

Увеличение звукоизоляции двустенных конструкций за счет применения звукоизолирующих мостиков

Д.т.н., профессор ГОУ СПбГМУ и ГОУ СПбГПУ И.И. Боголепов*

Двустенные конструкции с воздушным слоем между стенками играют главенствующую роль в звукоизоляции жилых, общественных и промышленных зданий. Это касается, в первую очередь, окон, двойных дверей, специальных звукоизолирующих стен и перегородок, акустических потолков, помещений «комната в комнате» (венткамеры, звукоизолирующие кабины управления, помещения для конфиденциальных переговоров) и др. Постоянно возникающая здесь у инженера-строителя проблема состоит в том, что звукоизоляция двустенной конструкции сильно зависит от конструктивной связи между стенами-пластинами, которую образуют детали крепления: соединительные стержни, обрешетка, ребра жесткости по контуру и т.д. Эти детали являются акустическими мостиками, по которым звук распространяется от первой пластины ко второй, часто минуя звукоизолирующий воздушный слой. Такие мостики могут значительно уменьшить звукоизоляцию двустенной конструкции. Как увеличить звукоизоляцию двустенной конструкции за счет применения специальных звукоизолирующих мостиков?

Исследование

Акустические мостики рационально разделить по типу конструкции на точечные и линейные мостики. Точечный мостик – это стержень, расположенный *перпендикулярно* к пластинам двустенной конструкции. Стержнями могут быть соединительные шпильки, болты, винты, шурупы. Линейные мостики образуются стержнями, расположенными *параллельно* пластинам двустенной конструкции. Обычно это бруски обрешетки или соединительные ребра жесткости.

Достаточно точно и надежно определить влияние акустических мостиков на звукоизоляцию двустенной конструкции можно экспериментально, для чего необходима специальная установка, которая позволяет измерить звукоизоляцию двустенной преграды с мостиками и, что особенно важно, без них. Устройство такой установки, разработанное автором, представлено в [1,2]. Ниже приводятся некоторые типовые результаты многочисленных исследований влияния акустических мостиков на звукоизоляцию двустенной конструкции на этой установке.

Двустенная конструкция размерами 1100 на 1200 мм², на которой испытывали в данном случае различные акустические мостики, состояла из пластины дюралюминия толщиной 4 мм и стальной пластины толщиной 1 мм, между которыми находился воздушный промежуток толщиной 60 мм. Испытываемые мостики устанавливались в этом промежутке и соединяли пластины между собой. Конструкция линейных мостиков показана на рис. 1, конструкция точечных – на рис. 2.

Линейные мостики крепились шурупами с шагом 330 мм. Расстояние между линейными мостиками было также равно 330 мм. Точечные мостики устанавливались в тех же местах, где были шурупы линейных мостиков, т.е. в углах квадрата 330 на 330 мм².

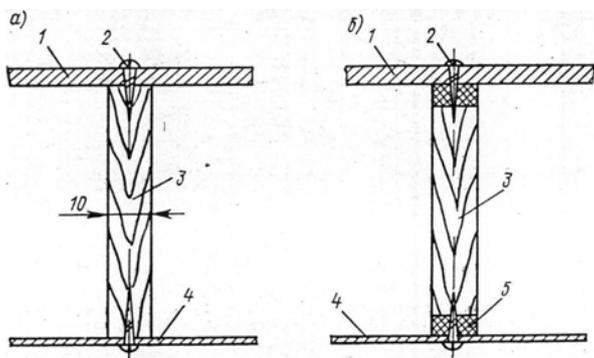


Рисунок 1. Конструкции линейных акустических мостиков: а) – обычные мостики; б) – мостики с упругим элементом.

1 – первая пластина; 2 – шуруп; 3 – сосновый брусок; 4 – вторая пластина; 5 – резиновая прокладка (упругий элемент).

