



7. Bobylyov V. N., Grebnev P. A., Erofeev V. I., Monich D. V., Kuzmin D. S. Sposoby povysheniya zvukoizolyatsii beskarkasnykh sendvich-paneley [Ways to improve sound insulation of frameless sandwich panels] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021, № 2. – P. 32–45.

8. Monich D. V. Metod raschyota zvukoizolyatsii karkasno-obshivnykh peregorodok [Calculation method of sound insulation of frame-sheathing partitions] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021, № 4. – P. 30–39.

9. Monich D. V. Metod otsenki effektivnosti zvukoizoliruyuschikh lyogkikh ograzhdayuschikh konstruksiy [Method for assessing effectiveness of soundproof lightweight enclosing structures] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021. № 4. – P. 17–29.

© Д. В. Монич, 2022

Получено: 27.12.2021 г.

УДК 699.844

Д. В. МОНИЧ, канд. техн. наук, проф. кафедры архитектуры

МЕТОД РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ КАРКАСНО-ОБШИВНЫХ ПЕРЕГОРОДОК С АНТИРЕЗОНАНСНЫМИ ПАНЕЛЯМИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-46;
эл. почта: dmitriy.monich@mail.ru

Ключевые слова: звукоизоляция, резонансное прохождение звука, инерционное прохождение звука, самосогласование волновых полей, каркасно-обшивная перегородка, антирезонансные панели.

Представлен теоретический метод расчета звукоизоляции нового типа звукоизолирующего ограждения – каркасно-обшивных перегородок с антирезонансными панелями. Метод разработан на базе теории самосогласования волновых полей. Предназначен для применения при проектировании звукоизолирующих ограждающих конструкций между помещениями гражданских и промышленных зданий. Приведено сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных измерений в лабораторных условиях.

Каркасно-обшивные перегородки являются распространенным типом многослойных ограждающих конструкций, широко применяемым в гражданском и промышленном строительстве.

Исследованиями звукоизоляции данного типа ограждений занимаются зарубежные и российские ученые. В работах [1], [2] исследовано прохождение звука через различные типы каркасно-обшивных перегородок, в том числе с применением методов компьютерного моделирования. Влияние жесткости стоечных профилей каркаса на звукоизоляцию перегородок исследовано в работе [3]. Звукоизоляция каркасно-обшивных перегородок с обшивками из слоистых элементов исследована в работе [4].

В Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете (ранее – ГИСИ им. В. П. Чкалова) научной школой М. С. Седова проводятся

теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции ограждающих конструкций на базе теории самосогласования волновых полей [5]. В статье [6] представлен метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок конечных геометрических размеров, с каркасом из тонкостенных стальных профилей, с учетом резонансного и инерционного прохождения звука.

В данной статье представлен метод расчета звукоизоляции нового типа звукоизолирующего ограждения – каркасно-обшивных перегородок с антирезонансными панелями. Данный тип звукоизолирующего ограждения разработан на кафедре архитектуры ННГАСУ и запатентован [7]. На рис. 1 приведена схема конструктивного решения рассматриваемого ограждения.

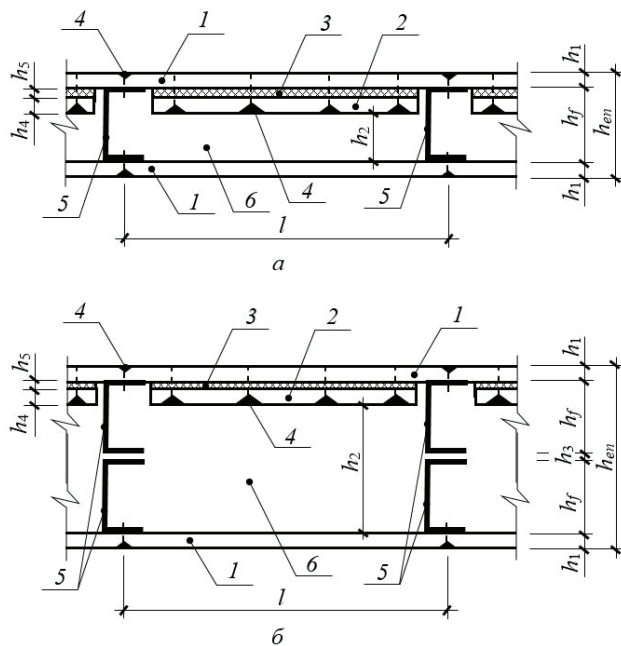


Рис. 1. Схема конструктивного решения каркасно-обшивной перегородки с антирезонансными панелями (общая толщина ограждения h_{en}): а – с одинарным каркасом; б – с двойным каркасом: 1 – листовая обшивка толщиной h_1 ; 2 – антирезонансная панель толщиной $h_2 = h_1$; 3 – сплошной слой упругого материала толщиной h_3 ; 4 – элементы крепления (стальные саморезы); 5 – стоечные профили каркаса; 6 – воздушный промежуток между листовыми обшивками толщиной h_6

