

Прохождение звука через однослойные и многослойные ограждающие конструкции зданий

В. Н. Бобылёв, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. Л. Щёголев, Д. В. Монич*

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65

(Статья поступила 28.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Рассмотрены основные положения теории самосогласования волновых полей, позволяющей исследовать механизм прохождения звука через однослойные и многослойные ограждающие конструкции с учетом двойственной природы прохождения звука. Приведены аналитические выражения для определения предельной звукоизоляции ограждения, которая не может быть превышена при заданной массе и геометрических размерах. Исследованы резервы повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций, применяемых в строительстве.

PACS: 43.55.+p

УДК: 534.2

Ключевые слова: защита от шума, звукоизоляция, ограждающие конструкции зданий, самосогласование волновых полей, резонансное прохождение звука, инерционное прохождение звука.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях человек постоянно подвергается воздействию повышенного уровня шума. Это происходит в транспорте, на рабочем месте и в местах массового отдыха. Наружные и внутренние ограждения помещений зачастую не обеспечивают требуемой защиты от шума. Поэтому обеспечение акустического комфорта в среде обитания человека является важнейшей задачей при проектировании и строительстве гражданских и промышленных зданий. Для этого необходимо подробное представление механизма прохождения звука через ограждения и их элементы в различных частотных диапазонах.

1. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ОДНОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИФFUЗНОМ ПАДЕНИИ ЗВУКА

Теория самосогласования волновых полей, разработанная научной школой проф. М. С. Седова [1] устанавливает физическую природу звукопроницаемости преграды на основе рассмотрения волновых явлений. Согласно данной теории механизм прохождения звука имеет двойственную природу — резонансное прохождение звука и инерционное прохождение звука. Звуковые волны, падающие со стороны источника шума, образуют в плоскости ограждения поле звукового давления, которое в свою очередь возбуждает в пластине изгибные колебания. При этом волновое поле смещений пластины формируется свободными упругими и инерционными (чисто вынужденными) волнами. Распространение инерционных волн происходит со скоростью следа падающей звуковой волны и не зависит от упругих характеристик материала, а определяется

только массой ограждения. Выражение звуковой мощности, излучаемой ограждающей конструкцией, запишется как:

$$W_2 = W_{2C} + W_{2И}, \quad (1)$$

где W_{2C} — мощность, излучаемая упругими волнами, $W_{2И}$ — мощность, излучаемая инерционными волнами.

На рис. 1 приведена обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного тонкого ограждения, построенная по теории самосогласования волновых полей. Приведено разделение частотного диапазона на отдельные области: $f_{\Gamma m_0 n_0}$ — граничная частота области простых пространственных резонансов (ПрПР); $f_{\Gamma mn_0}$ — граничная частота области неполных пространственных резонансов (НПР); $f_{\Gamma mn}$ — граничная частота области полных пространственных резонансов (ППР).

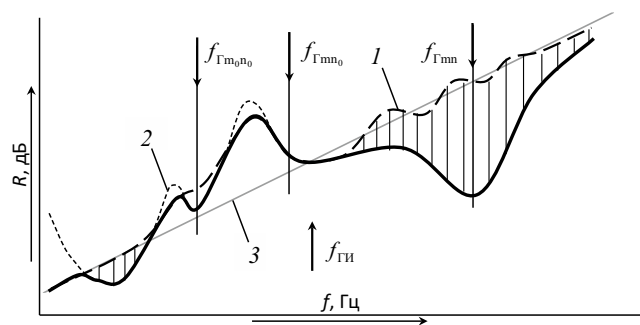


Рис. 1: Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения конечных размеров: 1 — инерционное прохождение, 2 — резонансное прохождение, 3 — закон масс

Резонансное прохождение звука через однослойное тонкое ограждение определяется потерями энергии на рассеивание в материале (коэффициент потерь η) и степенью самосогласования собственного волнового поля и звуковыми полями перед и за ограждением (A_1 и A_2 — в «шумном» и «тихом» помеще-