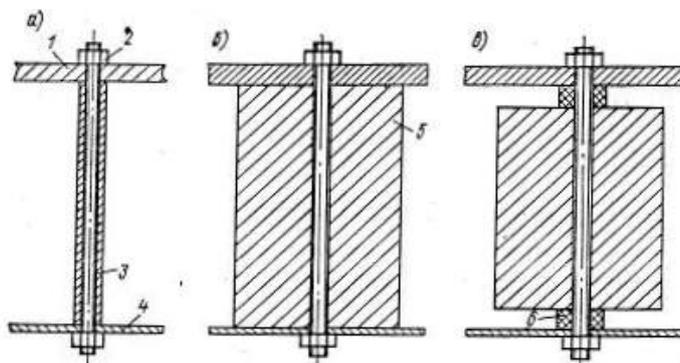
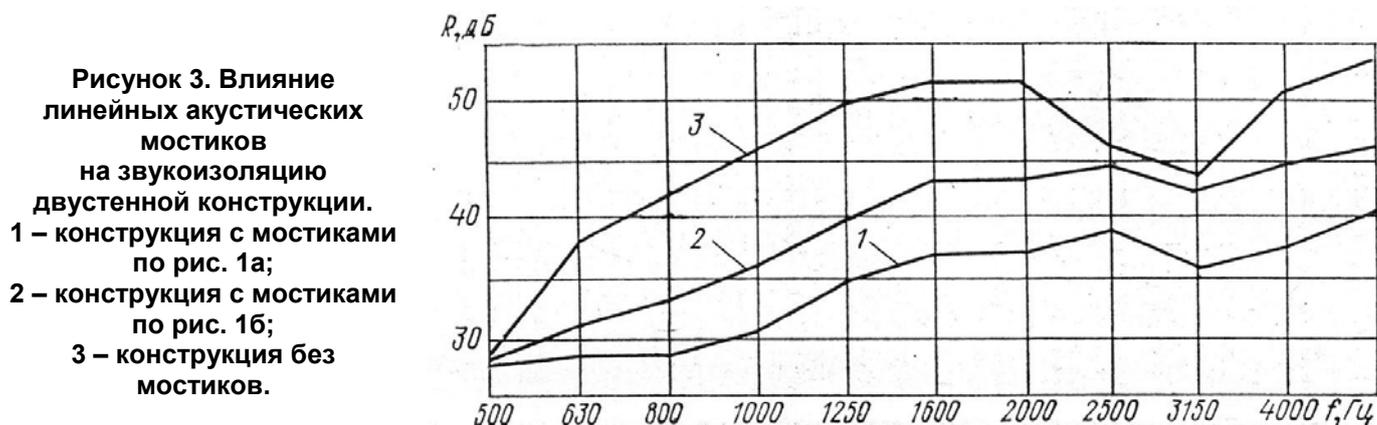


Рисунок 2. Конструкции точечных акустических мостиков: а) обычный мостик; б) инерционный мостик; в) комбинированный мостик.

1 – первая пластина; 2 – прижимная гайка; 3 – распорная трубка; 4 – вторая пластина; 5 – стальной цилиндр (промежуточная масса); 6 – резиновая прокладка (упругий элемент).

На рис. 3 представлены результаты испытания звукоизоляции двустенной конструкции с линейными мостиками и без них. Из рисунка видно, что обычные линейные мостики могут значительно уменьшить звукоизоляцию двустенной конструкции в области средних и высоких частот. Это уменьшение для рассматриваемой конструкции составляет 10-15 дБ. В районе критической частоты ($f_{кр} = 3150 \text{ Гц}$) и особенно в районе, приближающемся к низким частотам, наблюдается тенденция к снижению вредного для звукоизоляции двустенной конструкции влияния звуковых мостиков. Это может быть объяснено тем, что мостики, жестко соединяя пластины между собой, способствуют приобретению двустенной конструкции акустических свойств одностенной конструкции.

Для увеличения звукоизоляции двустенной конструкции за счет уменьшения звукопередачи через линейные мостики в последних были установлены упругие элементы, как это показано на рис. 1б. В качестве упругого элемента использовали прокладку из мягкой вакуумной резины толщиной 5 мм и площадью $1,5 \text{ см}^2$. Применение упругих элементов в линейных мостиках увеличило звукоизоляцию двустенной конструкции, как это видно из рис. 3, примерно на 5 дБ, однако максимально возможные значения звукоизоляции данной двустенной конструкции достигнуты не были.