Можно видеть, что разработанное конструктивное решение обеспечивает следующие преимущества перед ограждениями-аналогами: 1) расположение антирезонансных панелей внутри воздушного промежутка между листовыми обшивками не приводит к увеличению толщины перегородки; 2) в воздушном промежутке между листовыми обшивками не требуется размещение звукопоглощающего материала.

Метод расчета включает в себя шесть этапов: определение граничных частот областей резонансного прохождения звука через перегородку, расчет коэффициентов резонансного прохождения звука через перегородку, расчет коэффициентов инерционного прохождения звука через перегородку, расчет звукоизоляции перегородки, расчет индекса изоляции воздушного шума перегородки и его сравнение с нормативными требованиями, оценку рациональности конструктивного реше-



ния звукоизолирующего ограждения по сравнению с аналогами.

Рассмотрим плоскую прямоугольную каркасно-обшивную перегородку конечных геометрических размеров (длина \times высота = $a \times b$), с шарнирным опиранием по контуру. Перегородка расположена между двумя помещениями: помещением высокого уровня (ПВУ) с источником шума и помещением низкого уровня (ПНУ), защищаемым от шума. Со стороны ПВУ на перегородку действует диффузное звуковое поле. Звукоизоляция ограждающих конструкций определяется с учетом резонансного прохождения звука в режиме собственных колебаний и инерционного прохождения звука в режиме вынужденных колебаний [5]:

$$R = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau_r + \tau_i} \right), \quad (1)$$

где τ_r – коэффициент резонансного прохождения звука через перегородку; τ_i – коэффициент инерционного прохождения звука через перегородку.

Коэффициенты резонансного и инерционного прохождения звука для двойных ограждений с воздушным промежутком определяются по формулам [5]:

$$\tau_r = \tau_{sr} + \tau_{1r} \tau_{2r}, \quad (2)$$

где τ_{sr} – коэффициент резонансного прохождения звука через обе обшивки с упругой связью между ними; τ_{1r} – коэффициент резонансного прохождения звука через обшивку со стороны ПВУ; τ_{2r} – коэффициент резонансного прохождения звука через обшивку со стороны ПНУ

$$\tau_i = \tau_{si} + \tau_{1i} \tau_{2i}, \quad (3)$$

где τ_{si} – коэффициент инерционного прохождения звука через обе обшивки с упругой связью между ними; τ_{1i} – коэффициент инерционного прохождения звука через обшивку со стороны ПВУ; τ_{2i} – коэффициент инерционного прохождения звука через обшивку со стороны ПНУ.

Расчет проводится в третьоктавных полосах частот. В исследовательских целях принят следующий расчетный диапазон: $f = 50\text{--}5\,000$ Гц, что шире нормируемого диапазона частот ($f = 100\text{--}3\,150$ Гц). Метод расчета состоит из шести этапов.

Этап № 1. Определение граничных частот областей резонансного прохождения звука через перегородку

1) Граничная частота области неполных пространственных резонансов (НПР) для каркасно-обшивной перегородки определяется по формуле [5]:

$$f_{bmn0} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4ab} + \Delta f_{bmn0}, \quad (4)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; a , b – длина и высота ограждения, соответственно, м; Δf_{bmn0} – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний листовой обшивки, Гц.

2) Стоечные профили каркаса формируют по длине перегородки отдельные прямоугольные ячейки. Это приводит к появлению дополнительных условий самосогласования волновых полей в пределах данных ячеек. Длина ячейки каркаса принимается равной шагу стоечных профилей каркаса перегородки ($a_1 = l$). Граничная частота области НПР для ячейки каркаса вычисляется по формуле:

$$f_{bmn0(f)} = \frac{c_0 \sqrt{a_1^2 + 4b^2}}{4a_1 b} + \Delta f_{bmn0}, \quad (4a)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; a_1 , b – длина и высота ячейки каркаса, со-



ответственно; Δf_{bmn0} – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний листовой обшивки.

