

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 699.844

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-98-110

*В.И. ЕРОФЕЕВ<sup>1</sup>, Д.В. МОНИЧ<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>Филиал Федерального исследовательского центра  
«Институт прикладной физики Российской академии наук»  
Институт проблем машиностроения РАН,*

*<sup>2</sup>Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет*

## **РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОДНОСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ**

Обеспечение акустического комфорта в помещениях жилых, общественных и промышленных зданий является актуальной задачей строительной акустики. Существующие типы ограждающих конструкций часто не обеспечивают требуемой защиты от шума. Целью исследования является изучение резервов повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций конечных геометрических размеров при диффузном падении звука. Рассмотрение прохождения звука через ограждения выполнено на базе теории самосогласования волновых полей, разработанной научной школой профессора М.С. Седова. Приведены аналитические выражения для расчета предельной звукоизоляции ограждений, определяемой инерционным прохождением звука. Исследованы резервы повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций конечных размеров. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования. Показано, что однослойные и многослойные ограждающие конструкции конечных геометрических размеров обладают резервами повышения звукоизоляции, которые определяются соотношением собственной и предельной звукоизоляции. При проектировании звукоизолирующих ограждающих конструкций необходимо использовать резервы повышения звукоизоляции. Это позволяет повышать звукоизоляцию ограждений без значительного увеличения их массы и толщины. Области наибольших резервов повышения звукоизоляции на частотной шкале находятся вблизи резонансных частот: для однослойных ограждений – вблизи граничной частоты области полных пространственных резонансов; для многослойных сэндвич-панелей – вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса», а также вблизи граничной частоты области полных пространственных резонансов для облицовок.

**Ключевые слова:** звукоизоляция; ограждающие конструкции зданий; резонансное прохождение звука; инерционное прохождение звука; граничная частота области прохождения звука; резервы повышения звукоизоляции.

**Для цитирования:** Ерофеев В.И., Монич Д.В. Резервы повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций зданий //

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 98–110.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-98-110

V.I. EROFEEV<sup>1</sup>, D.V. MONICH<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>*Mechanical Engineering Research Institute  
of the Russian Academy of Sciences,*

<sup>2</sup>*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering*

## IMPROVEMENT POTENTIAL FOR SOUND INSULATION OF SINGLE- AND MULTILAYER WALL PANELS

**Relevance:** Acoustic comfort in residential, public and industrial buildings. Existing types of wall panels often do not provide the required noise control. **Purpose:** Investigation of the improvement potential for sound insulation of single- and multi-layer wall panels having finite geometric dimensions with diffuse sound lowering. **Design/methodology/approach:** Consideration of the sound propagation through the wall panel based on the theory of self-coordination of wave fields developed by the Prof. Sedov's scientific school. **Research findings:** Analytical equations for calculating the limiting sound insulation of the wall panels determined by the inertial sound propagation. The improvement potential for sound insulation of single- and multi-layer wall panels having finite dimensions. Comparison of theoretical and experimental results. It is shown that single- and multi-layer wall panels of finite geometric dimensions have improvement potential for sound insulation, which is determined by the ratio between their own and limiting sound insulation. **Practical implications:** Wall panel design must take into account the improvement potential for sound insulation. The sound insulation of wall panels is improved without increasing their mass and thickness. This is of great importance for design solutions for wall panels of civil and industrial buildings. **Originality/value:** The proposed method shows good agreement between experimental data and theoretical calculations. The improvement potential for sound insulation at the frequency level locates near the resonant frequencies, namely: near-boundary frequency of the full spatial resonance for single-layer wall panels; near-resonant frequency of the mass-elasticity-mass panels and near-boundary frequency of the full spatial resonance for multilayer wall panels and panel linings, respectively.

**Keywords:** sound insulation; wall panel; resonant sound propagation; inertial sound propagation; boundary frequency; improvement potential for sound insulation.

**For citation:** Erofeev V.I., Monich D.V. Rezervy povysheniya zvukoizolyatsii odnosloinykh i mnogosloinykh ogradhayushchikh konstruktsov zdaniy [Improvement potential for sound insulation of single- and multilayer wall panels]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 5. Pp. 98–110.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-98-110

### Введение

В настоящее время актуальной задачей является обеспечение акустического комфорта в помещениях жилых, общественных и промышленных зданий. Применяемые наружные и внутренние ограждающие конструкции часто не обеспечивают требуемой защиты от шума. Целью работы является исследование резервов повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций конечных геометрических размеров при диффузном падении звука. Это позволит разрабатывать рациональные конструктив-

ные решения звукоизолирующих ограждающих конструкций зданий и методы их расчета. Объектами исследования являются ограждающие конструкции зданий, на которые воздействует диффузное звуковое поле в слышимом диапазоне частот (воздушный шум):

1. Однослойные тонкие ограждения (пластины) конечных размеров, для которых преобладающий вклад в звукоизлучение вносят изгибные звуковые волны:  $h < \lambda_w/6$ , где  $h$  – толщина ограждения, м;  $\lambda_w$  – длина изгибной звуковой волны в ограждении, м. Звукоизоляцию ограждающих конструкций конечных геометрических размеров исследовали многие ученые: А. Шох [1], В.М.А. Пьютц [2], Р. Жос и К. Лямюр [3], М.Дж. Крокер и др. [4], К.А. Малхолланд и Р.Г. Лайон [5], В.И. Заборов [6], С.Н. Овсянников [7, 8].