На рис. 4. представлены результаты испытания звукоизоляции двустенной конструкции с точечными акустическими мостиками и без них. Обычные точечные мостики, например, в виде крепежной шпильки, показанной на рис. 2. а), уменьшают звукоизоляцию двустенной конструкции в среднем примерно на ту же величину, что и обычные линейные мостики, т.е. на 10-15 дБ. Для увеличения звукоизоляции двустенной конструкции с точечными мостиками были применены упругие элементы и промежуточная масса. Упругие элементы были такие же и располагались в тех же местах, как и у линейных мостиков. Промежуточная масса представляла собой стальной цилиндр диаметром 40 мм и высотой 60 мм. Устанавливали её в местах расположения упругих элементов. Сначала промежуточную массу устанавливали между пластинами (см. рис. 2. б)). Звукоизоляция двустенной конструкции с точечными мостиками увеличилась от применения промежуточной массы, как это видно на рис. 4., примерно на 8 дБ, т.е. немного больше, чем от применения упругих элементов в линейных мостиках. Затем промежуточные массы были установлены между упругими элементами (см. рис. 4в). Увеличение звукоизоляции при таком соединении пластин достигло максимальных значений (около 15 дБ).

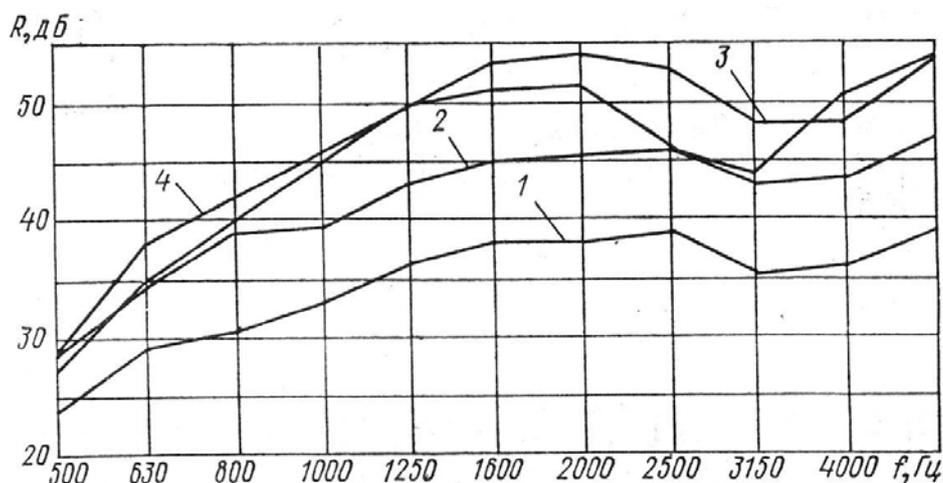


Рисунок 4. Влияние точечных акустических мостиков на звукоизоляцию двустенной конструкции.

1 – конструкция с мостиками по рис. 2а; 2 – конструкция с мостиками по рис. 2б;
3 – конструкция с мостиками по рис.

Таким образом, обычные детали крепления в двустенной конструкции могут существенно уменьшить её звукоизоляцию, являясь мощными звуковыми мостиками. Можно значительно увеличить звукоизоляцию таких преград, введя в акустические мостики упругие элементы и промежуточные массы, которые образуют так называемые *звукоизолирующие мостики*, обеспечивающие максимальную звукоизоляцию для данной двустенной конструкции.

На рис. 5 показана звукоизоляция описанной выше конструкции с точечными акустическими мостиками, без акустических мостиков и без мостиков плюс звукопоглощающий материал АТМ-1 [2] между пластинами. Как видно из рисунка, отсутствие мостиков, а затем установка звукопоглощающего материала между пластинами могут увеличить звукоизоляцию двустенной конструкции на очень большую величину – в данном случае в районе 1000-2000 Гц на 20-35 дБ. Отметим, что реализовать для звукоизоляции применение звукопоглотителя между пластинами удастся лишь при отсутствии акустических мостиков.

