

УДК 699.844

ГРЕБНЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ, зав. лабораторией,
p.grebnev@mail.ru
Нижегородский государственный архитектурно-строительный
университет,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ БЕСКАРКАСНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ*

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований звукоизоляции бескаркасных ограждений из сэндвич-панелей, предназначенных для применения в гражданском и промышленном строительстве. Описан способ расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров при воздействии диффузного звука. Определены способы повышения звукоизоляции данного типа ограждающих конструкций. Представлено рациональное конструктивное решение бескаркасного ограждения из сэндвич-панелей, и приведены результаты исследований его звукоизоляции в натурных условиях.

Ключевые слова: звукоизоляция; бескаркасные ограждения; воздушный шум; сэндвич-панель; самосогласование волновых полей.

PAVEL A. GREBNEV, Head of Laboratory,
p.grebnev@mail.ru
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
65, Il'inskaya STR., 603950, Nizhnii Novgorod, Russia

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF INSULATING PROPERTIES OF FRAMELESS SANDWICH WALL PANELS

The paper presents the theoretical and experimental research results on sound insulating properties of frameless sandwich panels intended for the use in civil and industrial construction. A method of calculating the sound insulation of sandwich panels of finite size is suggested herein. Methods for improving the sound insulation of the given walls are considered at the diffused sound exposure. Also, the rational design solution of frameless sandwich panels and test results of its insulation under natural conditions are presented in this paper.

Keywords: sound insulation; frameless wall panel; airborne sound; sandwich panel; self-consistency of wave fields.

* Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Исследования звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий с учетом двойственной природы прохождения звука» (код проекта 3038) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания на научные исследования.

Актуальным направлением в архитектурно-строительном проектировании является снижение массы внутренних ограждающих конструкций (стен, перегородок). Это позволяет уменьшить нагрузку на несущие конструкции зданий и снизить материалоемкость строительства. При этом необходимо обеспечить выполнение требований по звукоизоляции ограждающих конструкций. Данную задачу позволяет решить применение многослойных бескаркасных конструкций на основе сэндвич-панелей, имеющих внешние облицовки и слой жесткого легкого заполнителя между ними. Применение жесткого заполнителя позволяет обеспечить выполнение требований по прочности и устойчивости конструкций без устройства внутреннего каркаса, что дает возможность повысить скорость монтажа и снизить его трудоемкость.

Одним из первых вопрос о прохождении звука через многослойные ограждения рассмотрел Л. Беранек [1]. Прохождение звука через многослойные бесконечные ограждающие конструкции исследовалось в работе [2]. В работах [3–7] представлены задачи о прохождении звука через сэндвич-панели. Экспериментальные исследования звукоизоляции сэндвич-панелей с целью оптимизации их параметров описываются в работе [8].

Звукоизоляция конечных размеров может быть определена по теории самосогласования волновых полей, разработанной научной школой профессора М.С. Седова. Расчет производится на основе методики определения звукоизоляции двойных ограждений с воздушным промежутком [9]. Здесь принято допущение, что звукоизоляция данного типа ограждений в диапазоне неполных пространственных резонансов является предельной звукоизоляцией для трехслойных сэндвич-панелей с аналогичными геометрическими параметрами.

При этом коэффициент прохождения звука определяется по формуле [9]

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

где индекс «п» означает прохождение звука через пластины с упругой связью между собой; индекс «и» – инерционное прохождение через первую пластину, воздушный промежуток и вторую пластину; индекс «с» – резонансное прохождение звука через первую пластину и вторую пластину.

Отличие расчета сэндвич-панели от расчета двухслойного ограждения с воздушным промежутком состоит в том, что скорость распространения упругих волн изменяет свое значение за счет наличия среднего слоя, соединяющего облицовки. Для определения коэффициентов прохождения $\tau_{п.с}$ и $\tau_{п.и}$ необходимо рассчитать скорость распространения бегущей волны в трехслойной сэндвич-панели. На рис. 1 показаны дисперсионные кривые трехслойной пластины с облицовками из гипсоволокнистых листов (ГВЛ) толщиной по 12,5 мм (плотность $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$), средним слоем из жесткого пенополистирола толщиной 50 мм (плотность $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$), общие размеры ограждения $2000 \times 1200 \text{ мм}$.

