

УДК 699.844

*ПУЗАНКОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ, зав. лабораторией,
ссср443@yandex.ru
Нижегородский государственный архитектурно-строительный
университет,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИБРОДЕМПФИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ОКОН

В статье представлены результаты исследований влияния дополнительного вибродемпфирования на звукоизоляцию современных оконных конструкций. Рассмотрены различные способы применения дополнительного вибродемпфирования. Подробно исследовано вибродемпфирование полосой непрозрачного материала по периметру остекления (краевое демпфирование). Доказана эффективность данного метода для повышения звукоизоляции однослойных и двойных светопрозрачных конструкций. Представлены основы для разработки теоретического расчета двойных ограждений с применением краевого демпфирования.

Ключевые слова: звукоизоляция; оконные конструкции; стеклопакет; вибродемпфирование; самосогласование волновых полей.

*ALEKSEI N. PUZANKOV, Head of Laboratory,
ссср443@yandex.ru
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
65, Il'inskaya Str., 603950, Nizhnii Novgorod, Russia*

THE EFFICIENCY OF ADDITIONAL DAMPING FOR WINDOW SOUND INSULATION IMPROVEMENT

The paper presents the research results of additional damping for sound insulation used in the modern window design. Various methods of additional damping application are described herein. The paper also presents research results on damping with a nontransparent material strip applied around the perimeter of glazing (boundary damping). The efficiency of this method is shown for the sound insulation of single- and double-layer translucent structures. Also, basics for the theoretical calculation of double glazing with boundary damping are given in this paper.

Keywords: sound insulation; windows; glazing; damping; wave field self-consistency.

Повышение звукоизоляционных свойств современных светопрозрачных ограждающих конструкций окон является одним из наиболее приоритетных направлений исследований в области строительной акустики в наше время. Это связано как с увеличением уровней шума от внешних источников (шумы промышленных предприятий, транспортный шум и т. п.) и необходимостью надежной защиты от них помещений жилых и общественных зданий, так

и с увеличением объема применения светопрозрачных конструкций в качестве внутренних ограждений (прежде всего, в общественных зданиях).

Существует целый ряд конструктивных факторов, оказывающих влияние на звукоизоляцию многослойных светопрозрачных ограждений. Среди них:

- толщина и материал стекол;
- количество стекол в ограждении;
- толщина воздушного промежутка;
- разрезка плоскости ограждения переплетами;
- заполнение воздушного промежутка тяжелыми газами;
- демпфирование стекол ограждения.

Изменение этих факторов позволяет в значительной мере повлиять на звукоизоляцию ограждения [1–5].

Кроме того, значительное влияние на общую звукоизолирующую способность светопрозрачных ограждений оказывает наличие приточных вентиляционных устройств (ПВУ) в их конструкции. Наличие ПВУ при закрытой створке устройства незначительно снижает общую звукоизоляцию окна. При открытой створке ПВУ (в режиме проветривания) звукоизоляция окна снижается, но в меньшей степени, чем при открытой створке окна. Данный вопрос подробно исследован в работах [6, 7].

В большинстве случаев конструктивные изменения, необходимые для получения прироста звукоизоляции, влекут за собой повышение материалоемкости, увеличение трудоемкости изготовления и существенный рост общей стоимости конструкции. Поэтому при разработке эффективных звукоизолирующих светопрозрачных ограждений следует соотносить полученное увеличение звукоизоляционных свойств с материальными затратами и конструктивными сложностями, возникающими при усложнении конструкции ограждения.

Как говорилось выше, одним из факторов, позволяющих повлиять на звукоизоляцию конструкции окна, является применение специализированных вибродемпфирующих материалов, искусственно подавляющих колебания в ограждении путем увеличения диссипативных потерь энергии в его материале.

Существует несколько возможных способов применения вибродемпфирования для повышения звукоизоляции светопрозрачных конструкций (рис. 1):

способ № 1 – вибродемпфирование светопрозрачной пленкой по наружной поверхностям стекла;

способ № 2 – вибродемпфирование прозрачным материалом, заключенным между двумя листами стекла (технология «триплекс»);

способ № 3 – вибродемпфирование фрагментами непрозрачного материала отдельных участков ограждения (например, по периметру).