2. Многослойные ограждения конечных размеров, состоящие из двух тонких пластин, связанных между собой изотропным упругим слоем, – бескаркасные сэндвич-панели. Одним из первых вопрос о прохождении звука через слоистые ограждения рассмотрел Л. Беранек [9]. В работах [10, 11] исследовано прохождение звука через многослойные бесконечные ограждающие конструкции. В работах [12–17] исследовались задачи о прохождении звука через сэндвич-панели с целью установить влияние на данный процесс различных физикомеханических факторов составных элементов рассматриваемых ограждений. Экспериментальные и теоретические исследования звукоизоляции сэндвич-панелей описываются в работах [18–24]. В работах Я. Лиу и др. [25, 26] разработана теоретическая модель прохождения звука через сэндвич-панели с воздушными промежутками между облицовками и средним слоем. Исследования звукоизоляции слоистых ограждений с вибродемпфирующими слоями проведены А.А. Кочкиным [27].

### Методы исследования

Теория самосогласования волновых полей, разработанная научной школой профессора М.С. Седова [28, 29], устанавливает механизм прохождения звука через ограждающие конструкции с двумя типами волн: резонансное прохождение звука и инерционное прохождение звука. Это позволяет определить предельную звукоизоляцию ограждения с заданными поверхностной плотностью ( $\mu$ , кг/м<sup>2</sup>) и геометрическими размерами: длина  $a$ , м; высота  $b$ , м.

Экспериментальные исследования звукоизоляции ограждающих конструкций проводились в реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ по стандартной методике ГОСТ 27296–2012.

### Результаты исследования

1. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций.

Звуковые волны, падающие со стороны источника шума, образуют в плоскости ограждения поле звукового давления, которое возбуждает в нем изгибные колебания. Волновое поле смещений пластины формируется двумя типами волн [28]: 1) свободными упругими волнами, которые обеспечивают резонансное прохождение звука в режиме собственных колебаний; 2) инерци-

онными (вынужденными) волнами, которые обеспечивают инерционное прохождение звука.

Данное рассмотрение позволяет записать выражение для звукоизоляции ограждающей конструкции ( $R$ , дБ) в следующем виде [28]:

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

где  $\tau_r$  – коэффициент резонансного прохождения звука;  $\tau_i$  – коэффициент инерционного прохождения звука.

На рис. 1 приведена обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного тонкого ограждения, построенная по теории самосогласования волновых полей. Рассматриваемый частотный диапазон разделен граничными частотами на отдельные области прохождения звука:  $f_{bm0n0}$  – граничная частота области простых пространственных резонансов (ПрПР);  $f_{bmn0}$  – граничная частота области неполных пространственных резонансов (НПР);  $f_{bmn}$  – граничная частота области полных пространственных резонансов (ППР);  $f_{ri}$  – граничная частота инерционного прохождения звука.

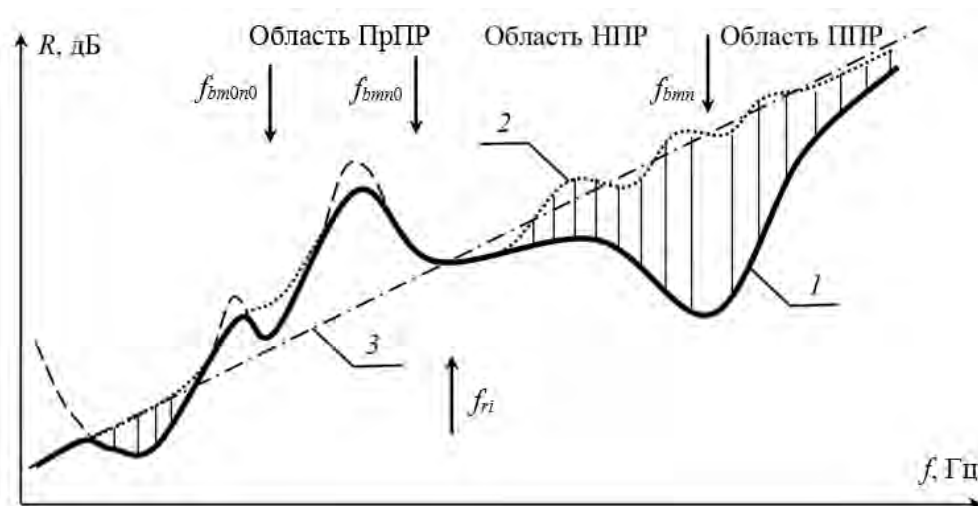


Рис. 1. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения конечных размеров:

1 – резонансное прохождение звука; 2 – инерционное прохождение звука; 3 – закон массы

Резонансное прохождение звука через ограждение определяется потерями энергии на рассеивание в материале (коэффициент потерь  $\eta$ ) и степенью самосогласования собственного волнового поля со звуковыми полями в воздушной среде с обеих сторон ограждения ( $A_1$  и  $A_2$  – в помещении с источником шума и в защищаемом от шума помещении соответственно) [28].