3) Граничная частота области полных пространственных резонансов (ППР) для каркасно-обшивной перегородки определяются по формуле [5]:

$$f_{bmn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}}, \quad (5)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; μ – поверхностная плотность листовой обшивки, кг/м²; D – цилиндрическая жесткость листовой обшивки, Па·м³.

4) Резонансная частота системы «масса-упругость-масса» («листовая обшивка-воздушный промежуток-листовая обшивка») определяется по известной формуле, которая для случая одинаковых листовых обшивок записывается в следующем виде:

$$f_{msm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E_0}{h_2\mu_1}}, \quad (6)$$

где E_0 – динамический модуль упругости материала воздуха, Па; μ_1 – поверхностная плотность листовых обшивок перегородки, кг/м²; h_2 – толщина воздушного промежутка между листовыми обшивками, м.

5) Резонансная частота системы «масса-упругость-масса» для антирезонансной панели («листовая обшивка-упругий слой-антирезонансная панель») определяется по известной формуле, которая в случае одинаковых материалов для листовых обшивок и антирезонансных панелей записывается в следующем виде:

$$f_{msm(APИ)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E_2}{h_5\mu_1}}, \quad (7)$$

где E_2 – динамический модуль упругости материала упругого слоя, расположенного между листовой обшивкой и антирезонансными панелями, Па; μ_1 – поверхностная плотность листовых обшивок перегородки, кг/м²; h_5 – толщина упругого слоя, расположенного между листовой обшивкой и антирезонансными панелями, м.

Этап № 2. Расчет коэффициента резонансного прохождения звука через перегородку

Расчет проводится в областях резонансного прохождения звука с различными условиями самосогласования волновых полей в ПВУ и ПНУ с волновым полем собственных колебаний перегородки: в области простых пространственных резонансов (ПрПр), неполных пространственных резонансов (НПр), полных пространственных резонансов (ППР). С учетом изменения условий дополнительного самосогласования волновых полей в ячейках каркаса ($a_1 \times b$) за счет колебаний антирезонансной панели формула (2) для расчета коэффициента резонансного прохождения звука переписывается в следующем виде:

1) в диапазоне частот ниже резонансной частоты системы «масса-упругость-масса» для антирезонансной панели ($f < f_{msm(APИ)}$):

$$\tau_r = \tau_{sr} + \tau_{1r} \tau_{2r(f/APИ)}, \quad (8)$$

где τ_{sr} – коэффициент резонансного прохождения звука через обе обшивки с упругой связью между ними; τ_{1r} – коэффициент резонансного прохождения звука через обшивку со стороны ПВУ; $\tau_{2r(f/APИ)}$ – коэффициент резонансного прохождения звука через обшивку со стороны ПНУ, рассчитанный для ячейки каркаса ($a_1 \times b$) с учетом антирезонансной панели;

2) в диапазоне частот выше резонансной частоты системы «масса-упругость-масса» для антирезонансной панели ($f \geq f_{msm(APИ)}$) справедлива формула (2).



Коэффициент прохождения звука через обе листовые обшивки с упругой связью между ними определяется по формуле [5]:

$$\tau_{sr} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 f^2}{A^2} \left(\frac{f^2}{f_{msm}^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (9)$$

где $\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс воздуха; μ – поверхностная плотность перегородки, кг/м²; f – текущая частота звука, Гц; A – характеристика самосогласования собственного волнового поля обшивок со звуковыми полями в ПВУ и ПНУ; f_{msm} – резонансная частота системы «масса-упругость-масса» («листовая обшивка-воздушный промежуток-листовая обшивка»), Гц.

Коэффициенты резонансного прохождения звука через первую и вторую обшивки перегородки определяются по формулам [14]:

1) в областях ПрППР и НППР ($f_{bm0n0} < f < f_{bmn}$):

$$\tau_{1r} = \frac{1}{\frac{1,15\pi^3}{8\rho_0^2 c_0^2 A^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 \cos^2 \theta_m + 1}, \quad (10)$$

$$\tau_{2r} = \frac{1}{\frac{1,15\pi^3}{8\rho_0^2 c_0^2 A^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 \cos^2 \theta_2 + 1}, \quad (11)$$

где $\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс воздуха; A – характеристика самосогласования собственного волнового поля обшивок со звуковыми полями в ПВУ и ПНУ; μ_1 – поверхностная плотность обшивки, кг/м²; f – текущая частота звука, Гц; η_1 – коэффициент потерь материала обшивки; $\theta_m = 51,76^\circ$ – средний угол падения волн диффузного звукового поля на перегородку со стороны ПВУ; θ_2 – угол падения звуковых волн из объема воздушного промежутка на обшивку со стороны ПНУ, градус.