Экспериментальные исследования влияния светопрозрачных вибродемпфирующих материалов на звукоизоляцию стекла (способы вибродемпфирования № 1, 2) проводились в лаборатории акустики ННГАСУ Д.Л. Щеголевым, Д.В. Мурыгиным [8]. Результаты данных измерений приведены на рис. 2, 3.

Как видно из представленных результатов, применение светопрозрачной пленки с двух сторон стекла в качестве вибродемпфирующего материала

позволяет повысить звукоизоляцию остекления на всем практически значимом диапазоне частот на величину 1–3 дБ, что говорит о достаточно высокой эффективности данного способа демпфирования с точки зрения его влияния на звукоизоляцию. Однако следует отметить, что применение демпфирующей пленки значительно увеличивает стоимость конструкции, т. к. стоимость пленки сопоставима с общей стоимостью стекла в конструкции.

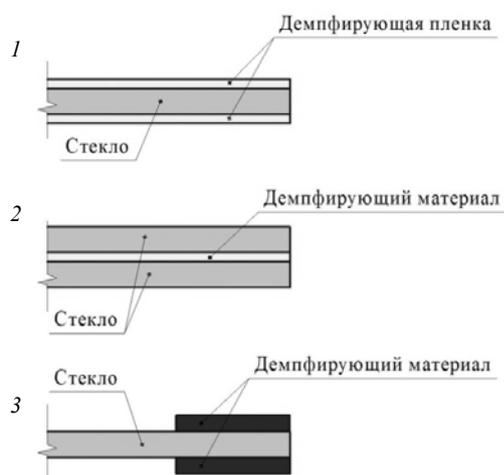


Рис. 1. Варианты применения различных вибродемпфирующих материалов для повышения звукоизоляции оконных конструкций:

1 – вибродемпфирование светопрозрачной пленкой по наружной поверхности стекла; 2 – вибродемпфирование прозрачным материалом, заключенным между двумя листами стекла «триплекс»; 3 – вибродемпфирование полосами непрозрачного вибродемпфирующего материала по периметру ограждения

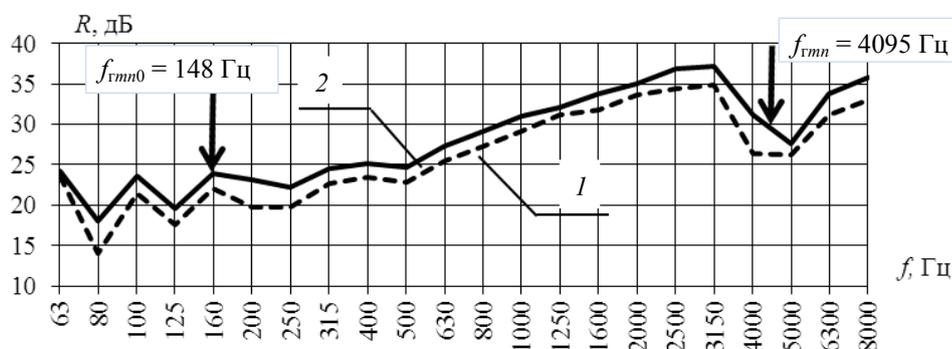


Рис. 2. Сравнение частотных характеристик звукоизоляции стекла толщиной 3 мм с размерами в плане 1900×1100 мм:

1 – без оклейки плоскости стекла; 2 – с оклейкой плоскости стекла светопрозрачной самоклеящейся ударопрочной пленкой толщиной 250 мкм с двух сторон

Применение вибродемпфирующего материала между двумя пластинами стекла дает видимый прирост звукоизоляции на частотах выше 2000 Гц (на

1–5 дБ) по сравнению с однослойной пластиной из силикатного стекла равной массы, однако основная часть диапазона, на котором наблюдается прирост, располагается за пределами нормируемого диапазона частот. При этом стоимость такого стекла также достаточно высока по сравнению с традиционными однослойными стеклами сравнимой толщины. Эффект повышения звукоизоляции за счет применения данного способа демпфирования был выявлен также А.А. Кочкиным [9].