Распространение инерционных волн происходит со скоростью следа падающей звуковой волны и не зависит от упругих характеристик материала, а определяется только поверхностной плотностью ограждения ( $\mu$ , кг/м<sup>2</sup>) и его

геометрическими размерами (длина  $a$ , м; высота  $b$ , м). Инерционные и свободные упругие волны различаются начальной фазой движения [28].

Коэффициент резонансного прохождения звука в области частот ниже граничной частоты ППР ( $f < f_{bmn}$ ) определяется из выражения [28]:

$$\tau_r = \frac{1}{\frac{2,3 \cdot \pi}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot A^4} \mu^2 f^2 \eta \cos \theta_1 \cos \theta_{2r} + 1}, \quad (2)$$

где  $\rho_0 c_0$  – характеристический импеданс воздушной среды, кг/м<sup>2</sup>с;  $A^4 = A_1^2 \cdot A_2^2$  – характеристика самосогласования собственного волнового поля со звуковыми полями в воздушной среде с обеих сторон ограждения;  $\mu$  – поверхностная плотность ограждения, кг/м<sup>2</sup>;  $f$  – текущая частота звука, Гц;  $\eta$  – коэффициент потерь материала ограждения;  $\theta_1$  – угол падения звуковых волн на ограждение, град (для диффузного звукового поля используется усредненное значение  $\theta_1 = \theta_{cp} = 51^\circ, 76$  [28]);  $\theta_{2r}$  – угол излучения звуковых волн в режиме собственных колебаний, град.

Коэффициент инерционного прохождения звука определяется [28] как

$$\tau_i = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot F_i^2} \mu^2 f^2 \cos \theta_1 \cos \theta_{2i} + 1}, \quad (3)$$

где  $F_i$  – функция отклика ограждающей конструкции в режиме инерционных колебаний;  $\theta_{2i}$  – угол излучения инерционными волнами;  $\rho_0 c_0$ ,  $\mu$ ,  $f$ ,  $\theta_1$  – см. формулу (2).

На основании формул (1), (2), (3) можно записать выражение звукоизоляции однослойного ограждения в области частот ниже граничного ППР ( $f < f_{bmn}$ ) [28]:

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

где  $\rho_0 c_0$ ,  $\mu$ ,  $f$ ,  $\eta$ ,  $A^4$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_{2r}$  – см. формулу (2);  $F_i$ ,  $\theta_{2i}$  – см. формулу (3).

В знаменателе формулы (4) первое слагаемое в круглых скобках характеризует инерционное прохождение звука через ограждение, а второе слагаемое – резонансное прохождение звука. Когда основной вклад в излучение звука вносят инерционные волны (резонансное прохождение отсутствует,  $\tau_r = 0$ ), данная формула имеет вид [28]:

$$R_{\max} = 10 \lg \frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 \cdot f^2}{\left( \frac{F_i^2}{\cos \theta_1 \cos \theta_{2i}} \right)}, \quad (5)$$

где  $\rho_0 c_0$ ,  $\mu$ ,  $f$ ,  $\theta_1$  – см. формулу (2);  $F_i$ ,  $\theta_{2i}$  – см. формулу (3).

Формула (5) выражает предельную звукоизоляцию однослойной ограждающей конструкции с заданной поверхностной плотностью и геометриче-

скими размерами ( $R_{\max}$ , дБ). На рис. 1 нанесены кривые, соответствующие инерционному и резонансному прохождению звука через однослойное ограждение. Заштрихованная область между ними обозначает резервы повышения звукоизоляции за счет снижения резонансного прохождения звука ( $\tau_r$ ).

Собственная звукоизоляция реального ограждения всегда меньше своих предельных значений из-за наличия резонансной составляющей прохождения звука ( $\tau_r$ ). Большинство ограждающих конструкций, применяемых при проектировании зданий, обладают резонансными свойствами, которые в большей или меньшей степени снижают их звукоизоляцию в нормируемом диапазоне частот.

Резервы повышения звукоизоляции ограждающей конструкции конечных геометрических размеров – это разница между собственной звукоизоляцией ограждения и ее предельными значениями [30]:

$$\Delta r = R_{\max} - R, \quad (6)$$

где  $R_{\max}$  – предельная звукоизоляция однослойной ограждающей конструкции конечных размеров, определяемая по формуле (5), дБ;  $R$  – собственная звукоизоляция однослойной ограждающей конструкции конечных размеров, определяемая по формуле (4).

На рис. 2 представлены частотные характеристики звукоизоляции рассматриваемого ограждения из гипсоволокнистого листа (ГВЛ). Здесь  $f_{bmn0}$  – граничная частота области неполных пространственных резонансов (НПР),  $f_{bmn}$  – граничная частота области полных пространственных резонансов (ППР).