2) в области ПППР ($f > f_{bmn}$):

$$\tau_{1r} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{bmn}} \eta_1 \cos \theta_m \sqrt{1 - \frac{f_{bmn}}{f}} + 1}, \quad (12)$$

$$\tau_{2r} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{bmn}} \eta_1 \cos \theta_2 \sqrt{1 - \frac{f_{bmn}}{f}} + 1}, \quad (13)$$

где $\rho_0 c_0$; μ_1 , η_1 , θ_m ; f – то же, что в формуле (11); f_{bmn} – граничная частота области ПППР для листовой обшивки, Гц.

Этап № 3. Расчет коэффициента инерционного прохождения звука через перегородку

Расчет проводится по формуле (3), при этом коэффициент инерционного прохождения звука через обе обшивки с упругой связью между ними определяется по формуле [5]:

$$\tau_{si} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 f^2}{F_{li}^2} \left(\frac{f^2}{f_{msm}^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (14)$$

где $\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс воздуха; μ – поверхностная плотность перегородки, кг/м^2 ; f – текущая частота звука, Гц; F_{1i} – функция отклика обшивки со стороны ПВУ; f_{msm} – резонансная частота системы «масса-упругость-масса» («листовая обшивка-воздушный промежуток-листовая обшивка»), Гц.

Коэффициенты инерционного прохождения звука через первую и вторую обшивки перегородки определяются по формулам [5]:

$$\tau_{1i} = \frac{1}{\frac{\pi^2 \mu_1^2 f^2 \cos^2 \theta_m}{\rho_0^2 c_0^2} F_{1i}^2 + 1}, \quad (15)$$

$$\tau_{2i} = \frac{1}{\frac{\pi^2 \mu_1^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{\rho_0^2 c_0^2} F_{2i}^2 + 1},$$

где $\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс воздуха; μ_1 – поверхностная плотность обшивки, кг/м^2 ; f – текущая частота звука, Гц; $\theta_m = 51,76^\circ$ – средний угол падения волн диффузного звукового поля на перегородку со стороны ПВУ; θ_2 – угол падения звуковых волн из объема воздушного промежутка на обшивку со стороны ПНУ, градус; F_{1i} , F_{2i} – функции отклика обшивок перегородки в режиме инерционных колебаний.

На рис. 2 представлены частотные характеристики коэффициентов прохождения звука через каркасно-обшивную перегородку с антивибрационными панелями, с двойным каркасом, рассчитанные по вышеприведенным формулам.