Скорость сдвиговых волн среднего слоя значительно влияет на итоговую скорость волн для сэндвич-панели в диапазоне от 100 Гц до резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» $f_p = 800 \text{ Гц}$.

Резонансная частота системы для сэндвич-панели определяется по известной формуле:

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{E_d(m'_1 + m'_2)}{dm'_1 m'_2}}, \quad (2)$$

где E_d – динамический модуль упругости материала среднего слоя сэндвич-панели; d – толщина среднего слоя; m'_1 и m'_2 – поверхностные плотности первой и второй облицовки соответственно. Для рассматриваемой сэндвич-панели $f_p = 800$ Гц.

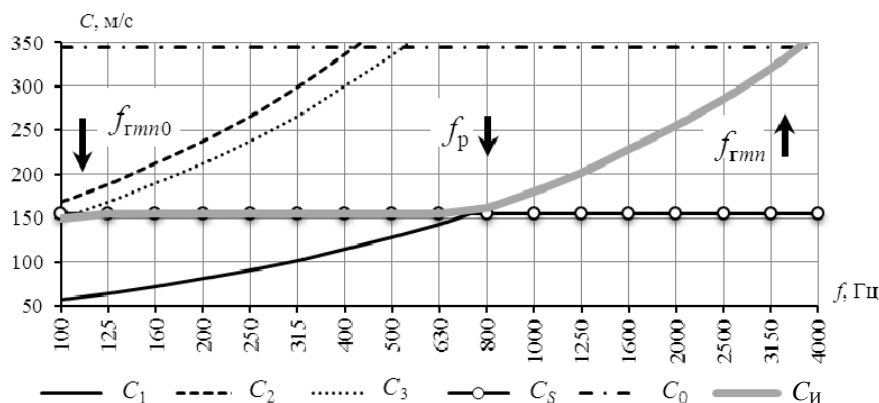


Рис. 1. Дисперсионная кривая сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенополистирола толщиной 50 мм (размеры образца 1200×2000 мм):

C_i – скорость распространения бегущей волны; C_0 – скорость звука в воздухе; C_s – скорость сдвиговых волн среднего слоя, нагруженного массами облицовок; C_1 ; C_2 ; C_3 – скорости изгибных волн в условных однослойных пластинах с различными цилиндрическими жесткостями [10–11].

Полученные в результате вычислений коэффициенты прохождения звука через трехслойное ограждение приведены на рис. 2.

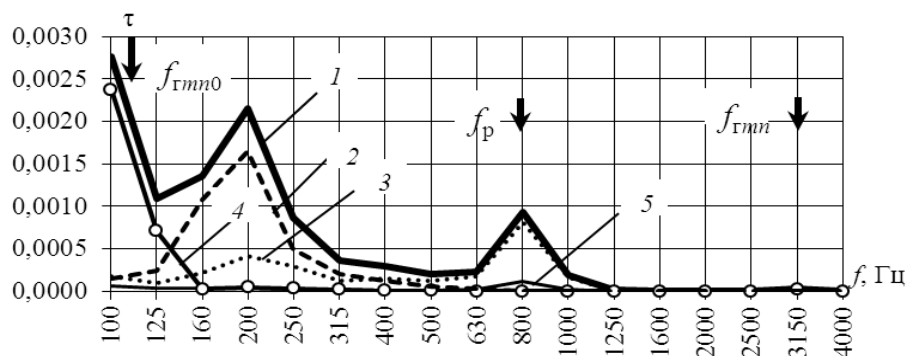


Рис. 2. Коэффициенты прохождения звука через сэндвич-панель с облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенополистирола толщиной 50 мм (размеры 2000×1200 мм):