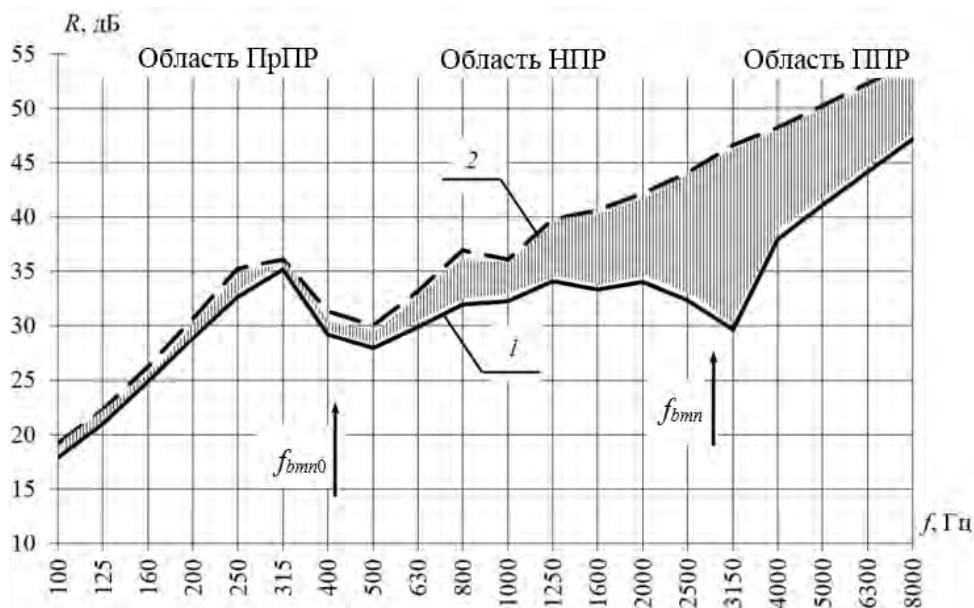


Рис. 2. Теоретические частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ( $a \times b = 1,0 \times 0,5$  м,  $h = 12,5$  мм,  $\mu = 14,3$  кг/м<sup>2</sup>):

1 – собственная звукоизоляция; 2 – предельная звукоизоляция

Заштрихованная область между кривыми 1 и 2 обозначает резервы повышения звукоизоляции за счет снижения резонансного прохождения звука. Одним из способов использования резервов повышения звукоизоляции для однослойных ограждений является изменение цилиндрической жесткости при неизменной массе (ослабление поперечного сечения) [30].

На рис. 3 представлено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Измерения звукоизоляции образца из ГВЛ проведены в малых реверберационных камерах ННГАСУ по стандартной методике ГОСТ 27296–2012. Диапазон частот был выбран исходя из значения граничной частоты диффузности камеры низкого уровня ( $f_{\text{diff}} = 588$  Гц).

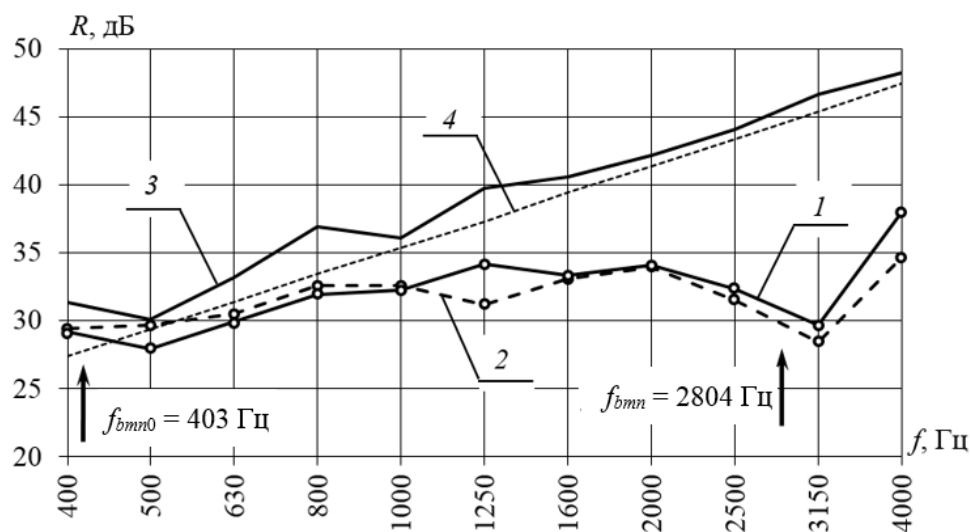


Рис. 3. Частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ( $a \times b = 1,0 \times 0,5$  м,  $h = 12,5$  мм,  $\mu = 14,3$  кг/м<sup>2</sup>):

1 — теоретические значения собственной звукоизоляции; 2 — экспериментальные значения собственной звукоизоляции; 3 — теоретические значения предельной звукоизоляции; 4 — теоретические значения собственной звукоизоляции по закону массы

Измеренные значения звукоизоляции имеют хорошую сходимость с теоретическими значениями, определенными по формуле (1), расхождения составляют 1–3 дБ. Значения граничных частот областей НПР и ППР соответствуют диапазонам снижения звукоизоляции на экспериментальной частотной характеристике.

## 2. Резервы повышения звукоизоляции бескаркасных сэндвич-панелей.

Сэндвич-панели широко применяются при проектировании различных типов зданий в качестве быстровозводимых перегородок в офисных и административных помещениях со свободными планировками, в малоэтажном строительстве, а также при изготовлении звукоизолирующих кабин наблюдения и кожухов для шумного технологического оборудования в производственных цехах.

В настоящей работе объектами исследования являются ограждения общей толщиной 50–150 мм, состоящие из двух тонких одинаковых облицовок, между которыми расположен средний слой из изотропного упругого материала (пенопласт, минеральная вата и др.). В качестве облицовок панелей используются тонкие листовые материалы из гипсоволокнистых листов (ГВЛ), цементно-стружечных плит (ЦСП), ориентированно-стружечных плит (ОСП) толщиной  $h = 10\text{--}16$  мм, для которых выполняется условие  $h < \lambda_n/6$ . Стандартное конструктивное решение сэндвич-панелей предполагает склеивание облицовок и среднего слоя по всей площади поверхности.