Таким образом, специальные акустические мостики рационально применять в качестве звукоизолирующих трех типов: инерционных, упругих и комбинированных. Важно знать их акустические закономерности для конструирования и расчета.

Конструирование и расчет

Рассмотрим случай, когда между пластинами находится слой воздуха и стержни-мостики расположены перпендикулярно к обеим пластинам и жестко с ними соединены. Примем, что колебания каждого отдельного мостика практически не зависят от всех других. Представим интенсивность звука, прошедшего через двустенную конструкцию, суммой интенсивностей звука, прошедших только через воздушный слой J_2 , и передаваемого только акустическими мостиками J_3 . Если интенсивность звука, падающего на двустенную конструкцию, J_1 , а звукоизоляция двустенной конструкции без звуковых мостиков $R_{1,2}$, то звукоизоляция двустенной конструкции с акустическими мостиками

$$R = 10 \lg \left(\frac{J_1}{J_2 + J_3} \right) = -10 \lg \left(10^{-\frac{R_{1,2}}{10}} + \frac{J_3}{J_1} \right)$$

Следуя Л. Кремеру и М. Хеклю в [2], отношение искомым интенсивностей запишем так:

$$\frac{J_3}{J_1} = \frac{\rho_0 c_0 S_2 v_h^2 \varepsilon_h n}{J_1} = \left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{-\frac{R_1}{10}},$$

где S_2 – площадь второй (и первой) пластины;

v_h – колебательная скорость звукового мостика в месте соединения его со второй пластиной;

ε_h – коэффициент излучения второй пластины при возбуждении ее одним мостиком;

n – число звуковых мостиков;

v_1 – колебательная скорость первой пластины;

ε_1 – коэффициент излучения первой пластины;

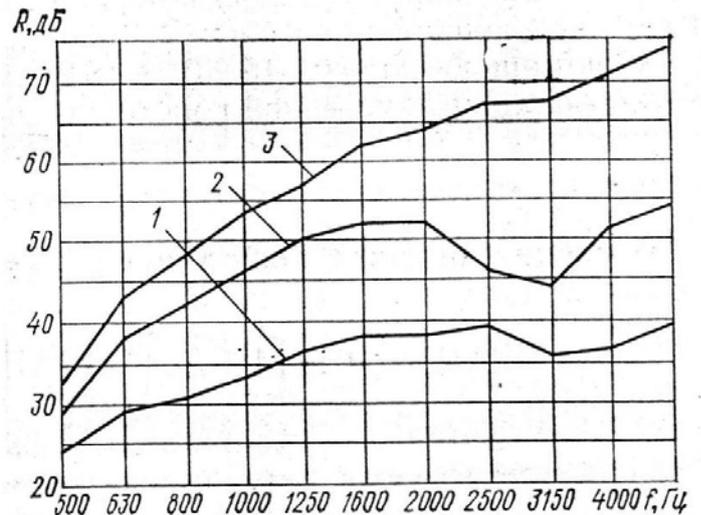


Рисунок 5. Максимальное увеличение звукоизоляции двустенной конструкции за счет исключения звуковых мостиков и установки звукопоглощающего материала.

- 1 – между пластинами звуковые мостики (стальные шпильки);
- 2 – без звуковых мостиков;
- 3 – без звуковых мостиков плюс звукопоглощающий материал АТМ-1.

R_1 – звукоизоляция первой пластины.

Тогда можно представить выражение для звукоизоляции двустенной конструкции с акустическими мостиками следующей формулой:

$$R = R_{1,2} - \Delta R_M$$

Здесь величина, оценивающая влияние акустических мостиков на звукоизоляцию двустенной конструкции, определяется формулой:

$$\Delta R_M = 10 \lg \left[1 + \left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{\frac{R_{1,2} - R_1}{10}} \right] = 10 \lg [1 + A]$$

Рассмотрим две ситуации влияния акустических мостиков, то есть влияния величины ΔR_M на величину R .