1 – τ ; 2 – $\tau_{1n}\tau_{2n}$; 3 – $\tau_{п.н}$; 4 – $\tau_{1c}\tau_{2c}$; 5 – $\tau_{п.с}$

На рис. 3 представлено сравнение теоретической частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панели общей толщиной 75 мм с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования проведены в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ. Облицовки исследуемого образца сэндвич-панели выполнены из ГВЛ толщиной по 12,5 мм и склеены эпоксидным клеем со средним слоем из пенополистирола ПСБ-С-15У толщиной 50 мм (склейка по всей площади).

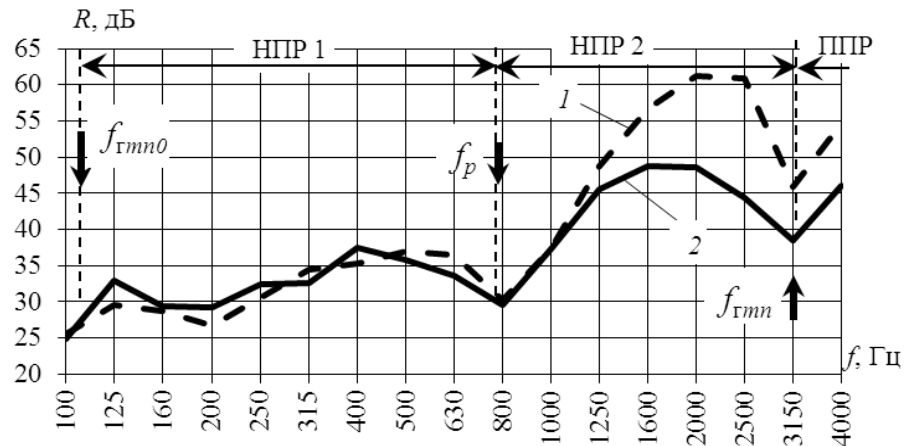


Рис. 3. Частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панели размерами 2000×1200 мм (облицовки ГВЛ толщиной по 12,5 мм, средний слой – пенополистирол):
1 – теория; 2 – эксперимент

Для удобства анализа область неполных пространственных резонансов (НПР) условно разделена на две подобласти: НПР1 (от $f_{гmn0}$ до f_p) и НПР2 (от f_p до $f_{гmn}$). Анализируя рис. 3, можно видеть, что в области НПР1 результаты теоретического расчета хорошо согласуются с экспериментально полученными значениями звукоизоляции. В области НПР2 хорошая сходимость результатов отмечается в диапазоне частот 800÷1250 Гц. В диапазоне 1250÷3150 Гц теоретически полученные значения превышают экспериментальные на 3÷15 дБ. В области полных пространственных резонансов (ППР) теоретически полученные значения превышают экспериментальные на 8 дБ.

В настоящее время в лаборатории акустики ННГАСУ ведется разработка новых типов бескаркасных звукоизолирующих перегородок на основе сэндвич-панелей [12]. В ходе экспериментальных и теоретических исследований звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций установлено, что основным фактором, негативно влияющим на звукоизоляцию сэндвич-панелей, является резкое увеличение прохождения звука в области резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» [13] – частота f_p на рис. 1 и 2. Для большинства сэндвич-панелей, применяемых в строительстве (тол-

щиной от 30 до 150 мм), данная резонансная частота находится в диапазоне средних частот, что значительно ухудшает их звукоизолирующие свойства.

Для повышения звукоизоляции сэндвич-панелей в диапазоне средних частот необходимо уменьшить резонансное прохождение звука через ограждающую конструкцию в данном диапазоне. Для этого предлагается уменьшить общую жесткость ограждающей конструкции, т. к. жесткость является одним из важных параметров, влияющих на резонансное прохождение звука через ограждающие конструкции. В ходе исследований установлено [14], что наибольшего эффекта снижения жесткости многослойного ограждения можно добиться с помощью акустического разобщения слоев сэндвич-панели путем расположения между облицовками и средним слоем разделительных слоев упругого материала. При этом все слои должны быть склеены между собой точно, чтобы обеспечить необходимую эксплуатационную прочность сэндвич-панели. Конструктивное решение и внешний вид данных ограждений приведены на рис. 4.