На рис. 4 приведены обобщенные частотные характеристики собственной и предельной звукоизоляции бескаркасной сэндвич-панели. Здесь  $f_{bmn0}$  – граничная частота области неполных пространственных резонансов (НПР),  $f_{bmn}$  – граничная частота области полных пространственных резонансов (ППР);  $f_{msm}$  – резонансная частота системы «масса – упругость – масса». Заштрихованная область обозначает резервы повышения звукоизоляции для данного типа многослойных ограждений.

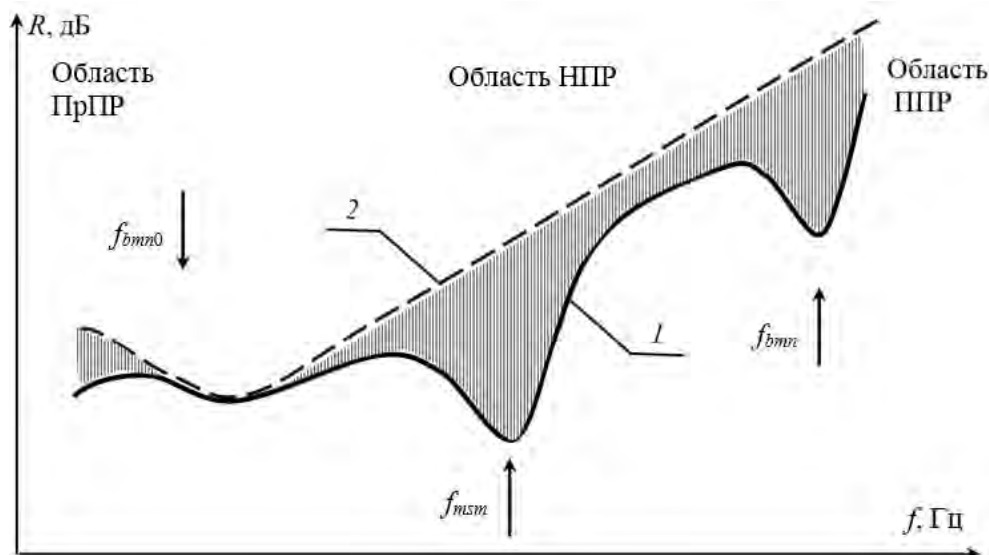


Рис. 4. Обобщенные частотные характеристики звукоизоляции бескаркасной сэндвич-панели конечных геометрических размеров:

1 – собственная звукоизоляция; 2 – предельная звукоизоляция

Коэффициент прохождения звука для данного типа ограждений определяется по формуле [28]:

$$\tau = \tau_{er} + \tau_{ei} + \tau_{1r}\tau_{2r} + \tau_{1i}\tau_{2i}, \quad (7)$$

где индекс «e» означает прохождение звука через внешние облицовки с упругой связью между ними; индекс «r» – резонансное прохождение звука; индекс «i» – инерционное прохождение звука; индексы «1», «2» – порядковые номера облицовок (облицовка «1» расположена со стороны помещения с источником шума).



Когда основной вклад в излучение звука вносят инерционные волны (резонансное прохождение отсутствует,  $\tau_r = 0$ ), предельная звукоизоляция бескаркасной сэндвич-панели конечных геометрических размеров с учетом значения характеристического импеданса воздушной среды ( $\rho_0 c_0 = 420 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ) определяется по формуле [22]:

$$R_{\max} = 10 \log \left( \left[ \frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1i}^2} + 1 \right] \left[ \frac{6 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{F_{2i}^2} + 1 \right] \right), \quad (8)$$

где  $f$  – текущая частота звука, Гц;  $\mu_1$  – поверхностная плотность одной облицовки,  $\text{кг/м}^2$ ;  $\theta_2$  – угол падения звуковых волн на вторую облицовку, град;  $F_{1i}$  – функция отклика первой облицовки, на которую падет звук;  $F_{2i}$  – функция отклика второй облицовки.

Можно видеть, что предельная звукоизоляция сэндвич-панели определяется поверхностной плотностью облицовок, углом падения звука на вторую облицовку, а также величинами функции отклика первой и второй облицовок, которые, в свою очередь, определяются размерами ограждения (длина  $a$ , м; высота  $b$ , м).