*E-mail: dmitriy.monich@mail.ru

нии соответственно). Таким образом, излучение звука в режиме собственных колебаний различно в областях простых, неполных и полных пространственных резонансов. Выражение звукоизоляции однослойного ограждения в области частот ниже граничного ППР ($f < f_{\Gamma mn}$) имеет вид [1]:

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \times \frac{\mu^2 \cdot f^2}{\left(\frac{F_{\text{И}}^2}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_{2\text{И}}} + \frac{\pi}{1,15} \cdot \frac{A^4}{2 \cdot \eta \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_{2\text{С}}} \right)}, \quad (2)$$

где θ_1 — угол падения звуковых волн на ограждение (для диффузного звукового поля используется усредненное значение $\theta_{\text{ср.}} = 51^\circ, 75^\circ \dots$); $\theta_{2\text{И}}, \theta_{2\text{С}}$ — углы излучения звуковых волн инерционными и свободными колебаниями соответственно; $F_{\text{И}}$ — функция отклика ограждающей конструкции в режиме инерционных колебаний; $A^4 = A_1^2 \cdot A_2^2$ — характеристика самосогласования звуковых полей перед и за панелью (A_1 и A_2 соответственно) с волновым полем собственных колебаний ограждения

В знаменателе формулы (2) первое слагаемое в круглых скобках характеризует инерционное прохождение звука через ограждение, а второе слагаемое — резонансное прохождение. Когда основной вклад в излучение звука вносят инерционные волны, данная формула имеет вид [1]:

$$R = 20 \lg \frac{\mu \cdot f}{F_{\text{И}}} - 46,7. \quad (3)$$

Формула (3) выражает предельную звукоизоляцию ограждающих конструкций конечных размеров. Ее превышения не произойдет даже при существенном демпфировании собственных колебаний [1]. Для ограждения заданной массы предельная звукоизоляция определяется величиной функции отклика $F_{\text{И}}$ и текущей частотой звука f . На рис. 1 нанесены кривые, соответствующие инерционному и резонансному прохождению звука через однослойное ограждение. Заштрихованная область между ними обозначает резерв повышения звукоизоляции за счет снижения резонансного прохождения звука. Одним из способов использования данных резервов для однослойных ограждений является изменение цилиндрической жесткости при неизменной массе [2].

2. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ПАДЕНИИ ЗВУКА

В реальных условиях застройки современных городов очень часто встречаются случаи углового (направленного) падения звука от различных источни-

ков на ограждающие конструкции зданий. Так, например, многоэтажные здания, расположенные в непосредственной близости от транспортных магистралей, находятся под действием звука, падающего на ограждающие конструкции, под некоторым углом. Причем при увеличении этажности угол падения звука на ограждения становится все больше. Поэтому установление соотношений, связывающих звукоизоляцию ограждений конечных размеров с углами падения звука, дает возможность таким образом конструировать ограждающие конструкции, чтобы свести к минимуму влияние внешних шумовых факторов на внутреннюю среду зданий.

Основной характеристикой звукоизоляции конструкции является коэффициент прохождения звука τ , определяемый по выражению [1]:

$$\tau = \frac{W_{2\text{С}} + W_{2\text{И}}}{W_1}, \quad (4)$$

где $W_{2\text{С}}$ — акустическая мощность, излученная ограждением при его резонансном движении; $W_{2\text{И}}$ — акустическая мощность, излучаемая инерционными волнами; W_1 — звуковая мощность в падающей звуковой волне.

Для определения данных параметров используется теория самосогласования волновых полей [1]. В данной теории принята модель прохождения звука, основанная на понятии самосогласования звуковых полей в плоскости ограждения и волнового поля самого ограждения. При этом учитываются резонансное и инерционное прохождение звука через пластину. Для шарнирно закрепленной по краям пластины размером в плане $a \times b$ выражения

$$\begin{aligned} ka \sin \alpha &= M(k_0 a, \sin \alpha_0, \sin \theta); \\ kb \cos \alpha &= N(k_0 b, \cos \alpha_0, \sin \theta) \end{aligned} \quad (5)$$

будут являться соотношениями характеристик звукового поля в плоскости рассматриваемого ограждения. Здесь k и k_0 — волновые числа; α и α_0 — углы падения свободной изгибной волны и звуковой волны в плоскости пластин, соответственно: $M = m/m_0$ и $N = n/n_0$ — коэффициенты самосогласования длин проекций свободных и звуковых полуволн по сторонам a и b соответственно; θ — угол падения звука на ограждение.