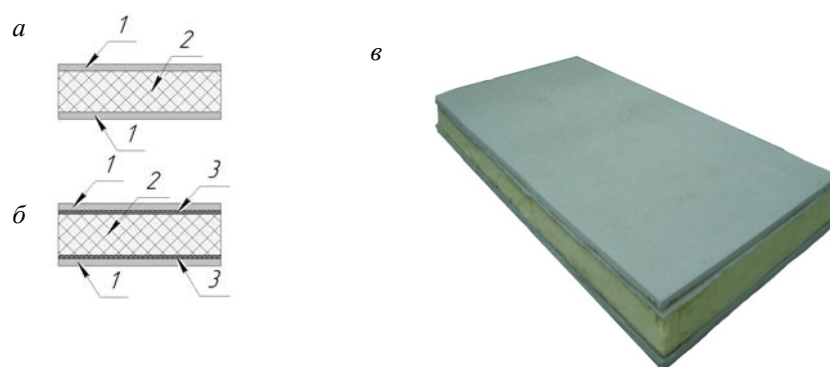


Рис. 4. Бескаркасная сэндвич-панель с акустическим разобщением слоев:

а – поперечное сечение стандартной сэндвич-панели, применяемой в строительстве в настоящее время (листы облицовок и средний слой склеены между собой по всей плоскости); б – поперечное сечение сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев (листы облицовок и средний слой разделены слоями упругого материала); в – внешний вид сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев (показан послойный монтаж панели); 1 – внешние листовые облицовки из гипсоволокнистых листов толщиной по 12,5 мм (плотность $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$); 2 – средний слой из жесткого пенополистирола толщиной 50 мм (плотность $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 12 \text{ МПа}$); 3 – разделительные слои упругого материала толщиной по 4 мм (полиэфирное волокно, плотность $\rho = 75 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 0,3 \text{ МПа}$)

На рис. 5 приведены результаты измерений звукоизоляции стандартной сэндвич-панели (кривая 1, размер образца $2000 \times 1200 \text{ мм}$, слои склеены по всей плоскости) и бескаркасного звукоизолирующего ограждения из сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев (кривая 2, размер образца $3600 \times 2500 \text{ мм}$, три панели размером $2500 \times 1200 \text{ мм}$ каждая, слои склеены точно). Измерения проведены в больших реверберационных камерах лабора-

тории акустики ННГАСУ и лаборатории акустики Вологодского государственного университета.

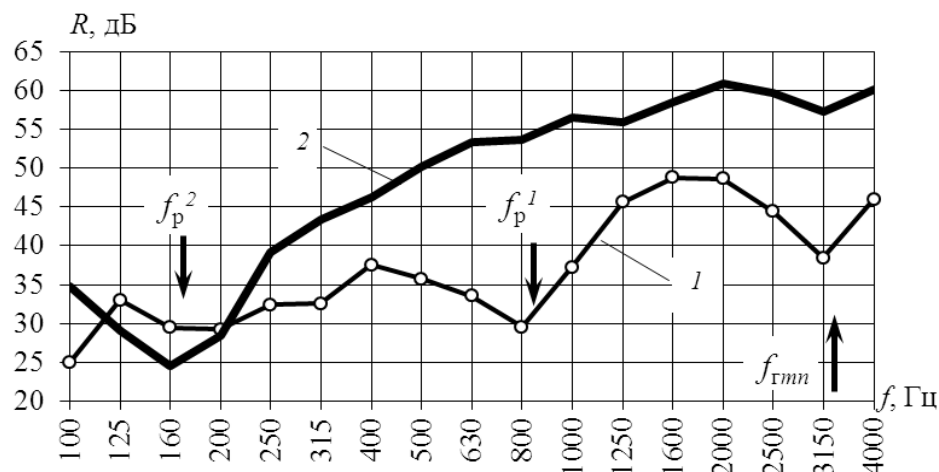


Рис. 5. Сравнение экспериментальных частотных характеристик звукоизоляции бескаркасного ограждения из сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев и стандартной сэндвич-панели:

1 – стандартная сэндвич-панель (облицовки – ГВЛ толщиной по 12,5 мм каждая, средний слой из пенополистирола толщиной 50 мм, слои склеены по всей плоскости); 2 – бескаркасное ограждение из сэндвич-панелей (облицовки – ГВЛ толщиной по 12,5 мм каждая, средний слой из пенополистирола толщиной 50 мм, разобщающие слои из «ВиброИзоТекс» толщиной по 4 мм каждый, слои склеены точно)

Из анализа рис. 5 можно сделать вывод, что бескаркасное звукоизолирующее ограждение с разрезкой на три отдельные сэндвич-панели имеет более высокую звукоизоляцию по сравнению со стандартной сэндвич-панелью в диапазонах средних и высоких частот.

При использовании упругих разделительных слоев из полиэфирного волокна и точечной склейке слоев (кривая 2) резонансная частота системы f_p сместилась по сравнению с исходным вариантом (кривая 1) вниз с частоты $f_p^1 = 800$ Гц на частоту $f_p^2 = 160$ Гц.

Индекс изоляции воздушного шума для звукоизолирующего бескаркасного ограждения составляет величину $R_w = 49$ дБ (поверхностная масса $\mu = 34$ кг/м²), что превышает индекс изоляции воздушного шума стандартной сэндвич-панели соизмеримой массы $R_w = 38$ дБ ($\mu = 33$ кг/м²) на 11 дБ.

Для использования в гражданском и промышленном строительстве в качестве перегородок, обеспечивающих требуемую защиту от шума, эффективно применение дополнительных облицовок, крепящихся саморезами к внешним листовым облицовкам звукоизолирующего бескаркасного ограждения (рис. 6).

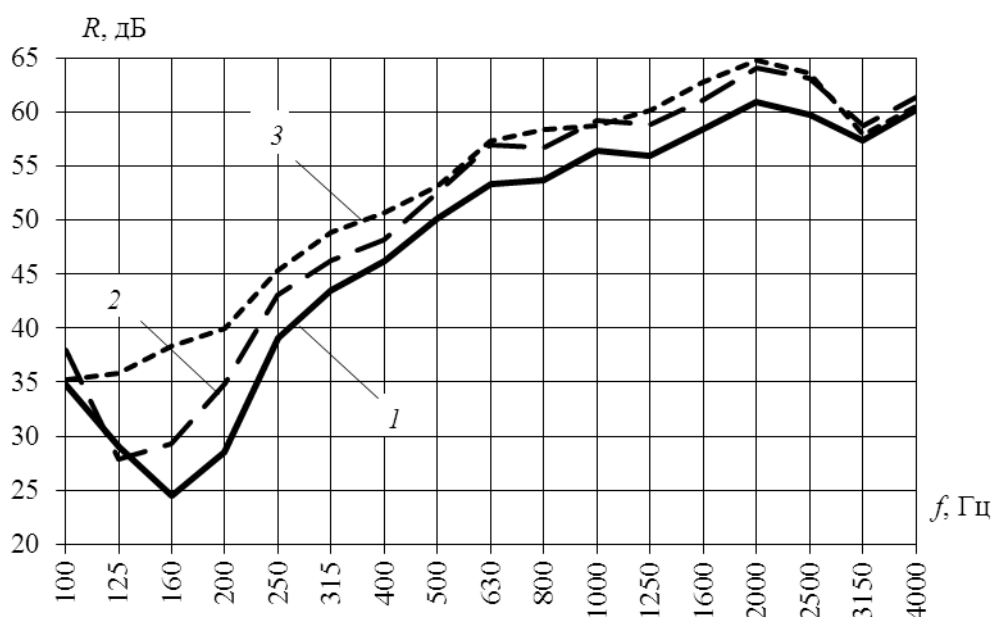


Рис. 6. Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасного ограждения из сэндвич-панелей с дополнительными внешними листовыми облицовками (размер образцов 3600×2500 мм, состав слоев см. рис. 4):