На рис. 5 представлено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

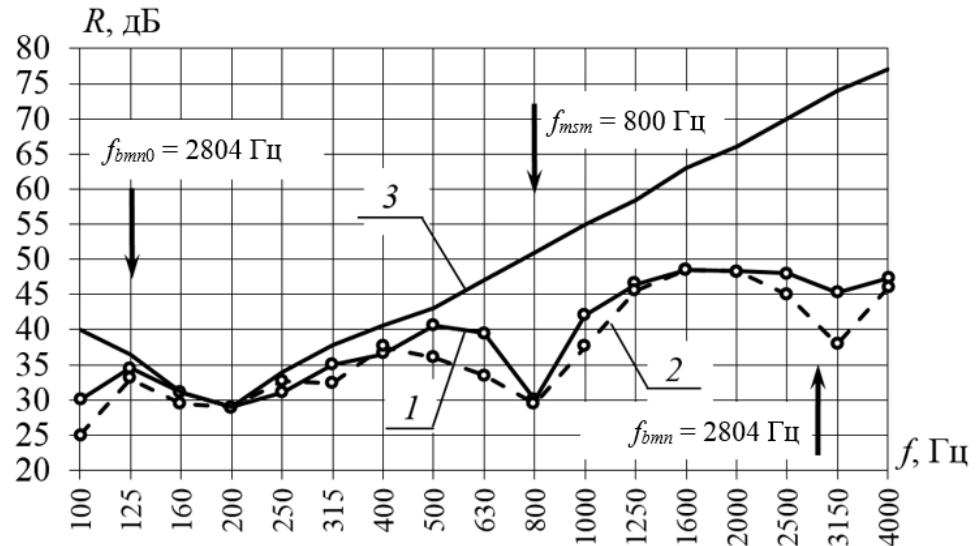


Рис. 5. Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасной сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм ( $a \times b = 2,0 \times 1,2$  м, общая толщина  $h = 75$  мм, облицовки склеены со средним слоем,  $\mu = 29,6 \text{ кг/м}^2$ ):

1 – теоретические значения собственной звукоизоляции; 2 – экспериментальные значения собственной звукоизоляции; 3 – теоретические значения предельной звукоизоляции

Измерения звукоизоляции образца сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ проведены в реверберационных камерах ННГАСУ по стандартной методике

ГОСТ 27296–2012. Измеренные значения звукоизоляции в основном имеют хорошую сходимость с теоретическими значениями, определенными по формуле (7), расхождения составляют 1–3 дБ. Расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями вблизи резонансной частоты «масса – упругость – масса» (500, 630, 1000 Гц) составляют 3–5 дБ, что вызвано погрешностями теоретической модели по учету склеивания облицовок и среднего слоя. Расхождения вблизи граничной частоты ППР (3150 Гц) вызваны неполными данными по значениям коэффициента потерь материала облицовок.

Значения граничных частот областей НПР и ППР, а также резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» соответствуют диапазонам снижения звукоизоляции на экспериментальной частотной характеристике.

### Заключение

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно видеть, что однослойные и многослойные ограждающие конструкции конечных геометрических размеров обладают резервами повышения звукоизоляции, которые определяются соотношением собственной и предельной звукоизоляции. Предельная звукоизоляция однослойных ограждений определяется поверхностной плотностью ( $\mu$ , кг/м<sup>2</sup>) и геометрическими размерами (длина  $a$ , м; высота  $b$ , м). Предельная звукоизоляция бескаркасных сэндвич-панелей определяется поверхностной плотностью облицовок, углом падения звука на вторую облицовку и геометрическими размерами ограждения (длина  $a$ , м; высота  $b$ , м).

Области наибольших резервов повышения звукоизоляции на частотной шкале находятся вблизи резонансных частот:

- 1) для однослойных ограждений – вблизи граничной частоты области полных пространственных резонансов ( $f_{bmn}$ );
- 2) для многослойных сэндвич-панелей – вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_{msm}$ ), а также вблизи граничной частоты области полных пространственных резонансов для облицовок ( $f_{bmn}$ ).

При проектировании звукоизолирующих ограждающих конструкций гражданских и промышленных зданий необходимо использовать резервы повышения их звукоизоляции. Это позволит получать рациональные конструктивные решения ограждений без увеличения их массы и толщины.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schoch A. Zum einfluss der Seitlichen begrenzung auf die Schalldurchlässigkeit einfacher Wände // *Acustica*. 1954. V. 4. S. 288–290.
2. Peutz V.M.A. Some fundamental measurements on single and double plate structures // *Proceedings of the 1st ICA-Congress Electroacoustics*. 1953. P. 281–284.
3. Josse R., Lamure C. Transmission du son par une paroi simple // *Acustica*. 1964. V. 14. S. 266–280.
4. Крокер М.Дж., Баттачария М.К., Прайс А.Дж. Расчет прохождения звука и вибрации через перегородки и соединительные стержни при помощи статистического энергетического метода // *Конструирование и технология машин* : пер. с англ. 1971. 93. В. 3. С. 11–18.
5. Mulholland K.A., Lyon R.H. Sound insulation at low frequencies // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1973. V. 54. № 4. P. 867–878.