Первая ситуация. При выполнении условия

$$\left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{\frac{R_{1,2} - R_1}{10}} = A > 5$$

можно утверждать с точностью до 1 дБ, что $\Delta R_M \approx 10 \lg A = R_{1,2} - R_1 + 10 \lg \left[\left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) \right]$

И тогда звукоизоляция двустенной конструкции с акустическими мостиками

$$R = R_{1,2} - \Delta R_M = R_1 - 10 \lg \left[\left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) \right]$$

Следовательно, звук от первой пластины далее будет передаваться главным образом посредством мостиков. Такие акустические мостики называются звуковыми мостиками. Они сводят на нет звукоизоляционные преимущества двустенной конструкции перед одностенной и могут иногда даже усиливать излучение звука (это важно для музыкальных инструментов типа скрипки или гитары). Звукоизоляция двустенной конструкции со звуковыми мостиками может быть меньше звукоизоляции её первой стенки. Применение *звуковых мостиков* в звукоизолирующих двустенных конструкциях категорически *запрещено*.

Вторая ситуация. При выполнении условия

$$\left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{\frac{R_{1,2} - R_1}{10}} = A < \frac{1}{5}$$

Можно утверждать с точностью до 1 дБ, что

$$\Delta R_M = 10 \lg \left[1 + \left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{\frac{R_{1,2} - R_1}{10}} \right] = 10 \lg [1 + A] < 1 \text{ дБ, то есть } \Delta R_M \approx 0.$$

И тогда $R = R_{1,2} - \Delta R_M \approx R_{1,2}$

Следовательно, в этом случае передача звука через мостики настолько мала, что звукоизоляция двустенной конструкции с мостиками практически равна звукоизоляции без мостиков. Именно такие мостики следует называть *звукоизолирующими мостиками*. Применение именно звукоизолирующих мостиков в строительной практике должно считаться *обязательным*. Из двух рассмотренных разновидностей акустических мостиков – звуковых и звукоизолирующих – далее будем заниматься только звукоизолирующими. Для них, как было показано выше, должно быть выполнено условие:

$$\left| \frac{v_h}{v_1} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{\frac{R_{1,2} - R_1}{10}} = \left| \frac{1}{B} \right|^2 n \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1} \right) 10^{\frac{R_{1,2} - R_1}{10}} = A < \frac{1}{5}$$

Во многих обычных двустенных звукоизолирующих конструкциях длина точечного звукоизолирующего мостика во много раз меньше длины продольной звуковой волны, распространяющейся в нем. Тогда можно принять, что

$$B = \frac{v_1}{v_h} = \left(1 + \frac{Z_{(2)}}{Z_{(1)}} \right) + i \left(\frac{M}{Z_{(1)}} + \frac{Z_{(2)}}{D} \right) \omega,$$

где $Z_{(1)} = 2,3 s_1^2 \sqrt{\rho_1 E_1}$, $Z_{(2)} = 2,3 s_2^2 \sqrt{\rho_2 E_2}$ – импедансы первой и второй пластины при точечном возбуждении;

$D = \frac{E S_M}{l}$ – жесткость мостика (E, S_M, l – модуль упругости, площадь поперечного сечения и длина мостика);

$$M = \frac{\pi d^2}{4} l \rho \text{ – масса мостика (} d \text{ и } \rho \text{ – диаметр и плотность цилиндрического мостика).}$$

Учитывая это соотношение, рассмотрим физическую сущность и основы проектирования и расчета трех основных видов звукоизолирующих мостиков.

Инерционные звукоизолирующие мостики. Если между легкими и податливыми пластинами установлены массивные и жесткие мостики так, что имеет место быть

$$\frac{M}{Z_{(1)}} \gg \frac{Z_{(2)}}{D} \text{ или } M D \gg Z_{(1)} Z_{(2)},$$

то получаем следующее соотношение для инерционного звукоизолирующего мостика:

$$\left| \frac{v_1}{v_h} \right|^2 = \left(1 + \frac{Z_{(2)}}{Z_{(1)}} \right)^2 + \left(\frac{M}{Z_{(1)}} \right)^2 \omega^2$$