1 – звукоизолирующее ограждение без дополнительных облицовок; 2 – звукоизолирующее ограждение с одной дополнительной облицовкой (ГВЛ толщиной 12,5 мм) с одной стороны; 3 – звукоизолирующее ограждение с двумя дополнительными облицовками (ГВЛ толщиной 12,5 мм) с обеих сторон

Из рис. 6 следует, что при обшивке ограждения дополнительной листовой облицовкой ГВЛ толщиной 12,5 мм с одной стороны (кривая 2) происходит увеличение звукоизоляции на 3÷6 дБ в диапазоне частот 160÷3150 Гц, при этом индекс изоляции воздушного шума возрастает на 3 дБ до величины $R_w = 52$ дБ. В случае обшивки звукоизолирующего ограждения дополнительными листовыми облицовками с двух сторон (кривая 3) его звукоизоляция увеличивается во всем нормируемом диапазоне частот на величину до 14 дБ, при этом индекс изоляции воздушного шума возрастает на 5 дБ до величины $R_w = 54$ дБ.

На основании проведенных исследований звукоизоляции сэндвич-панелей разработаны рациональные конструктивные решения бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей, а также подана заявка на патент [15].

Для разработанных бескаркасных ограждений выполнен расчет на прочность и устойчивость численным методом в программном комплексе MSC.NASTRAN.

Для разработанных новых типов ограждающих конструкций из сэндвич-панелей проведены натурные исследования звукоизоляции в строящемся жилом доме в микрорайоне Цветы, г. Нижний Новгород (рис. 7).