Определим амплитуду поперечных смещений рассматриваемой конструкции для случая резонансного прохождения звука:

$$\xi_{0mn} = \frac{P_{0m_0 n_0} \cdot A}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (6)$$

Где μ — поверхностная плотность ограждения, кг/м^2 ; $\omega_p^2 = [\omega_{mn}^2 (1 + i\eta) - \omega^2]$ — здесь $\omega_{mn} = 2\pi f_{mn}$; f_{mn} — частота собственных колебаний ограждения, Гц; η — коэффициент внутренних потерь ограждения; A — характеристика самосогласования, определяемая по выражению:

$$A = \frac{\int_0^a \int_0^b \left[\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{m_0\pi x}{a} \sin \frac{n_0\pi y}{b} + \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{m_0\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{n_0\pi y}{b} \right] dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m_0\pi x}{a} \sin^2 \frac{n_0\pi y}{b} dx dy}, \quad (7)$$

где m, n — числа длин проекций собственных полу-волн по сторонам a и b пластины соответственно; m_0, n_0 — те же величины для звукового поля в плоскости пластины.

Резонансный характер прохождения направленного звука через ограждения позволяет установить три области частотной характеристики с различной степенью интенсивности прохождения звука: область простых пространственных резонансов (ПрПР) на низких частотах, область неполных пространственных резонансов (НПР) на средних и высоких частотах и область выше граничной частоты пространственного резонанса. Для случая направленного падения звука выражение для излучаемой ограждением акустической мощности в режиме резонансных колебаний запишется в следующем виде:

$$W_{2C} = \frac{\rho_0 A_0}{2} \cdot \frac{\bar{\vartheta}_{0mn}^2 \cdot A_2^2}{\cos \theta_{2C}} \cdot \operatorname{Re} \frac{k_0}{k_{02}}, \quad (8)$$

где $\bar{\vartheta}_{0mn}^2$ — квадрат колебательной скорости ограждения; A_2^2 — характеристика самосогласования звукового поля за ограждением с его собственным волновым полем; k_{02} — составляющая волнового числа (вектора) среды k_0 вдоль оси z ; θ_{2C} — угол излучения, град.

При инерционном прохождении звука характеристикой начального состояния ограждения можно считать смещение при таких вынужденных колебаниях, которые формируются однородной вынужденной волной, являющейся следом падающей звуковой волны, и краевыми неоднородными вынужденными волнами.

Запишем уравнение смещений в инерционной волне:

$$\xi = \xi_0 \exp i [k_{01} (x \sin \alpha_0 + y \cos \alpha_0) + \psi]. \quad (9)$$

Амплитуда поперечных колебаний ограждения в инерционных волнах при угловом прохождении звука определяется с учетом принципа наименьшего волнового движения:

$$\xi_{0и} = F_{и} \cdot \frac{P_{0m_0n_0} A_{и}}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (10)$$

где $A_{и}$ — характеристика самосогласования звуковых полей с полем инерционных волн пластины, $F_{и}$ — функция отклика ограждения.

Звуковая мощность, излучаемая инерционными волнами, определяется как:

$$W_2 = \frac{\rho_0 A_0}{8} \frac{\vartheta_{0m_0n_0}^2}{\cos \theta} \frac{A_{2и}^2}{\cos \theta_{2и}} \cdot ab, \quad (11)$$

где $\vartheta_{0m_0n_0}$ — амплитуда колебательной скорости ограждения в инерционных волнах:

$$\vartheta_{0m_0n_0}^2 = F_{и}^2 \frac{P_{0m_0n_0}^2}{\mu^2 \cdot \omega^2}.$$

В качестве воздействующей на пластину звуковой мощности принимаем выражение акустической мощности падающего фронта плоских звуковых волн под углом θ , которую запишем в виде [4]:

$$W_1 = \frac{P_0^2}{\rho_0 c_0^2} \cdot a \cdot b \cdot \cos \theta, \quad (12)$$

где P_0^2 — суммарное амплитудное значение акустического давления в падающих звуковых волнах.