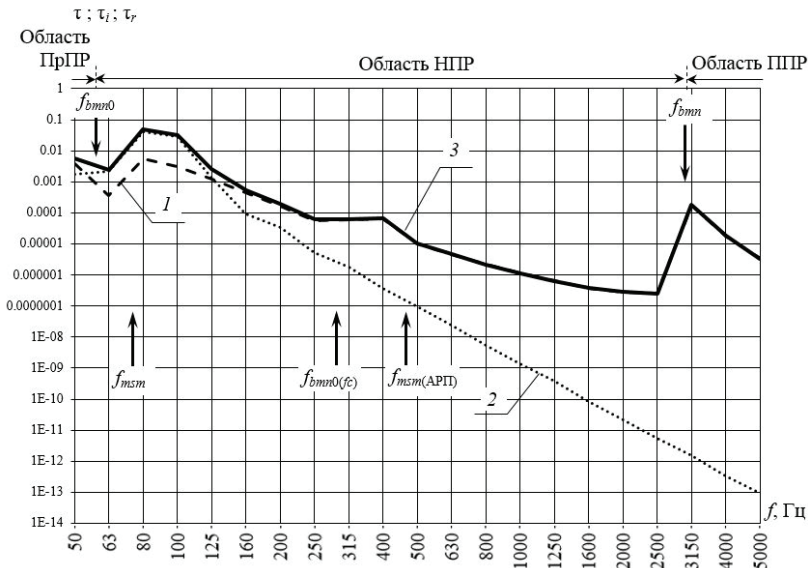


Рис. 2. Теоретические частотные характеристики коэффициентов прохождения звука через каркасно-обшивную перегородку с антивибрационными панелями, с двойным каркасом ($a \times b = 4,2 \times 2,5$ м; толщина воздушного промежутка между листовыми обшивками $h_2 = 89$ мм; облицовки из ГВЛ, $h_1 = 12,5$ мм; шаг стоечных профилей каркаса $a_1 = 0,6$ м, $h_f = 50$ мм, $h_3 = 5$ мм; антивибрационные панели из ГВЛ, $h_4 = 12,5$ мм; упругий слой из матов полиэфирного волокна, $h_5 = 12,5$ мм; общая толщина перегородки $h_{en} = 130$ мм): 1 – коэффициент резонансного прохождения звука через перегородку (τ_r); 2 – коэффициент инерционного прохождения звука через перегородку (τ_i); 3 – суммарный коэффициент прохождения звука через перегородку (τ)

Этап № 4. Расчет звукоизоляции перегородки

Расчет проводится по формуле (1), с учетом рассчитанных на предыдущих этапах значений коэффициента резонансного прохождения звука (τ_r) и коэффициента резонансного прохождения звука (τ_f). По результатам проведенного расчета строится частотная характеристика звукоизоляции каркасно-обшивной перегородки с антирезонансными панелями. На рис. 3 приведено сравнение теоретических и экспериментальных значений звукоизоляции исследуемой перегородки с двойным каркасом.

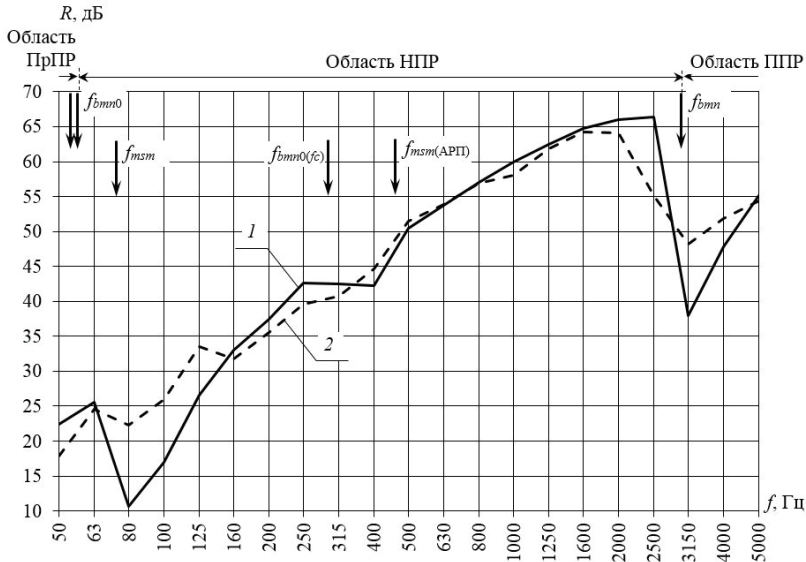


Рис. 3. Частотные характеристики звукоизоляции каркасно-обшивной перегородки с антирезонансными панелями, с двойным каркасом ($a \times b = 4,2 \times 2,5$ м; толщина воздушного промежутка между листовыми обшивками $h_2 = 89$ мм; облицовки из ГВЛ, $h_1 = 12,5$ мм; шаг стоечных профилей каркаса $a_1 = 0,6$ м, $h_f = 50$ мм, $h_3 = 5$ мм; антирезонансные панели из ГВЛ, $h_4 = 12,5$ мм; упругий слой из матов полиэфирного волокна, $h_5 = 12,5$ мм; общая толщина перегородки $h_{en} = 130$ мм): 1 – результаты теоретического расчета по разработанному методу; 2 – результаты экспериментальных лабораторных измерений

Экспериментальные измерения проведены в лабораторных условиях, в Больших акустических камерах ННГАСУ ($V_{КВУ} = 259$ м³, $V_{КНУ} = 211$ м³). На частотные характеристики нанесены граничные частоты областей резонансного прохождения звука: для области НПР (f_{bmn0}), для области НПР ячейки каркаса ($f_{bmn0(f_c)}$), для области ППР (f_{bmn}), а также резонансная частота системы «масса-упругость-масса» («листовая обшивка-воздушный промежуток-листовая обшивка»), f_{msm} и резонансная частота системы «масса-упругость-масса» («листовая обшивка-упругий слой-антирезонансная панель»), f_{msm} (АПТ), определенные на этапе № 1 расчета.