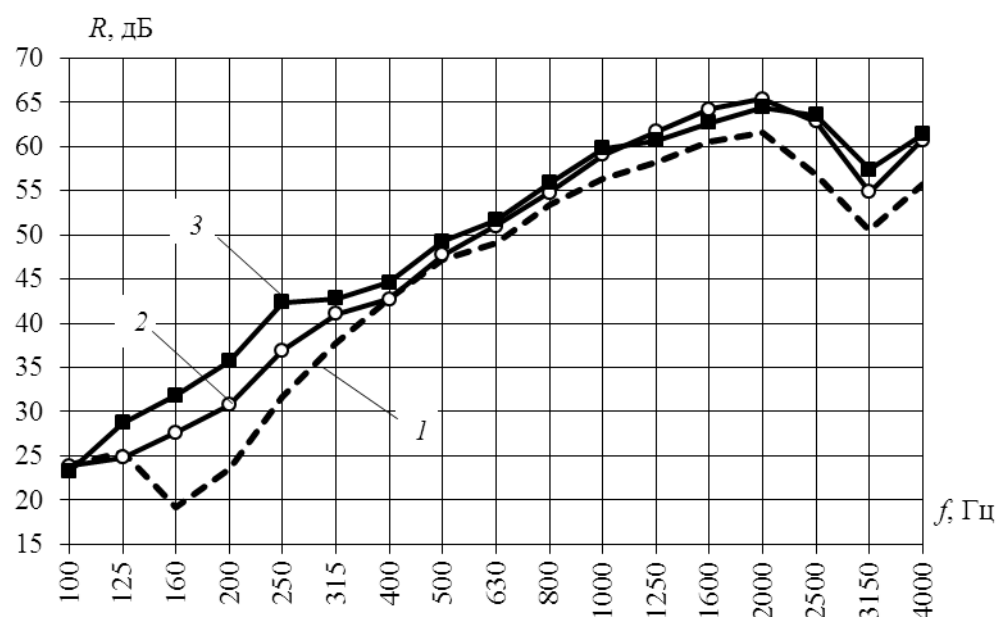


Рис. 7. Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасного ограждения из сэндвич-панелей с дополнительными внешними листовыми облицовками, полученные в натуральных условиях (размер образцов 3900×2500 мм, состав слоев – см. рис. 4): 1 – звукоизолирующее ограждение без дополнительных облицовок (толщина 83 мм, поверхностная плотность $\mu = 34 \text{ кг/м}^2$); 2 – звукоизолирующее ограждение с одной дополнительной облицовкой из ГВЛ (толщина 95,5 мм, $\mu = 50 \text{ кг/м}^2$); 3 – звукоизолирующее ограждение с двумя дополнительными облицовками из ГВЛ (толщина 108 мм, $\mu = 65 \text{ кг/м}^2$)

Для перегородки из сэндвич-панелей в натуральных условиях получен индекс изоляции воздушного шума $R'_w = 43 \text{ дБ}$. Для ограждения с одной дополнительной облицовкой из ГВЛ $R'_w = 47 \text{ дБ}$. Для ограждения с двумя дополнительными облицовками из ГВЛ $R'_w = 50 \text{ дБ}$.

Проведенные исследования показали наличие значительных резервов повышения звукоизоляции для многослойных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей. Определены эффективные способы использования данных резервов и методы расчета звукоизоляции при проектировании звукоизолирующих ограждений для гражданского и промышленного строительства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Beranek, L.L.* Work G. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets / L.L. Beranek // IASA. – 1949. – V. 21. – № 4. – P. 419–428.
2. *Karczmarzyk, S.* Local model of plane acoustic waves propagation in multilayered infinite sandwich structures / S. Karczmarzyk // Archives of Mechanics. – 63, 5–6. – P. 573–598, Warszawa, 2011.
3. *Moore, J.A.* Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions / J.A. Moore, R.H. Lyon // Journal of Acoustical Society of America. – 1991; 89. – P. 777–791.

4. Bolton, J.S. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials / J.S. Bolton, N.M. Shlau, Y.J. Kang // *Journal of Sound and Vibration*. – 1996. – 3. – P. 317–347.
5. Zhou, J. Sound transmission through a double-panel construction lined with poroelastic material in the presence of mean flow / J. Zhou, A. Bhaskar, X. Zhang // *Journal of Sound and Vibration*, 332. – 2013. – P. 3724–3734.
6. Dym, Clive L. Transmission of sound through sandwich panels / Clive L. Dym, Mark A. Lang // *IASA*. – 1974. – V. 56. – № 5. – P. 1525–1532.
7. Lang, Mark A. Optimal acoustic design of sandwich panels. Part 2 / Mark A. Lang, Clive L. Dym // *IASA*. – 1975. – V. 57. – № 6. – P. 1481–1487.
8. Dijkmans, A. Optimization of the acoustic performances of lightweight sandwich roof elements / A. Dijkmans, G. Vermeir. – Ottawa, Canada, INTER-NOISE-2009. August 23–26.
9. Звукоизоляция / М.С. Седов [и др.] ; под ред. Н.И. Иванова // *Техническая акустика транспортных машин: справочник*. – СПб. : Политехника, 1992. – Гл. 1. – С. 68–105.
10. Гребнев, П.А. Исследования звукоизолирующих свойств многослойных ограждений с жестким наполнителем / П.А. Гребнев, Д.В. Монич // *Жилищное строительство*. – 2012. – № 6. – С. 50–51.
11. Кочкин, А.А. Исследование изоляции ограждающих конструкций от воздушного шума в реверберационных камерах / А.А. Кочкин, Н.М. Дементьев // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2006. – № 12. – С. 43.
12. Экспериментальные исследования звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий / В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, Д.В. Монич, В.В. Дымченко, П.А. Гребнев // *Вестник Волжского регионального отделения РААСН*, 2014.
13. Гребнев, П.А. Исследование звукоизолирующих свойств бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей / П.А. Гребнев, Д.В. Монич // *Приволжский научный журнал*. – 2014. – № 3. – С. 53–58.
14. Experimental study of sound insulation in multilayer enclosing structures/ V.N. Bobilyov, V.A. Tishkov, D.V. Monich, V.V. Dymchenko, P.A. Grebnev // *Noise Control Engineering Journal*. – 2014. – 62 (5). – P. 354–355.
15. Звукоизолирующее ограждение / В.Н. Бобылев, П.А. Гребнев, Д.В. Монич, В.А. Тишков : заявка на изобретение № 2014123097; Приоритет 05.06.2014 г.