Таким образом, зная значения звуковых мощностей, можно определить коэффициент прохождения по формуле (4), а значит, и звукоизолирующую способность светопрозрачных ограждений при направленном падении звука.

3. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

Сэндвич-панели применяются в строительстве в качестве несущих легких перегородок, выгородок, экранов. Данное ограждение включает в себя две листовые внешние облицовки и легкий средний слой между ними. Коэффициент прохождения звука для данного типа ограждений определяется по формуле [1]:

$$\tau = \tau_{п.и.} + \tau_{п.с.} + \tau_{1и} \tau_{2и} + \tau_{1с} \tau_{2с}, \quad (13)$$

где индекс «п» означает прохождение звука через внешние облицовки с упругой связью между собой; индекс «и» — инерционное прохождение через первую облицовку, воздушный промежуток и вторую облицовку; индекс «с» — резонансное прохождение звука через первую облицовку и вторую облицовку.

При резонансном прохождении звука через сэндвич-панель как конструктивную систему в целом коэффициент прохождения звука определяется по формуле [3]:

$$\tau_{п.с.} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu^2 f^2}{c_{и}^2 A^2} \left(\frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (14)$$

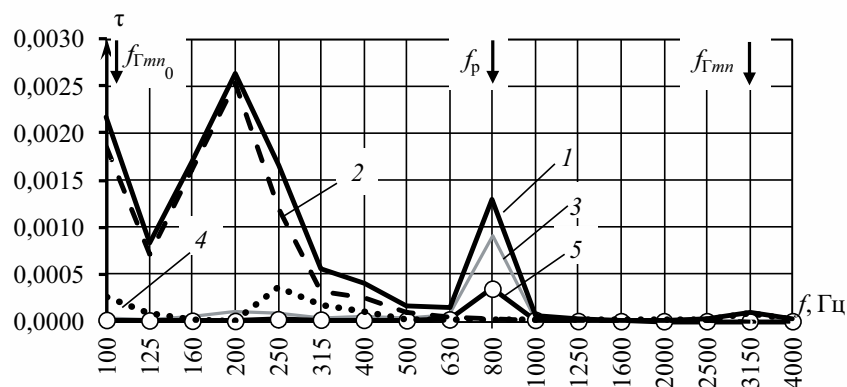


Рис. 2: Коэффициенты прохождения звука через сэндвич-панель с облицовками из гипсоволокнистых листов толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенополистирола толщиной 50 мм (размеры панели: 2000×1200 мм): 1 — τ ; 2 — $\tau_{1и}\tau_{2и}$; 3 — $\tau_{п.и}$; 4 — $\tau_{1с}\tau_{2с}$; 5 — $\tau_{п.с}$.

где f_p — резонансная частота системы «масса — упругость — масса» сэндвич-панели, Гц; $c_{и}$ — скорость распространения бегущей волны, м/с; A — характеристика самосогласования волновых полей; μ — поверхностная плотность, кг/м², f — текущая частота звука, Гц.

При резонансном прохождении звука в частотной области НПР ($f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$) коэффициенты прохождения для первой и второй облицовки определяются [3]:

$$\tau_{1с} = \frac{1}{\frac{10^{-5}}{A_0^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 + 1},$$

$$\tau_{2с} = \frac{1}{\frac{3,1}{c_{и}^2 A_0^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 \cos^2 \theta_2 + 1}, \quad (15)$$

где η_1 — коэффициент потерь материала облицовок; μ_1 — поверхностная плотность первой и второй облицовки, кг/м²; A_0 — И, f — то же, что в формуле (14); $f + \Gamma mn$ — граничная частота области ППР, Гц; θ_2 — угол падения звуковых волн на вторую облицовку, град.

Коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой определяем по формуле [3]:

$$\tau_{п.и} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu^2 f^2}{c_{и} F_{1и}^2} \left(\frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (16)$$

где $F_{1и}$ — функция отклика первой облицовки, на которую падет звук; и, f_p , f — то же, что в формуле (14); μ — поверхностная плотность сэндвич-панели, кг/м².