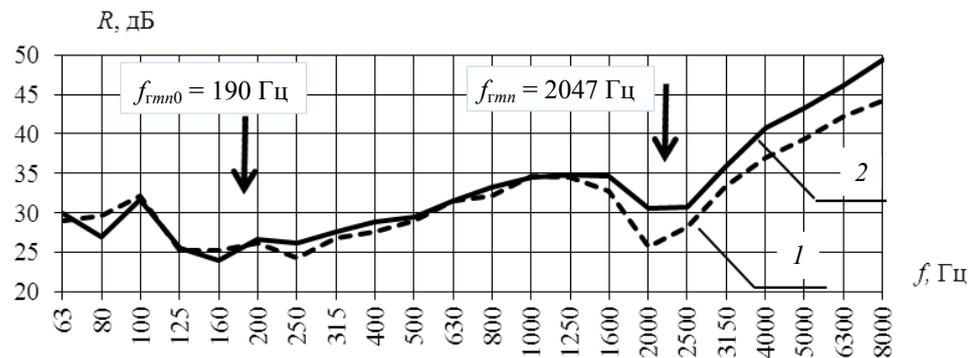


Рис. 3. Сравнение частотных характеристик звукоизоляции светопрозрачной конструкции размерами 1900×1100 мм:

1 – стекло силикатное 6 мм; 2 – два стекла толщиной 3 мм, соединенные светопрозрачным вибродемпфирующим материалом («триплекс» Stratobel 3.3.1, состоящий из двух стекол толщиной 3 мм каждое, скрепленных между собой поливинилбутирольной (ПВБ) пленкой толщиной 1 мм)

Помимо описанных выше способов возможно также производить дополнительное демпфирование конструкции путем нанесения на поверхность ее светопрозрачной части фрагментов непрозрачного вибродемпфирующего материала, например, полосами по периметру (см. рис. 1). Таким образом, за счет некоторого снижения площади светопрозрачной части конструкции есть возможность получить прирост звукоизоляции.

В настоящее время промышленность производит высокоэффективные самоклеющиеся демпфирующие материалы на основе различных видов полимерных мастик, имеющие коэффициент потерь $\eta = 0,3–0,4$. Предлагается использовать именно такие материалы для оклейки по периметру прозрачной части ограждения. Они имеют сравнительно невысокую стоимость, к тому же затраты материала невелики, т. к. площадь конструкции, занимаемая материалом, незначительна.

В лаборатории акустики ННГАСУ были проведены экспериментальные исследования влияния оклейки светопрозрачной части ограждения по периметру полосой непрозрачного вибродемпфирующего материала (далее – краевого демпфирования). Данные исследования были проведены в больших реверберационных камерах объемом 150 и 66 м³.

Для проведения исследований был изготовлен образец из силикатного стекла толщиной 4 мм размерами 1,3×1,1 м. Для демпфирования использован

специализированный материал «БиМаст Бомб» производства ООО «Стандартпласт», г. Иваново.

В ходе проведения эксперимента была измерена звукоизоляция силикатного стекла 4 мм без краевого демпфирования, а также стекол с оклейкой по периметру с двух сторон полосами вибродемпфирующего материала шириной 20 и 40 мм.

На рис. 4 приведено сравнение частотных характеристик звукоизоляции исследованных конструкций. Также для каждой конструкции были вычислены индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ, и значение звукоизоляции окна от транспортного шума $R_{A, \text{тран}}$, дБА.