Передача звука через мостик такого вида уменьшается, главным образом, с увеличением массы мостика M (инерционный эффект) и с уменьшением массы и жесткости первой пластины (уменьшение величины $Z_{(1)}$). Путем увеличения массы мостиков можно добиться даже большего увеличения звукоизоляции, чем за счет увеличения массы пластин двустенной конструкции. Установка звукоизолирующих инерционных мостиков в легкой двустенной преграде повышает прочность и устойчивость всей конструкции, что важно для изделий промышленной звукоизоляции (звукоизолирующие оболочки машин, звукоизолирующие кабины управления и др.). Это – новый вид акустического мостика. Инерционные мостики необходимо применять для таких двустенных звукоизолирующих конструкций, в которых критические частоты пластин первой и второй несущей конструкции лежат выше расчетного диапазона частот, т.е. выше 10000 Гц. Конструкция и схема установки инерционного звукоизолирующего мостика показана на рис. 6.

Согласно этой схеме инерционный мостик состоит из двух тонких металлических стержней диаметром d_1 , между которыми находится задерживающая масса M в виде цилиндра с диаметром d_2 и высотой l . Стержни и задерживающая масса выполнены как единое целое. Диаметр стержней делается наименьшим, а диаметр задерживающей массы – наибольшим настолько, насколько это позволяют конструктивные соображения. Основным элементом инерционного мостика является его масса:

$$M = \frac{\pi d_2^2}{4} l \rho,$$

где ρ – плотность материала мостика.

Инерционный мостик рекомендуется изготавливать из стали или из другого материала с большой плотностью. Размеры l, d_1 и d_2 выбираются из конструктивных соображений с обязательным выполнением условия $d_1 \ll d_2$.

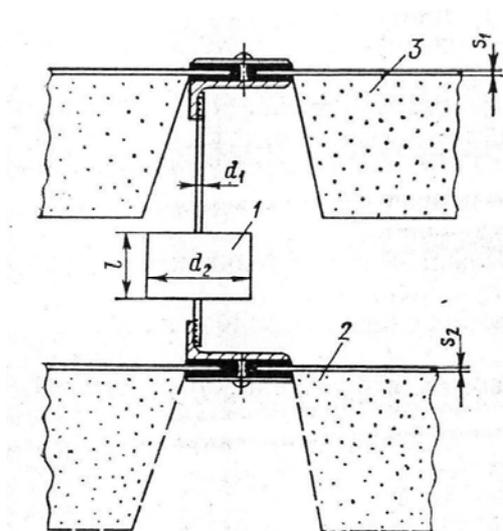


Рис. 6. Звукоизолирующий инерционный мостик.
1 – инерционный мостик; 2 – первая конструкция;
3 – вторая конструкция

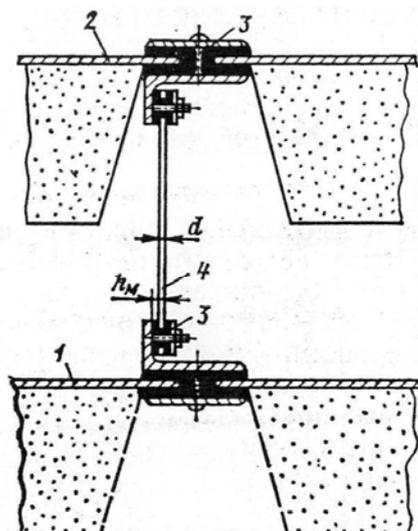


Рис. 7. Звукоизолирующий упругий мостик.
1 – первая конструкция; 2 – вторая конструкция;
3 – резиновая прокладка; 4 – соединительная планка

Масса инерционного мостика M , кг, должна удовлетворять требованию:

$$M \geq \frac{s_1^2}{f_{Г1}} \sqrt{\rho_1 E_1},$$

Где s_1 – толщина пластины одностенной конструкции, м;

ρ_1 – плотность материала пластины, кг/м³;

E_1 – динамический модуль упругости этой же пластины, Па. Первая граничная частота $f_{Г1}$, Гц, определяется по формуле [3]:

$$f_{Г1} = 85 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{h m_1 m_2}},$$

где m_1 и m_2 – поверхностные массы первой и второй пластины, кг/м²;

h – расстояние между пластинами, м.

Массу M подсчитывают отдельно для первой и второй конструкции, а затем выбирают наибольшее значение.