На рис. 4 приведены результаты сравнения экспериментальных частотных характеристик звукоизоляции каркасно-обшивной перегородки с антирезонансными панелями с двумя ограждениями-аналогами: 1) каркасно-обшивная перегородка равной поверхностной плотности; 2) каркасно-обшивная перегородка равной толщины.

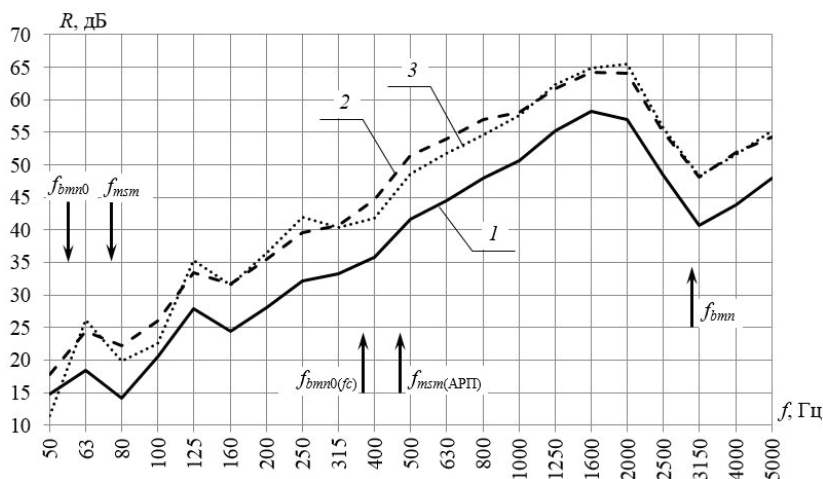


Рис. 4. Экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок с двойным каркасом: 1 – ограждение-аналог равной толщины (перегородка без антирезонансных панелей; толщина воздушного промежутка между листовыми обшивками $h_2 = 105$ мм; общая толщина перегородки $h_{en} = 130$ мм); 2 – исследуемая перегородка с антирезонансными панелями (толщина воздушного промежутка между листовыми обшивками $h_2 = 89$ мм; общая толщина перегородки $h_{en} = 130$ мм); 3 – ограждение-аналог равной поверхностной плотности (перегородка без антирезонансных панелей, с одной стороны выполнены двойные обшивки из ГВЛ: толщина воздушного промежутка между листовыми обшивками $h_2 = 105$ мм; общая толщина перегородки $h_{en} = 143$ мм)

Анализируя результаты, представленные на рис. 4, можно сделать следующие выводы:

1) перегородка с антирезонансными панелями (кривая 2) во всем рассматриваемом диапазоне частот имеет сравнимую или более высокую звукоизоляцию (на 1–3 дБ в диапазоне 400–800 Гц) по сравнению с перегородкой равной поверхностной плотности (кривая 3);

2) звукоизоляция перегородки с антирезонансными панелями (кривая 2) во всем рассматриваемом диапазоне частот превышает звукоизоляцию (на 3–10 дБ) перегородки равной толщины (кривая 1).

Высокая эффективность антирезонансных панелей обеспечивается за счет явления волноводной изоляции изгибных волн [9]–[11] в листовых обшивках перегородки. Ранее данное явление было успешно применено для разработки легкой перегородки с антирезонансными панелями [12].

Этап № 5. Расчет индекса изоляции воздушного шума перегородки и его сравнение с нормативными требованиями

Расчет индекса изоляции воздушного шума (R_w , дБ) и его сравнение с нормативными требованиями проводится в соответствии с требованиями СП 51.13330 «Защита от шума», с учетом изм. № 1.

Этап № 6. Оценка рациональности конструктивного решения звукоизолирующего ограждения по сравнению с аналогами

Оценка проводится по методу, представленному в работе [8] – по критерию функциональности и двум критериям рациональности звукоизолирующих ограждающих конструкций.



По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработан новый тип звукоизолирующего ограждения – легкая каркасно-обшивная перегородка с антирезонансными панелями. Перегородка обладает преимуществами по сравнению с ограждениями-аналогами равной поверхностной плотности и равной толщины.

2. На базе теории самосогласования волновых полей разработан метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок с антирезонансными панелями, с учетом резонансного и инерционного прохождения звука.