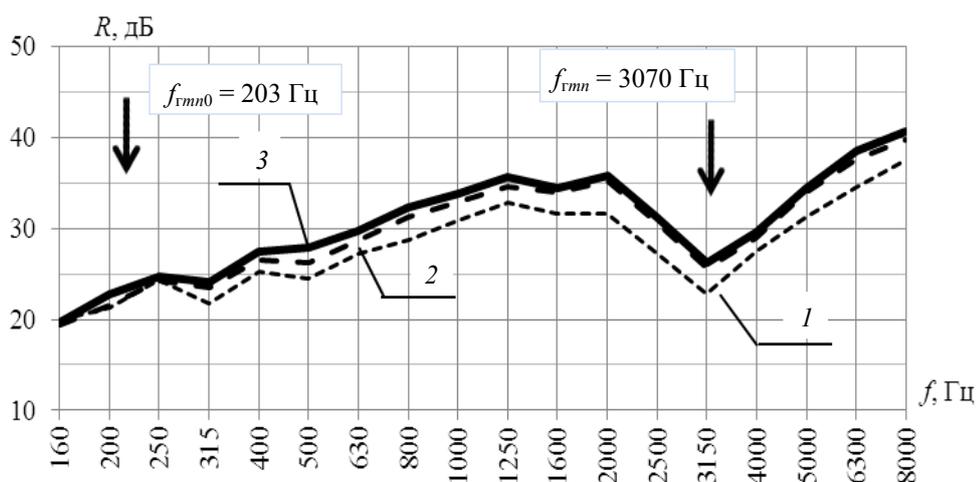


Рис. 4. Сравнение частотных характеристик звукоизоляции однослойных светопрозрачных конструкций из стекла 4 мм с различной степенью краевого демпфирования материалом «БиМаст Бомб»:

1 – конструкция без краевого демпфирования ($R_w = 28$ дБ, $R_{A, \text{тран}} = 27$ дБА); 2 – конструкция с оклейкой полосой вибродемпфирующего материала шириной 20 мм по периметру с обеих сторон стекла ($R_w = 30$ дБ, $R_{A, \text{тран}} = 27$ дБА); 3 – конструкция с оклейкой полосой вибродемпфирующего материала шириной 40 мм по периметру с обеих сторон стекла ($R_w = 31$ дБ, $R_{A, \text{тран}} = 28$ дБА)

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают эффективность краевого демпфирования для повышения звукоизоляции однослойных светопрозрачных конструкций на достаточно широком диапазоне частот 315–8000 Гц. В этой области звукоизоляция повышается на 2–5 дБ. Максимальный прирост индексов в данном случае относительно базовой конструкции без вибродемпфирования составил: $\Delta R_w = 4$ дБ, $\Delta R_{A, \text{тран}} = 1$ дБА.

Однако однослойные светопрозрачные конструкции практически не применяются в современной практике строительства, гораздо более широко распространены конструкции из нескольких стекол, разделенных воздушными промежутками.

В наши дни в практике строительства достаточно широкое распространение получили стеклопакеты. Стеклопакет – два или более стекла, герметично

соединенные в единую конструкцию с помощью специальных дистанционных рамок (металлических или пластиковых) и герметиков различных видов.

Для проведения исследований влияния краевого демпфирования на звукоизоляцию многослойных ограждений был изготовлен стеклопакет с формулой остекления 4 + 24 + 4 мм (два листа силикатного стекла толщиной 4 мм каждый, разделенные воздушным промежутком шириной 24 мм, размерами в плане 1,3×1,1 м). Для вибродемпфирования использован специализированный материал «БиМаст Бомб».

В ходе проведения экспериментальных исследований была измерена звукоизоляция однокамерного стеклопакета с формулой остекления 4 + 24 + 4 мм без краевого демпфирования, а также этого же стеклопакета, демпфированного с двух сторон по периметру полосами шириной 20 и 40 мм.

Из сравнения частотных характеристик звукоизоляции исследованных конструкций (рис. 5) можно сделать вывод о том, что применение краевого демпфирования является достаточно эффективным способом повышения звукоизоляции для светопрозрачных конструкций со стеклопакетами. Прирост звукоизоляции при применении краевого демпфирования происходит в диапазоне частот 315–8000 Гц, при этом величина прироста составляет 1–8 дБ. Наиболее эффективным способом показало себя демпфирование обоих стекол стеклопакета полосой материала «БиМаст Бомб» 40 мм по периметру (площадь, занимаемая вибродемпфирующим материалом, при этом составляет 13 % от площади конструкции). Прирост индексов в данном случае относительно базовой конструкции без вибродемпфирования составил: $\Delta R_w = 2$ дБ, $\Delta R_{A, \text{тран}} = 1$ дБА.

