell E.C.* Transmission of Reverberant Sound through a Single-Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle // *J. of Sound and Vibration*. 1970. V. 12. P. 21–32.
6. *Maidanik G.* Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields // *J. of the Acoustical Society of America*. 1962. V. 34. P. 809–826.
7. *Josse R., Lamure J.* Transmission du son par une paroi simple // *Acustica*. 1964. P. 266–280.
8. *Wallace C.E.* Radiation resistance of rectangular plate // *J. of the Acoustical Society of America*. 1972. V. 51. P. 946–952.
9. *Leppington F.G., Broadbent E.G., Heron K.H.* The acoustic radiation efficiency of rectangular panels // *Proceedings of the Royal Society of London*, A382. 1982. P. 45–71.
10. *London A.* Transmission of reverberant sound through double walls // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1950. V. 22. P. 270–279.
11. *Gosele K.* Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen // *Acustica*. 1980. № 45. S. 208.
12. *Kurra S.* Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements // *Applied Acoustics*. 2012. V. 73. P. 575–589.
13. *Rindel J.H.* Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis Group, LLC., 2018. 476 p. DOI: 10.1201/9781351228206
14. *Westphal W.* Ausbreitung vor Körperschall in Gebäuden // *Acustica*. 1957. V. 7. S. 335–348.
15. *Заборов В.И.* Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. Москва : Стройиздат, 1969. 185 с.
16. *Бородицкий Л.С., Спиридонов В.М.* Снижение структурного шума в судовых помещениях. Ленинград : Судостроение, 1974. 221 с.
17. *Lyon R.H., Maidanik G.* Power flow between linearly coupled oscillators // *J. of the Acoustical Society of America*. 1962. V. 34. № 5. P. 623–639.
18. *Овсянников С.Н.* Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2000. 378 с.
19. *Овсянников С.Н., Лелюга О.В.* Основные принципы расчета звукопередачи в зданиях методом СЭА. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. 160 с.
20. *Craik R.J.M.* Sound transmission through buildings using statistical energy analysis // *Gower*. 1996. 280 p.
21. *Hopkins C.* Sound insulation. Oxford, Burlington (MA) : Butterworth-Heinemann, 2007. 622 p. ISBN 978-7506-6526-1.
22. *Crocker M.J., Price A.J.* Sound transmission using statistical energy analysis // *Journal of Sound and Vibration*. 1969. V. 9. № 3. P. 469–486.
23. *Овсянников С.Н.* Развитие методологии расчета звукоизоляции с использованием метода статистического энергетического анализа // *Строительство и реконструкция*. 2025. № 4. С. 41–51. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-41-51
24. *Овсянников С.Н., Самохвалов А.С.* Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-12-17

25. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., Шубин И.Л. Звукоизоляция многослойных остеклений в отдельных переплетах // Жилищное строительство. 2024. № 12. С. 20–28. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-12-20-28
26. Овсянников С.Н. Резонансы многослойных светопрозрачных конструкций // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XV Международной научно-практической конференции. Томск, 12–14 марта 2025 г. В 2 частях. Часть 2. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2024. С. 412–421.
27. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукопередача через ограждения с малыми техническими элементами, включая воздухообменные устройства // Строительство и реконструкция. 2024. № 5. С. 31–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-31-43