3. На примере перегородки с двойным каркасом проведено сравнение результатов теоретического расчета по разработанному методу с результатами лабораторных экспериментальных измерений:

– разработанный метод расчета обеспечивает хорошее соответствие (отклонения в пределах ± 2 дБ) и удовлетворительное соответствие (отклонения в пределах ± 5 дБ) с экспериментальными лабораторными результатами для большинства третьоктавных частот нормируемого диапазона (100–3150 Гц);

– разработанный метод расчета звукоизоляции не обеспечивает соответствие теоретических и экспериментальных результатов в следующих частотных диапазонах:

– в диапазоне низких частот (80–125 Гц). Данный результат можно объяснить снижением диффузности звукового поля в диапазоне частот ниже граничной частоты диффузности реверберационной камеры высокого уровня ($V_{\text{КВУ}} = 259 \text{ м}^3$; $f_{\text{diff}} = 111 \text{ Гц}$), т. к. теоретический метод расчета основан на предположении о диффузном звуковом поле в помещении с источником шума;

– в диапазонах высоких частот (2500–4000 Гц). Данный результат можно объяснить несовершенством метода расчета, который не обеспечивает необходимую точность в области ППР из-за неполных исходных данных по частотной зависимости коэффициента потерь материала листовых обшивок (η_1).

В дальнейшем планируется продолжение исследований звукоизолирующих свойств каркасно-обшивных перегородок с антирезонансными панелями с целью повышения точности метода расчета звукоизоляции в диапазонах низких и высоких частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modelling / J. Wang, T. J. Lu, J. Woodhouse, R. S. Langley, J. Evans // *Journal of Sound and Vibration*. – 2005. – № 286. – P. 817–847.

2. Wyngaert, J.C.E. Predicting the sound insulation of finite double-leaf walls with a flexible frame / J. C. E. Wyngaert, M. Schevenels, P. B. Reynders Edwin // *Applied Acoustics*. – 2018. – № 141. – P. 93–105.

3. Дымченко, В. В. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок с одинарным каркасом / В. В. Дымченко. – Текст : непосредственный // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*. – Нижний Новгород. – 2018. – № 4. – С. 29–34.

4. Кочкин, А. А. Снижение шума в помещениях при эксплуатации и реконструкции зданий / А. А. Кочкин, А. В. Иванова. – Текст : непосредственный // *Вестник Вологодского государственного университета. Серия «Технические науки»*. – 2021. – № 2. – С. 67–69.

5. Седов, М. С. Звукоизоляция / М. С. Седов. – Текст : непосредственный // *Техническая акустика транспортных машин : справочник / Л. Г. Балишанская, Л. Ф. Дроздова,*



Н. И. Иванов [и др.] ; под редакцией Н. И. Иванова. – Санкт-Петербург, 1992. – Глава 4. – С. 68–105. – ISBN 5-7325-0090-1.

6. Монич, Д. В. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок / Д. В. Монич. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4. – С. 30–39.

7. Патент Российская Федерация. Звукоизолирующие ограждение : № 2021129960 : заявл. 12.10.2021 / В. Н. Бобылев, В. И. Ерофеев, Д. В. Монич, П. А. Гребнев, Д. С. Кузьмин ; правообладатель Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Текст : непосредственный.

8. Монич, Д. В. Метод оценки эффективности звукоизолирующих легких ограждающих конструкций / Д. В. Монич. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4. – С. 17–29.

9. Ковинская, С. И. О волноводной изоляции изгибных волн / С. И. Ковинская, А. С. Никифоров. – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – 1982. – Том XXVIII, Выпуск 6. – С. 792–798.

10. Исакович, М. А. Экспериментальные исследования виброизоляции изгибных волн, создаваемой импедансными системами / М. А. Исакович, В. И. Кашина, В. В. Тютюкин. – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – 1977. – Том XXIII, № 3. – С. 384–389.

11. Ключкин, И. И. Об ослаблении волн изгиба в стержнях и пластинах при помощи резонансных колебательных систем / И. И. Ключкин. – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – 1960. – Том VI, Выпуск 2. – С. 213–219.

12. Бобылев, В. Н. Звукоизоляция однослойных легких перегородок с антирезонансными панелями / В. Н. Бобылев, П. А. Гребнев, В. И. Ерофеев, Д. В. Монич, Д. С. Кузьмин. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 3. – С. 46–55.