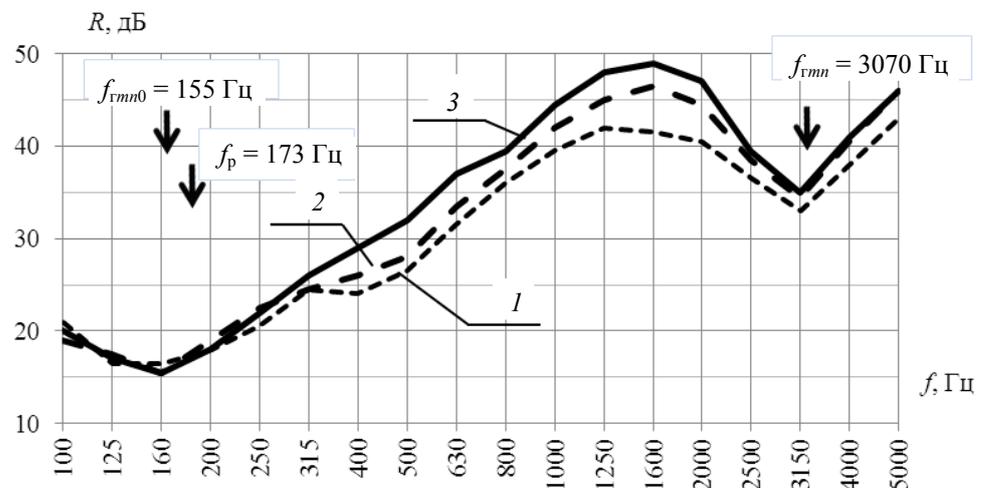


Рис. 5. Сравнение частотных характеристик звукоизоляции двойных светопрозрачных конструкций (стклопакет с формулой остекления 4 + 24 + 4 мм) с различной степенью краевого демпфирования материалом «БиМаст Бомб»:

1 – стеклопакет без краевого демпфирования ($R_w = 32$ дБ, $R_{A, \text{тран}} = 27$ дБА); 2 – стеклопакет с демпфированием полосой 20 мм по периметру обоих стекол ($R_w = 33$ дБ, $R_{A, \text{тран}} = 28$ дБА); 3 – стеклопакет 4 + 24 + 4 мм, демпфирование полосой 40 мм по периметру обоих стекол ($R_w = 34$ дБ, $R_{A, \text{тран}} = 28$ дБА)

Теоретический расчет звукоизоляции окон с применением краевого демпфирования предлагается проводить с использованием зависимостей для звукоизоляции тонких двойных ограждений, учитывающих двойственную (резонансную и инерционную) природу прохождения звука через ограждение (теория самосогласования волновых полей, разработанная в ННГАСУ школой профессора М.С. Седова) [10]. Выражение для вычисления звукоизоляции конструкции будет иметь вид

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau}, \quad (1)$$

где τ – коэффициент прохождения звука через двойную конструкцию.

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

Здесь $\tau_{п.и}$ – коэффициент инерционного прохождения звука через конструкцию как систему пластин с упругой связью между ними; $\tau_{п.с}$ – коэффициент резонансного прохождения звука через конструкцию как систему пластин с упругой связью между ними; $\tau_{1и}$ – коэффициент инерционного прохождения звука через первую пластину; $\tau_{2и}$ – коэффициент инерционного прохождения звука через вторую пластину; $\tau_{1с}$ – коэффициент резонансного прохождения звука через первую пластину; $\tau_{2с}$ – коэффициент резонансного прохождения звука через вторую пластину.