Выражение для определения коэффициента инерционного прохождения звука через первую и вторую об-

лицовки определяется [3]:

$$\tau_{1и} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1и}^2} + 1},$$

$$\tau_{2и} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu_1^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{c_{и} F_{2и}^2} + 1}, \quad (17)$$

где θ_2 , μ_1 — то же, что в формуле (15); f , и — то же, что в формуле (14); $F_{1и}$ — то же, что в формуле (16); $F_{2и}$ — функция отклика второй облицовки.

На рис. 2 представлены частотные характеристики коэффициентов прохождения звука через трехслойное ограждение конечных размеров.

Анализируя полученные данные можно видеть, что основные резервы повышения звукоизоляции трехслойных сэндвич-панелей расположены в диапазоне средних частот, вблизи резонансной частоты системы «масса — упругость — масса» (f_p). Для повышения звукоизоляции сэндвич-панели необходимо максимально сместить данную область повышенного прохождения звука в диапазон низких частот. Это можно реализовать применением материала среднего слоя с низким динамическим модулем упругости (E_d) или акустическим разобщением облицовок и среднего слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. при проектировании наружных и внутренних ограждающих конструкций зданий необходимо использовать резервы звукоизоляции, определяемые предельной звукоизоляцией. Для однослойных ограждений это возможно путем демпфирования собственных колебаний, либо путем регу-

лирования цилиндрической жесткости при неизменной массе;

2. для эффективного использования резервов звукоизоляции сэндвич-панелей необходимо приме-

нять материалы среднего слоя с низким динамическим модулем упругости или акустически разобщать облицовки и средний слой.

-
- [1] Седов М. С. Звукоизоляция. Техническая акустика транспортных машин: справочник / Под ред. Н. И. Иванова. Гл. 4. С. 68. СПб: Политехника, 1992.
- [2] Бобылев В. Н., Монич Д. В., Тишков В. А., Гребнев П. А. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций. Н. Новгород: ННГАСУ, 2014.
- [3] Бобылев В. Н. Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом акустического разобщения слоев: учебное пособие. / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. В. Монич. Н. Новгород: ННГАСУ, 2016.
- [4] Седов М. С., Тишков В. А. Расчет звукоизоляции однослойных конструкций при направленном падении звука. Курс лекций. Горький: ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1978.
- [5] Бобылев В. Н., Тишков В. А., Монич Д. В., Щеголев Д. Л., Паузин С. А. Вестник Отделения строительных наук РААСН. Белгород, БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. Вып. 12. С. 329.

Sound transmission through single-layered and multi-layer building enclosures

V. N. Bobylev, V. A. Tishkov, P. A. Grebnev, D. L. Shchegolev, D. V. Monich^a

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: ^a dmitriy.monich@mail.ru

The main provisions of the theory of sound matching of wave fields are considered, which makes it possible to investigate the mechanism of sound transmission through single-layer and multi-layer enclosing structures, taking into account the dual nature of sound transmission. Analytical expressions are given for determining the ultimate sound insulation of the fence, which can not be exceeded for a given mass and geometric dimensions. The reserves of increasing of the sound insulation of single-layer and multi-layered enclosing structures used in construction have been investigated.

PACS: 43.55.+p

Keywords: noise protection, soundproofing, walling buildings, the self-consistency of the wave fields, resonant sound passage, inertial sound passage.

Received 28 June 2017.

Сведения об авторах

1. Бобылев Владимир Николаевич — чл.-корр. РААСН (Российская академия архитектуры и строительных наук), профессор, зав. кафедрой архитектуры.
2. Тишков Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры архитектуры.
3. Гребнев Павел Алексеевич — канд. техн. наук, инженер-исследователь, начальник учебно-научно-исследовательского центра «Строительные конструкции».
4. Щеголев Дмитрий Львович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры архитектуры.
5. Монич Дмитрий Викторович — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры архитектуры; тел.: (831) 430-19-46, e-mail: dmitriy.monich@mail.ru.