MONICH Dmitry Viktorovich, candidate of technical science, professor of the chair of architecture

CALCULATION METHOD OF SOUND INSULATION OF FRAME-SHEATHING PARTITIONS WITH ANTI-RESONANT PANELS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-19-46;
e-mail: dmitriy.monich@mail.ru

Key words: sound insulation, resonant sound transmission, inertial sound transmission, self-coincidence of wave fields, frame-sheathing partition, anti-resonant panels.

A theoretical method for calculating sound insulation of a new type of soundproof enclosure, i.e. frame-sheathing partitions with anti-resonant panels is presented. The method is developed on the basis of the theory of self-coincidence of wave fields. It is intended for use in the design of soundproof enclosing structures between rooms of civil and industrial buildings. A comparison of the results of theoretical calculations and experimental measurements in laboratory conditions is presented.

REFERENCES

1. Wang J., Lu T. J., Woodhouse J., Langley R. S., Evans J. Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modelling // Journal of Sound and Vibration, 286, 2005. – P. 817–847.



2. Wyngaert J. C. E., Schevenels M., Reynders Edwin P. B. Predicting the sound insulation of finite double-leaf walls with a flexible frame // *Applied Acoustics*, 141, 2018. – P. 93–105.
3. Dymchenko V. V. Metod raschyota zvukoizolyatsii karkasno-obshivnykh peregorodok s ordinarnym karkasom [Method for calculating sound insulation of frame-sheathing partitions with a single frame] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2018. № 4. – P. 29–34.
4. Kochkin A. A., Ivanova A. V. Snizhenie shuma v pomescheniyakh pri ekspluatatsii i rekonstruktsii zdaniy [Noise control in rooms during the operation and reconstruction of buildings] // *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Vologoda State University. Series: Engineering]*. 2021. № 2. – P. 67–69.
5. Sedov M. S. Zvukoizolyatsiya [Sound insulation]. *Tekhnicheskaya akustika transportnykh mashin [Technical acoustic of transport vehicles]: spravochnik, L.G. Balishanskaya, L. F. Drozdova, N. I. Ivanov, et al.; pod red. N. I. Ivanova. Saint-Petersburg, 1992. Ch. 4. P. 68–105. – ISBN 5-7325-0090-1.*
6. Monich D. V. Metod raschyota zvukoizolyatsii karkasno-obshivnykh peregorodok [Calculation method of sound insulation of frame-sheathing partitions] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2021. № 4. – P. 30–39.
7. Patent RF. Zvukoizoliruyuschie ograzhdeniya [Soundproof enclosures]: № 2021129960: zayavl. 12.10.2021 / V. N. Boblyov, V. I. Erofeev, D. V. Monich, P. A. Grebnev, D. S. Kuzmin. Pravoobladatel Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t.
8. Monich D. V. Metod otsenki effektivnosti zvukoizoliruyuschikh lyogkikh ograzhdayuschikh konstruksiy [Method for assessing the effectiveness of sound insulating lightweight buildibg enclosures] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2021. № 4. – P. 17–29.
9. Kovinskaya S. I., Nikiforov A. S. O volnovodnoy izolyatsii izgibnykh voln [About waveguide insulation of flexural waves] // *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic journal]*. 1982. Vol. XXVIII, Issue 6. – P. 792–798.
10. Isakovich M. A., Kashina V. I., Tyutekin V. V. Eksperimentalnye issledovaniya vibroizolyatsii izgibnykh voln, sozdavaemoy impedansnymi sistemami [Experimental studies of vibration isolation of flexural waves created by impedance systems] // *Akusticheskii zhurnal [Acoustic journal]*. 1977. Vol. XXIII, № 3. – P. 384–389.
11. Klyukin I. I. Ob oslablenii voln izgiba v sterzhnyakh i plastinakh pri pomoschi rezonansnykh kolebatelnykh sistem [On the attenuation of bending waves in rods and plates using resonant vibrational systems] // *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic journal]*. 1960. Vol. VI, Issue 2. – P. 213–219.
12. Boblyov V. N. Grebnev P. A., Erofeev V. I., Monich D. V., Kuzmin D. S. Zvukoizolyatsiya odnosloynnykh lyogkikh peregorodok s antirezonansnymi panyami [Sound insulation of single-layer lightweight partitions with anti-resonant panels] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2021. № 3. – P. 46–55.

© Д. В. Монич, 2022

Получено: 27.12.2021 г.