REFERENCES

1. Beranek L.L. *Work G.* Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets. *IASA*. 1949. V. 21. No. 4. P. 419–428.
2. Karcmarzyk S. Local model of plane acoustic waves propagation in multilayered infinite sandwich structures. *Archives of Mechanics*, 2011. V. 63, 5–6. Pp. 573–598.
3. Moore J.A., Lyon R.H. Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions. *J. Acoustical Society of America*, 1991. No. 89. Pp. 777–791.
4. Bolton J.S., Shlau N.M., Kang Y.J. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials. *J. Sound and Vibration*, 1996. V. 191. No. 3. Pp. 317–347.
5. Zhou J., Bhaskar A., Zhang X. Sound transmission through a double-panel construction lined with poroelastic material in the presence of mean flow. *J. Sound and Vibration*, 2013. No. 332. Pp. 3724–3734.
6. Dym Clive L., Lang Mark A. Transmission of sound through sandwich panels. *IASA*. 1974. Vol. 56. No. 5. Pp. 1525–1532.
7. Lang Mark A., Dym Clive L. Optimal acoustic design of sandwich panels. Pt. 2. *IASA*. 1975. V. 57. No. 6. P. 1481–1487.
8. Dijkmans A., Vermeir G. Optimization of the acoustic performances of lightweight sandwich roof elements. Ottawa, Canada, INTER-NOISE-2009. August 23–26.
9. Sedov M.S., et al. *Zvukoizolyatsiya [Sound insulation]. Tekhnicheskaya akustika transportnykh mashin [Technical acoustics of transport vehicles. Manual]*. St-Petersburg : Politehnika Publ., 1992. Pp. 68–105. (rus)

10. Grebnev P.A., Monich D.V. Issledovaniya zvukoizoliruyushchikh svoistv mnogosloinykh ograzhdenii s zhestkim zapolnitelem [Studies of soundproofing properties of multilayer walls with rigid aggregate]. *Housing Construction*. 2012. No. 6. Pp. 50–51. (rus)
11. Kochkin A.A., Dement'ev N.M. Issledovanie izolyatsii ograzhdayushchikh konstruksii ot vozdušnogo shuma v reverberatsionnykh kamerakh [Study of airborne sound wall insulation in reverberation rooms]. *Construction Materials, the Equipment, Technologies of XXI Century*. 2006. No. 12. P. 43. (rus)
12. Bobylev V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Eksperimental'nye issledovaniya zvukoizolyatsii mnogosloinykh ograzhdayushchikh konstruksii zdaniy [Experimental studies of insulation of multilayer wall systems]. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya RAASN*, 2014. (rus)
13. Grebnev P.A., Monich D.V. Issledovanie zvukoizoliruyushchikh svoistv beskarkasnykh ograzhdayushchikh konstruksii iz sendvich-panelei [Sound insulation of frameless sandwich wall panels]. *Privolzhsky Scientific J.* 2014. No. 3. Pp. 53–58. (rus)
14. 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 J.* 2014. No. 62 (5). Pp. 354–355.
15. Bobylev V.N., Grebnev P.A., Monich D.V., Tishkov V.A. Zvukoizoliruyushchee ograzhdenie [Sound-insulating walling]. Certificate of invention N 2014123097 of 05.06.2014. (rus)