Для оценки влияния краевого демпфирования на звукоизоляцию конструкции предлагается ввести величину эффективного коэффициента потерь конструкции (η_{ef}). Это коэффициент потерь стекла с учетом демпфирования его плоскостей фрагментами вибродемпфирующего материала. Изменение эффективного коэффициента потерь конструкции оказывает влияние на коэффициенты резонансного прохождения звука: $\tau_{1с}$ и $\tau_{2с}$. Выражения для данных коэффициентов будут иметь вид:

– на частотах $f < f_{vmn}$

$$\tau_{1с} = \frac{1}{\frac{1,15\pi^3}{8\rho_0^2 c_0^2 A_{01(001)}^4} m_2^2 f^2 \eta_{ef1} \cos^2 \theta_{cp} + 1}; \quad (3)$$

$$\tau_{2с} = \frac{1}{\frac{1,15\pi^3}{8\rho_0^2 c_0^2 A_{02(002)}^4} m_2^2 f^2 \eta_{ef2} \cos^2 \theta_2 + 1}; \quad (4)$$

– на частотах $f > f_{vmn}$

$$\tau_{1с} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} m_1^2 \frac{f^3}{f_{vmn}} \eta_{ef1} \cos^2 \theta_{cp} \sqrt{1 - \frac{f_{vmn}}{f}} + 1}; \quad (5)$$

$$\tau_{2с} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} m_2^2 \frac{f^3}{f_{vmn}} \eta_{ef2} \cos^2 \theta_2 \sqrt{1 - \frac{f_{vmn}}{f}} + 1}. \quad (6)$$

Значения η_{ef} для стекла с частичной оклейкой демпфирующим материалом могут быть измерены экспериментально по методу Оберста [11]. Результаты измерений для стекла 4 мм с различной площадью оклейки вибродемпфирующим материалом «БиМаст Бомб» представлены в таблице.

Результаты измерений коэффициента потерь для стекла 4 мм

Площадь образца, занятая вибродемпфирующим материалом, %	Эффективный коэффициент потерь η_{ef} , измеренный по методу Оберста
0	0,006
12,5	0,019
25	0,022
50	0,023
100	0,026

Как видно из данных, приведенных в таблице, эффективный коэффициент потерь при применении краевого демпфирования площадью 12,5 % от площади конструкции превышает коэффициент потерь стекла без вибродемпфирования более чем в 3 раза. При дальнейшем увеличении площади вибродемпфирующего материала значительного относительного увеличения значений эффективного коэффициента потерь не происходит. Площадь демпфирования 12,5 % соответствует проценту площади ограждения, занятой вибродемпфирующим материалом в экспериментальных исследованиях при ширине полосы 40 мм (рис. 5), поэтому данное значение эффективного коэффициента потерь можно использовать при теоретическом расчете звукоизоляции этой конструкции.

На рис. 6 и 7 представлены частотные характеристики коэффициентов резонансного прохождения звука через первую и вторую пластины ограждения соответственно. Частотные характеристики получены при применении краевого демпфирования (площадь, занимаемая вибродемпфирующим материалом 13 %) и без него для стеклопакета с формулой остекления 4 + 24 + 4 мм с размерами в плане 1,3×1,1 м. Из приведенных графиков сравнения видно, что изменение эффективного коэффициента потерь пластин оказывает значительное влияние на звукоизоляцию ограждения на всем диапазоне частот.

В настоящее время в лаборатории акустики ННГАСУ ведется завершение разработки инженерного метода расчета звукоизоляции многослойных светопрозрачных ограждений с учетом краевого демпфирования.