Упругие звукоизолирующие мостики. Если в двустенной конструкции установлены мостики из податливых, упругих и легких материалов между достаточно жесткими и массивными пластинами так, что имеет место быть

$$\frac{M}{Z_{(1)}} \ll \frac{Z_{(2)}}{D} \text{ или } MD \ll Z_{(1)} Z_{(2)},$$

то получаем отношение

$$\left| \frac{v_1}{v_h} \right|^2 = \left(1 + \frac{Z_{(2)}}{Z_{(1)}} \right)^2 + \left(\frac{Z_{(2)}}{D} \right)^2 \omega^2.$$

Для повышения звукоизолирующего эффекта в этом случае необходимо уменьшать жесткость мостика D (отсюда название «упругие звукоизолирующие мостики») и увеличивать массу и жесткость второй пластины (увеличение величины $Z_{(2)}$). Упругие звукоизолирующие мостики давно и наиболее широко

используются для увеличения звукоизоляции и виброизоляции различных конструкций путем применения упругих прокладок и амортизаторов. Это традиционный вид звукоизолирующего мостика. Схема конструкции упругого мостика представлена на рис. 7. Упругие мостики рекомендуется применять для двустенных звукоизолирующих конструкций, у которых критические частоты пластин первой и второй конструкции лежат в пределах расчетного диапазона частот. Упругий мостик состоит обычно из резиновой прокладки толщиной h_M и площадью S_M , которую устанавливают, например, между соединительной планкой и уголками каркаса. Соединительная планка изготавливается обычно из стали или другого прочного материала толщиной d , равной примерно средней толщине пластин специальной двустенной звукоизолирующей конструкции, т.е. $d \approx \frac{s_1 + s_2}{2}$, и шириной, равной примерно $a \approx 2\sqrt{S_M}$ на каждой стороне планки. Основным элементом упругого мостика является резиновая прокладка, акустически разъединяющая первую и вторую конструкцию, с жесткостью D , Н/м, определяемая формулой:

$$D = \frac{E_M S_M}{h_M},$$

где E_M – динамический модуль упругости резиновой прокладки, Па.

Динамическая жесткость резиновой прокладки должна удовлетворить следующему требованию:

$$D \leq s_1^2 f_{T1} \sqrt{\rho_1 E_1}.$$

Все величины и их размерности в правой части этой формулы такие же, как и в формуле для массы M в инерционном мостике. Жесткость упругого мостика подсчитываются отдельно для пластин первой и второй конструкции, а затем выбирают меньшее значение. В качестве упругого элемента звукоизолирующего мостика часто используют амортизатор. Промышленность выпускает большой ассортимент амортизаторов различного назначения. В данном случае наиболее подходят амортизаторы, применяемые для защиты приборов от вибрации. Жесткость амортизатора определяется по формуле:

$$D = \frac{F_M}{\Delta h},$$

где F_M – номинальная нагрузка на амортизатор, Н;

Δh – деформация амортизатора под действием номинальной нагрузки, м.

Пример установки амортизатора в качестве упругого звукоизолирующего мостика показан на рис. 8.

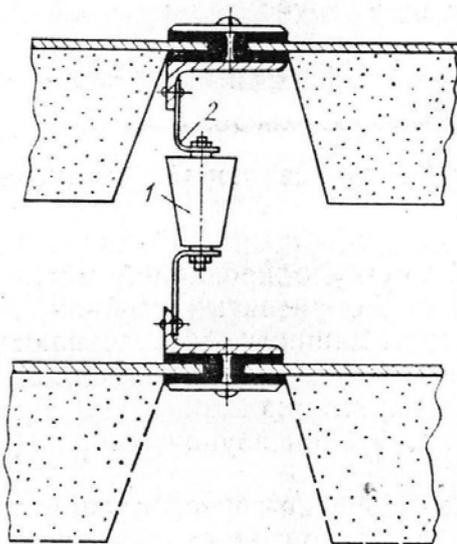


Рисунок 8. Звукоизолирующий инерционный мостик с амортизаторами.
1 – амортизатор; 2 – соединительная планка