6. Заборов В.И., Лалаев Э.М., Никольский В.Н. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях. Москва : Стройиздат, 1979. 254 с.
7. Ovsyannikov S.N., Koshkin Y.G., Fatyanova A.P. The prediction of sound and vibration in a building using the method of statistical energy analysis // 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, KORUS 2004. Tomsk, 2004. P. 331–335.
8. Лелюга О.В., Овсянников С.Н., Шубин И.Л. Исследование звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций с учетом структурной звукопередачи // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 7. С. 39–43.
9. Beranek L., Work G. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets // Journal of Acoustical Society of America. 1949. V. 21. № 4. P. 419–428.
10. Заборов В.И., Клячко Л.Н., Новиков И.И. О звукоизоляции трехслойными конструкциями // Акустический журнал. 1984. Т. XXX. Вып. 4. С. 482–485.
11. Karczmarzyk S. Local model of plane acoustic waves propagation in multilayered infinite sandwich structures // Archives of Mechanics. 2011. 63. 5–6. P. 573–598.
12. Moore J.A., Lyon R.H. Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions // Journal of Acoustical Society of America. 1991. 89. P. 777–791.
13. Bolton J.S., Shlau N.M., Kang Y.J. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials // Journal of Sound and Vibration. 1996. 191. 3. P. 317–347.
14. Zhou J., Bhaskar A., Zhang X. Sound transmission through a double-panel construction lined with poroelastic material in the presence of mean flow // Journal of Sound and Vibration. 2013. 332. P. 3724–3734.
15. Dym C.L., Lang M.A. Transmission of sound through sandwich panels // Journal of Acoustical Society of America. 1974. V. 56. № 5. P. 1525–1532.
16. Lang M.A., Dym C.L. Optimal acoustic design of sandwich panels. Part 2 // Journal of Acoustical Society of America. 1975. V. 57. № 6. P. 1481–1487.
17. Dijkmans A., Vermeir G. Optimization of the acoustic performances of lightweight sandwich roof elements // INTER-NOISE-2009. Ottawa, Canada. P. 23–26.
18. Thamburaj P., Sun J.Q. Optimization of Anisotropic Sandwich Beams for Higher Sound Transmission Loss // Journal of Sound and Vibration. 2001. V. 254. P. 23–36.
19. Wawrzynowicz A., Krzaczek M., Tejchman J. Experiments and FE analyses on airborne sound properties of composite structural insulated panels // Archives of Acoustics. 2014. V. 39. № 3. P. 351–364.
20. Bobylyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Experimental study of sound insulation in multilayer enclosing structures // Noise Control Engineering Journal. 2014. 62 (5). P. 354–355.
21. Гребнев П.А. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (49). С. 109–118.
22. Гребнев П.А. Звукоизоляция ограждающих конструкций зданий из сэндвич-панелей : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2016. 21 с.
23. Яблоник Л.Р. Упрощенный метод расчета многослойной звукоизоляции, включающей слои волокнистого пористого материала // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 5. С. 639–646.
24. Зверев А.А., Черных В.В. Экспериментальное определение акустических и виброакустических характеристик многослойных композитных панелей // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 6. С. 727–736.
25. Liu Y., Catalan J.-C. External mean flow influence on sound transmission through finite clamped double-wall sandwich panels // Journal of Sound and Vibration. 2017. 405. P. 269–286.
26. Liu Y., Catalan J.-C. Effects of external and air gap flows on sound transmission through finite clamped double-panel sandwich structures // Composite Structures. 2018. 203. P. 286–299.
27. Кочкин А.А. Исследование влияния физико-механических характеристик слоистых элементов с вибродемпфирующими слоями на звукоизоляцию непрозрачных ограждающих конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 3. С. 111–116.

28. Седов М.С. Звукоизоляция // Техническая акустика транспортных машин : справочник / под ред. Н.И. Иванова. Санкт-Петербург : Политехника, 1992. Гл. 4. С. 68–106.
29. Sedov M.S. Effect of breaking free waves in thin plates of double construction // Proceedings of Fourth international congress on sound and vibration / Ed. M.J. Crocker, N.I. Ivanov. Saint Petersburg, 1996. P. 1073–1076.
30. Бобылев В.Н., Монич Д.В., Тишков В.А., Гребнев П.А. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. 118 с.

## REFERENCES

1. Schoch A. Zum Einfluss der Seitlichen Begrenzung auf die Schalldurchlässigkeit einfacher Wände. *Acustica*. 1954. V. 4. Pp. 288–290.
2. Peutz V.M.A. Some fundamental measurements on single and double plate structures. *Proc. 1st ICA-Congress Electroacoustics*. Netherlands. 1953. Pp. 281–284.
3. Josse R., Lamure C. Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*. 1964. V. 14. Pp. 266–280.
4. Price A.J., Crocker M.J. Sound transmission through double panels using statistical energy analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1970. V. 47. Pp. 683–693.
5. Mulholland K.A., Lyon R.H. Sound insulation at low frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1973. V. 54. No. 4. Pp. 867–878.
6. Zaborov V.I., Lalaev E.M., Nikol'skii V.N. Zvukoizolyatsiya v zhilykh i obshchestvennykh zdaniyakh. Moscow: Stroiizdat [Sound insulation in residential and public buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 254 p. (rus)
7. Ovsyannikov S.N., Koshkin Y.G., Fatyanova A.P. The prediction of sound and vibration in a building using the method of statistical energy analysis. *Proc. 7th Russ.-Korean Int. Symp. 'Science and Technology'*. Tomsk, 2004. Pp. 331–335.
8. Lelyuga O.V., Ovsyannikov S.N., Shubin I.L. Issledovanie zvukoizolyatsii vnutrennikh ograzhdayushchikh konstruktssii s uchetom strukturnoi zvukoperedachi [Sound insulation of wall systems with regard to sound transmission]. *Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. 2018. No. 7. Pp. 39–43. (rus)
9. Beranek L., Work G. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets. *Journal of Acoustical Society of America*. 1949. V. 21. No. 4. Pp. 419–428.
10. Zaborov V.I., Klyachko L.N., Novikov I.I. O zvukoizolyatsii trekhslainymi konstruktssiyami [Sound insulation of three-layer wall panels]. *Akusticheskii zhurnal*. 1984. V. 30. No. 4. Pp. 482–485. (rus)
11. Karczmarzyk S. Local model of plane acoustic waves propagation in multilayered infinite sandwich structures. *Archives of Mechanics*. 2011. 63. 5–6. Pp. 573–598.
12. Moore J.A., Lyon R.H. Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions. *Journal of Acoustical Society of America*. 1991. V. 89. Pp. 777–791.
13. Bolton J.S., Shlau N.M., Kang Y.J. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials. *Journal of Sound and Vibration*. 1996. 191. 3. Pp. 317–347.
14. Zhou J., Bhaskar A., Zhang X. Sound transmission through a double-panel construction lined with poroelastic material in the presence of mean flow. *Journal of Sound and Vibration*. 2013. V. 332. Pp. 3724–3734.
15. Dym C.L., Lang M.A. Transmission of sound through sandwich panels. *Journal of Acoustical Society of America*. 1974. V. 56. No. 5. Pp. 1525–1532.
16. Lang M.A., Dym C.L. Optimal acoustic design of sandwich panels. Part 2. *Journal of Acoustical Society of America*. 1975. V. 57. No. 6. Pp. 1481–1487.
17. Dijkmans A., Vermeir G. Optimization of the acoustic performances of lightweight sandwich roof elements. INTER-NOISE-2009, Ottawa, Canada. Pp. 23–26.
18. Thamburaj P., Sun J.Q. Optimization of anisotropic sandwich beams for higher sound transmission loss. *Journal of Sound and Vibration*. 2001. V. 254. Pp. 23–36.
19. Wawrzynowicz A., Krzaczek M., Tejchman J. Experiments and FE analyses on airborne sound properties of composite structural insulated panels. *Archives of Acoustics*. 2014. V. 39. No. 3. Pp. 351–364.

20. Boblyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Experimental study of sound insulation in multilayer enclosing structures. *Noise Control Engineering Journal*. 2014. V. 62 (5). Pp. 354–355.
21. Grebnev P.A. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya zvukoizolyatsii beskarkasnykh ograzhdayushchikh konstruktov iz sendvich-panelei [Theoretical and experimental studies of sound insulation of insulating properties of frameless sandwich wall panels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 2 (49). Pp. 109–118. (rus)
22. Grebnev P.A. Zvukoizolyatsiya ograzhdayushchikh konstruktov zdaniy iz sendvich-panelei : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Sound insulation of building envelopes made of sandwich panels. PhD Abstract]. Nizhny Novgorod, 2016. 21 p. (rus)
23. Yablonik L.R. Uproshchennyi metod rascheta mnogosloynoi zvukoizolyatsii, vlyuchayushchei sloi voloknistogo poristogo materiala [Simplified method for calculating multilayer sound insulation including layers of fibrous porous material]. *Akusticheskii zhurnal*. 2018. V. 64. No. 5. Pp. 639–646. (rus)
24. Zverev A.Ya., Chernykh V.V. Eksperimental'noe opredelenie akusticheskikh i vibroakusticheskikh kharakteristik mnogosloynnykh kompozitnykh panelei [Experimental determination of acoustic and vibroacoustic characteristics of multilayer composite panels]. *Akusticheskii zhurnal*. V. 64. No. 6. Pp. 727–736. (rus)
25. Liu Y., Catalan J.-C. External mean flow influence on sound transmission through finite clamped double-wall sandwich panels. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. V. 405. Pp. 269–286.
26. Liu Y., Catalan J.-C. Effects of external and air gap flows on sound transmission through finite clamped double-panel sandwich structures. *Composite Structures*. 2018. V. 203. Pp. 286–299.
27. Kochkin A.A. Issledovanie vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik sloistykh elementov s vibrodempfiruyushchimi sloyami na zvukoizolyatsiyu neprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruktov [The influence of the physical and mechanical characteristics of layered elements with vibration-damping layers on the sound insulation of opaque enclosing structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 3. Pp. 111–116. (rus)
28. Sedov M.S. Zvukoizolyatsiya [Sound insulation]. In: Tekhnicheskaya akustika transportnykh mashin: spravochnik [Technical acoustics of transport vehicles: a reference book]. N.I. Ivanov, Ed. Saint-Petersburg: Politehnika, 1992. No. 4. Pp. 68–106. (rus)
29. Sedov M.S. Effect of breaking free waves in thin plates of double construction. *Proceedings of Fourth international congress on sound and vibration*. M.J. Crocker and N.I. Ivanov, Eds. Saint-Petersburg. 1996. Pp. 1073–1076.
30. Bobylev V.N., Monich D.V., Tishkov V.A., Grebnev P.A. Rezervy povysheniya zvukoizolyatsii odnosloynnykh ograzhdayushchikh konstruktov [Improvement of sound insulation of single-layer wall systems]. Nizhny Novgorod, 2014. 118 p. (rus)

#### Сведения об авторах

Ерофеев Владимир Иванович, докт. физ.-мат. наук, профессор, филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» Институт проблем машиностроения РАН, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, erof.vi@yandex.ru

Мониц Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, dmitriy.monich@mail.ru

#### Authors Details

Vladimir I. Erofeev, DSc, Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 85, Belinskii Str., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, erof.vi@yandex.ru

Dmitriy V. Monich, PhD, A/Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia, dmitriy.monich@mail.ru