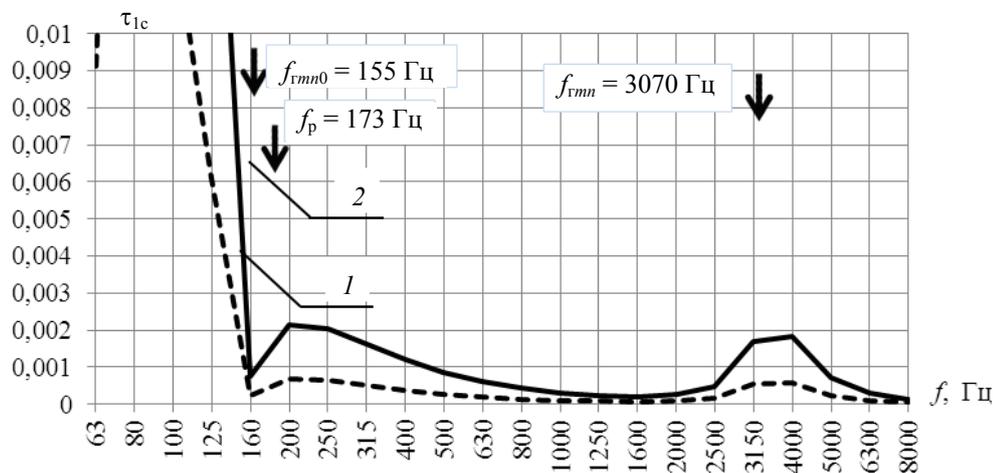


Рис. 6. Частотные характеристики коэффициента резонансного прохождения звука через первую пластину τ_{1c} стеклопакета с формулой остекления 4 + 24 + 4 мм с размерами 1,3×1,1 м:

1 – без применения краевого демпфирования; 2 – с краевым демпфированием полосой материала «БиМаст Бомб» шириной 40 мм по периметру ограждения

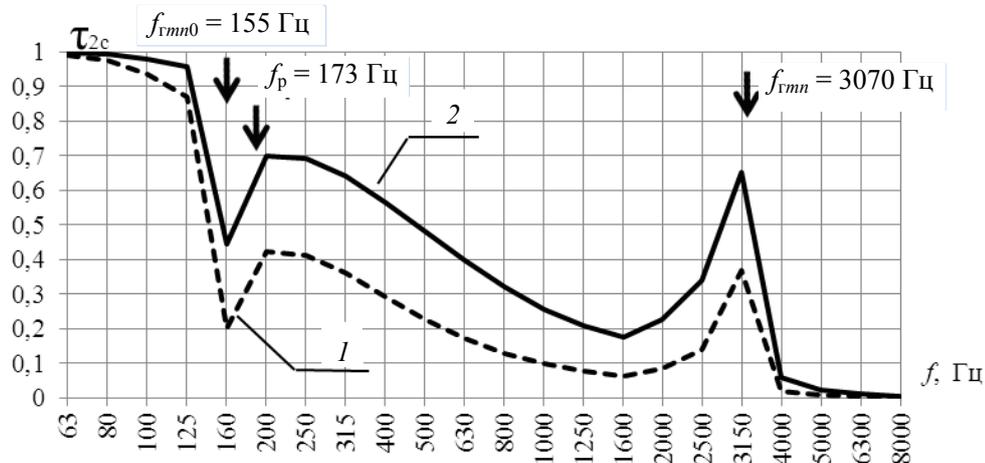


Рис. 7. Частотные характеристики коэффициента резонансного прохождения звука через вторую пластину τ_{2c} стеклопакета с формулой остекления 4 + 24 + 4 мм с размерами 1,3×1,1 м:

1 – без применения краевого демпфирования; 2 – с краевым демпфированием полосой материала «БиМаст Бомб» шириной 40 мм по периметру ограждения