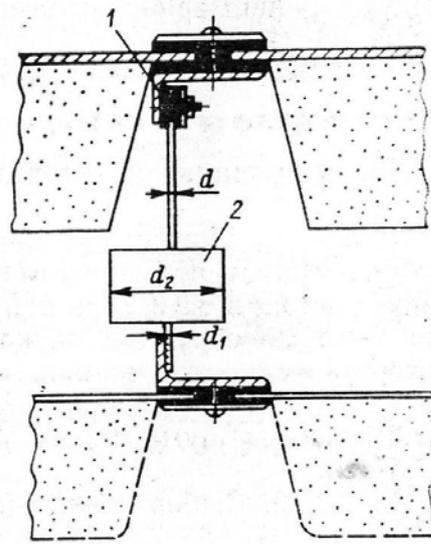


Рисунок 9. Звукоизолирующий комбинируемый мостик.
1 – упругий элемент; 2 – инерционный элемент

Комбинированные звукоизолирующие мостики. Их необходимо применять для таких двустенных звукоизолирующих конструкций, у которых критическая частота пластины одной из конструкций лежит в пределах расчетного диапазона частот, а критическая частота пластины другой – выше этого диапазона. Конструкция и схема установки комбинированного мостика показана на рис. 9. Комбинированный мостик имеет два основных элемента: инерционный и упругий. Эти элементы устанавливаются последовательно: элемент с массой M со стороны конструкции, где критическая частота лежит выше расчетного диапазона частот, а элемент с жесткостью D со стороны конструкции, где критическая частота лежит в пределах расчетного диапазона частот. Масса M инерционного мостика и жесткость D упругого мостика определяются по приведенным выше формулам.

Критическая частота пластины, упомянутая выше, определяется по формуле: $f_{кр} \approx 0,55 \frac{c_0^2}{s c}$,

где c_0 – скорость звука в воздухе, м/с;

s – толщина пластины, м;

c – скорость продольных звуковых волн в пластине, м.

При проектировании инерционных, упругих и комбинированных звукоизолирующих мостиков следует иметь в виду, что их число должно быть минимальным, но достаточным для обеспечения устойчивого соединения между собой первой и второй конструкции.

Для увеличения звукоизоляции двустенной конструкции до максимально возможных значений следует применять представленные в данной статье *инерционные, упругие и комбинированные звукоизолирующие мостики*, а также новые, более совершенные, которые, я полагаю, появятся в обозримом будущем.

В заключение следует также отметить, что главная инновация XXI века в борьбе с шумом, а именно высокоэффективная вакуумная звукоизоляция в жилых, общественных и промышленных зданиях будущего [5], может быть успешно реализована только со звукоизолирующими мостиками.

Научные исследования и опытно-конструкторские разработки с целью создания простых, дешевых, технологичных и высокоэффективных звукоизолирующих мостиков должны быть в строительной акустике продолжены.

Строительная акустика – быстроразвивающаяся отрасль науки и техники [4]. Здесь за последние годы появилось множество международных и европейских стандартов, решение важных задач по силам лишь профессионалам. Необходимо, прежде всего, повышение квалификации проектировщиков по разделу «Строительная акустика». Например, в рамках курса «Проектирование зданий и сооружений» на инженерно-строительном факультете ГОУ СПбГПУ планируются занятия по проектированию и расчету средств борьбы с шумом в жилых, общественных и промышленных зданиях.

Литература

1. Боголепов И.И., Семенова В.Н., Кузнецов Ю.В. Устройство для измерения звукоизоляции. Авторское свидетельство № 408997 // Бюллетень изобретений № 48. М., 1973.
2. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Теория, исследования, проектирование, изготовление, контроль. Монография. Л., 1986.
3. Боголепов И.И. Строительная акустика. Общие профессиональные дисциплины в Политехническом университете. СПб., 2006.
4. Handbook of Noise and Vibration Control / Ed. Malcolm J. Crocker. N.Y., 2007.
5. Боголепов И.И. Вакуумные звукоизолирующие конструкции // Инженерно-строительный журнал, № 1-2008. СПб., 2008.

**Игорь Ильич Боголепов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Тел. раб. 297-59-49, 535-79-92; эл. почта igor.bogolepov@mail.ru