REFERENCES

1. Cremer L. Theorie der Schall dämmung dünner Wände bei Schrägen Einfall. *Akustische Zeitschrift*. 1942; (7): 81–104.
2. Sedov M.S. Sound Insulation of Thin Single-Layer Plates of Limited Dimensions. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1964; (5): 130–134 (In Russian)
3. Sedov M.S. Sound insulation. Handbook "Technical acoustics of transport vehicles". Chapter 4. I. Ivanov, Ed. Saint-Petersburg: Politekhnik, 1992. Pp. 68–106. (In Russian)
4. Bobylev V.N., Tishkov V.A., Monich D.V. Isolation of Air Noise by Single-Layer Enclosing Structures. Nizhny Novgorod, 2014. 67 p. ISBN 978-5-528-00004-6. (In Russian)
5. Sewell E.C. Transmission of Reverberant Sound through a Single-Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle. *Journal of Sound and Vibration*. 1970; 12 (1): 21–32.
6. Maidanik G. Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1962; 34 (6): 809–826.
7. Josse R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*. 1964; 266–280.
8. Wallace C.E. Radiation resistance of Rectangular Plate. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1972; 51: 946–952.
9. Leppington F.G., Broadbent E.G., Heron K.H. The Acoustic Radiation Efficiency of Rectangular Panels. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1982; A382: 45–71.
10. London A. Transmission of Reverberant Sound Through Double Walls. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1950; 22 (2): 270–279.
11. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen. *Acustica*. 1980; 45: 208.
12. Kurra S. Comparison of the Models Predicting Sound Insulation Values of Multilayered Building Elements. *Applied Acoustics*. 2012; 73: 575–589. DOI: 10.1016/apacoust.2011.11.008
13. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis Group. 2018. 476 p. DOI: 10.1201/9781351228206
14. Westphal W. Ausbreitung vor Körperschall in Gebäuden. *Acustica*. 1957; 7: 335–348.
15. Zaborov V.I. Theory of Sound Insulation of Enclosing Structures, 2nd edn. Moscow: Stroyizdat, 1969. 185 p. (In Russian)
16. Boroditsky L.S., Spiridonov V.M. Reduction of Structural Noise in Ship Premises. Leningrad: Sudostroenie, 1974. 221 p. (In Russian)
17. Lyon R.H., Maidanik G. Power Flow Between Linearly Coupled Oscillators. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1962; 34 (5): 623–639.
18. Ovsyannikov S.N. Propagation of Sound Vibration in Civil Buildings. Tomsk: TSUAB, 2000. 378 p. (In Russian)
19. Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V. Basic Principles of Calculating Sound Transmission in Buildings by the SEA Method. Tomsk: TSUAB, 2023. 160 p. (In Russian)
20. Craik R.J.M. Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis. Gower. 1996. 280 p.
21. Hopkins C. Sound Insulation. Routledge; 1st edn. 2007. 648 p. ISBN 978-0-7506-6526-1.5. (In Russian)
22. Crocker M.J., Price A.J. Sound Transmission using Statistical Energy Analysis. *Journal of Sound and Vibration*. 1969; 9 (3): 469–486.

23. Ovsyannikov S.N. Methodology Development for Calculating Sound Insulation using Statistical Energy Analysis. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2025; (4): 41–51. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-41-51 (In Russian)
24. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound Insulation of Single-Layer Glazing, Single- and Double-Glazed Windows. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2023; (12): 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-12-17 (In Russian)
25. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S., Shubin I.L. Sound Insulation of Multilayer Glazing in Separate Bindings. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2024; (12): 20–28. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-12-20-28 (In Russian)
26. Ovsyannikov S.N. Resonances of Multilayer Translucent Structures. In: Investments, urban planning, technologies as drivers of socio-economic development of the territory and improvement of the quality of life of the population. Part 2. Tomsk, 2024. Pp. 412–421. (In Russian)
27. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound Transmission Through Fences with Small Engineering Elements, Including Air Exchange Devices. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024; (5): 31–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-31-43 (In Russian)

Сведения об авторах

Овсянников Сергей Николаевич, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, Соляная, 2; гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, ovssn@tsuab.ru

Овсянников Михаил Сергеевич, ст. преподаватель, Научно-исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, michael.ovsyannikov@gmail.com

Authors Details

Sergei N. Ovsyannikov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; Research Institute of Structural Physics, 21, Lokomotivnyi Proezd, 127238, Moscow, Russia, ovssn@tsuab.ru

Mikhail S. Ovsyannikov, Senior Lecturer, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, michael.ovsyannikov@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.11.2025
Одобрена после рецензирования 24.11.2025
Принята к публикации 24.11.2025

Submitted for publication 15.11.2025
Approved after review 24.11.2025
Accepted for publication 24.11.2025