По результатам проведенных исследований можно заключить, что применение краевого демпфирования является эффективным методом для повышения звукоизоляции конструкции на средних и высоких частотах. К недостаткам метода можно отнести незначительное снижение площади светопрозрачной части ограждения, к преимуществам – низкую материалоемкость и стоимость материала, а также незначительное влияние на общую массу ограждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lilly, J.G.* Recent Advances in Acoustical Glazing / J.G. Lilly // *Sound and Vibration*. – 2004. – Pp. 8–11.
2. *Garg, N.* Experimental investigations on sound insulation through single, double & triple window glazing for traffic noise abatement / N. Garg, O. Sharma, S. Maji // *Journal of Scientific & Industrial Research*. – 2011. – 70. – P. 471–478.
3. *Tadeu, A.J.B.* Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation / A.J.B. Tadeu, D.M.R. Mateus // *Applied Acoustics*. – 2001. – 62. – P. 307–325.
4. *A compara ve study of sound transmission loss provided by glass, acrylic and polycarbonate* / E.A. Khidir, Z. Harun, M.J.M. Nor, M. Razi. – *Jurnal Teknologi*. – 2013. – 60. – P. 1–4.
5. *Quirt, J.* Sound transmission through windows I. Single and double glazing / J. Quirt // *Journal of Acoustical Society of America*. – 1982. – 72. – P. 834–844.
6. *Снижение транспортного шума как основа благоприятной акустической среды жилища современных городов* / В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, Д.Л. Щеголев, Д.В. Мурыгин // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2011. – № 5. – С. 120–127.
7. *Шумозащитные мероприятия для зданий на примагистральных территориях городов* / С.Н. Овсянников, А.С. Самохвалов, В.П. Мельник, М.С. Овсянников // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2007. – № 1. – С. 64–74.
8. *Мурыгин, Д.В.* Способы повышения звукоизоляции светопрозрачных ограждающих конструкций без значительного увеличения массы / Д.В. Мурыгин // *Приволжский научный журнал*. – 2009. – № 1. – С. 25–28.
9. *Кочкин, А.А.* Звукоизоляция слоистых вибродемпфированных элементов светопрозрачных ограждающих конструкций / А.А. Кочкин // *Строительные материалы*. – 2012. – № 6. – С. 40–41.
10. *Звукоизоляция и звукопоглощение* / Г.Л. Осипов, В.Н. Бобылев, В.А. Тишков [и др.]. – М. : АСТ : Астрель, 2004. – 450 с.
11. *Пузанков, А.Н.* Исследование эффекта краевого демпфирования светопрозрачных ограждений на их звукопроницаемость / А.Н. Пузанков, Д.Л. Щеголев // *Строительные материалы*. – 2012. – № 6. – С. 38–39.

REFERENCES

1. *Lilly J.G.* Recent advances in acoustical glazing, *Sound and Vibration*, 2004. Pp. 8–11.
2. *Garg N., Sharma O., Maji S.* Experimental investigations on sound insulation through single, double & triple window glazing for traffic noise abatement. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2011. No. 70. Pp. 471–478.
3. *Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R.* Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. *Applied Acoustics*, 2001. No. 62. Pp. 307–325.
4. *Khidir E. A., Harun Z., Nor M.J.M., Razi M.,* A comparative study of sound transmission loss provided by glass, acrylic and polycarbonate. *Jurnal Teknologi*, 2013. No. 60, Pp. 1–4.
5. *Quirt J.* Sound transmission through windows I. Single and double glazing. *Journal of Acoustical Society of America*, 1982. No. 72. Pp. 834–844.

6. *Bobylev V. N., Tishkov V. A., Shchegolev D. L., Murygin D. V.* Snizhenie transportnogo shuma kak osnova blagopriyatnoi akusticheskoi sredy zhilishcha sovremennykh gorodov [Reducing of traffic noise as a basis for favorable acoustic environment of modern urban dwelling]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2011. No. 5. Pp. 120–127. (rus)
7. *Ovsyannikov S. N., Samokhvalov A. S., Mel'nik V. P., Ovsyannikov, M. S.* Shumozashchitnye meropriyatiya dlya zdaniy na primagistral'nykh territoriyakh gorodov [Noise-proof activities for buildings situated on trunk–road areas of cities]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007. No. 1. Pp. 64–74. (rus)
8. *Murygin D.V.* Sposoby povysheniya zvukoizolyatsii svetoprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruksii bez znachitel'nogo uvelicheniya massy [Ways to improve the sound insulation of translucent walling without a significant increase in weight]. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2009. No. 1. Pp. 25–28. (rus)
9. *Kochkin A.A.* Zvukoizolyatsiya sloistykh vibrodempfirovannykh elementov svetoprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruksii [Soundproofing of damped elements of layered translucent walling]. *Construction Materials*. 2012. No. 6. Pp. 40–41. (rus)
10. *Osipov G.L., Bobylev V.N., Tishkov V.A., et al.* Zvukoizolyatsiya i zvukopogloshchenie [Sound insulation and sound absorption]. Moscow : AST Publ., 2004. 450 p.
11. *Puzankov A.N., Shchegolev D.L.* Issledovanie effekta kraevogo dempfirovaniya svetoprozrachnykh ograzhdenii na ikh zvukopronitsaemost' [The boundary damping effect on translucent structure sound transmission]. *Construction Materials*. 2012. No. 6. Pp. 38–39. (rus)