

## Влияние акустических отверстий на звукоизоляцию строительных конструкций

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

В строительных конструкциях жилых, общественных и промышленных зданий часто имеются различные участки с более низкой звукоизоляцией, чем у основной конструкции, или даже небольшие участки с нулевой звукоизоляцией. Участки, отрицательно влияющие на звукоизоляцию всей конструкции, называются акустическими отверстиями. Типичными акустическими отверстиями могут быть окна и двери, сквозные и несквозные щели, технологические отверстия в стенах, перегородках и перекрытиях. Насколько ухудшают акустические отверстия защиту от шума, какова мера опасности и как избежать в случае необходимости этого ухудшения?

С точки зрения физической сущности передачи звуковой энергии через отверстия в конструкции их следует разделять на большие и малые отверстия [1, 2, 3].

Большое акустическое отверстие характеризуется большим отношением линейных размеров площади отверстия к длине падающей на него звуковой волны. Практически при нормальном падении звуковых волн можно считать, что волны проходят через большое акустическое отверстие энергетически по законам геометрической акустики, и прошедшая через отверстие звуковая энергия пропорциональна площади отверстия. Типичные большие акустические отверстия — это окна и двери.

Малое акустическое отверстие характеризуется малым отношением линейных размеров площади отверстия к длине падающей на него звуковой волны. В этом случае нельзя пренебречь дифракционными эффектами (законы геометрической акустики здесь уже неприменимы), в связи с чем через малое акустическое отверстие может проходить меньше звуковой энергии, чем имеется в падающих на отверстие звуковых волнах. Это справедливо при нормальном падении звука. Но при наклонном падении звуковых волн на пластину ситуация меняется. Дело в том, что малое отверстие в тонкой пластине излучает всегда одну и ту же энергию независимо от угла падения звуковых волн, в то время как падающая на отверстие звуковая энергия пропорциональна косинусу угла падения, вследствие чего прохождение звуковой энергии при косом падении увеличивается. При диффузном падении звука, когда звуковые волны одновременно падают под всевозможными углами, малое отверстие может пропускать больше звуковой энергии, чем соответствует его площади. Типичные малые акустические отверстия: щели в окнах и дверях, зазоры в местах прохода коммуникаций, технологические отверстия.

Поскольку понятия «большое» или «малое» акустическое отверстие определяются отношением их линейных размеров к длине волны, а следовательно, зависят от частоты звука, постольку одно и то же отверстие может обладать свойствами большого акустического отверстия в области высоких частот и малого — в области низких частот.

В строительной акустике часто встречаются большие акустические отверстия. Практически важные для инженера-строителя закономерности звукопередачи через большое акустическое отверстие преграды и его влияние на общую звукоизоляцию преграды можно показать при следующих условиях.

Представим себе преграду в виде пластины со звукоизоляцией  $R_1$  и площадью  $S_1$ , которая имеет большое акустическое отверстие со звукоизоляцией  $R_0$  и площадью  $S_0$ . Общая площадь преграды  $S = S_1 + S_0$ . Интенсивность звука в падающих на пластину волнах обозначим  $J_1$ , интенсивность звука, прошедшую через площадь  $S_1$ , обозначим  $J_{31}$ , а интенсивность звука, прошедшую через площадь  $S_0$ , соответственно,  $J_{30}$ . Отсюда  $R_1 = 10 \lg \frac{J_1}{J_{31}}$  и  $R_0 = 10 \lg \frac{J_1}{J_{30}}$ . При энергетическом подходе в рамках геометрической акустики (например, при нормальном падении высокочастотных звуковых волн), используя отношение звуковой мощности в падающих  $W_1$  и прошедших  $W_3$  звуковых волнах, общую звукоизоляцию преграды  $R$  в дБ с отверстием определим формулой:

$$R = 10 \lg \left( \frac{W_1}{W_3} \right) = 10 \lg \left[ \frac{J_1 (S_1 + S_0)}{J_{31} S_1 + J_{30} S_0} \right] = R_1 - \Delta R_0, \quad \text{где } \Delta R_0 = 10 \lg \left[ \frac{1 + \frac{S_0}{S_1} 10^{\frac{R_1 - R_0}{10}}}{1 + \frac{S_0}{S_1}} \right] \quad (1)$$

Как видно из формулы, влияние акустического отверстия  $\Delta R_0$  таково, что одно и то же акустическое отверстие ( $R_0$  и  $\frac{S_0}{S_1}$  – постоянны) уменьшает общую звукоизоляцию преграды  $R$  тем больше, чем больше собственная звукоизоляция преграды  $R_1$ . Поэтому при большой звукоизоляции основных конструкций (стен, перегородок, перекрытий), когда  $R_1 \gg R_0$ , необходимо для снижения шума в первую очередь увеличивать звукоизоляцию их акустических отверстий, то есть величину  $R_0$ , ибо именно она решающим образом влияет на результат. Например, если в стене кабины управления имеется застекленное окно, площадь которого в десять раз меньше площади кабины ( $\frac{S_0}{S_1} = 10$ ), а звукоизоляция окна на определенной частоте меньше собственной звукоизоляции стены на 30 дБ ( $R_1 - R_0 = 30$ ), то это окно уменьшит звукоизоляцию стены, как это следует из формулы, на 20 дБ. Если увеличить собственную звукоизоляцию стены на 30 дБ, а окно оставить без изменений ( $R_1 - R_0 = 60$ ), то окно уменьшит звукоизоляцию стены уже на 50 дБ ( $\Delta R_0 = 50$ ).

В частном случае (например, открытая форточка в стене или открытый иллюминатор в звукоизолирующем боксе машины), когда сквозное отверстие занимает малую площадь по сравнению с площадью преграды ( $\frac{S_0}{S_1} \ll 1, R_0 = 0$ ), то при большой собственной звукоизоляции преграды  $R_1$  имеем  $1 + \frac{S_0}{S_1} \approx 1$  и  $\frac{S_0}{S_1} 10^{\frac{R_1}{10}} \gg 1$ . Общая звукоизоляция такой преграды со сквозным отверстием:

$$R \approx R_0 + 10 \lg \left( \frac{S_1}{S_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{S_1}{S_0} \right), \text{ дБ} \quad (2)$$

Получили интересный для практики результат: общая звукоизоляция преграды  $R$  при малой площади сквозного отверстия с  $R_0 = 0$  и большой звукоизоляции основной преграды  $R_1$  зависит только от отношения площади отверстия к площади преграды без отверстия и не зависит от звукоизоляции преграды. При большом отверстии она, естественно, равна нулю. Очень часто звукоизоляция, например, окон или кожухов машин определяется именно щелями и потому при разной звукоизоляции преграды практически оказывается одинаковой.

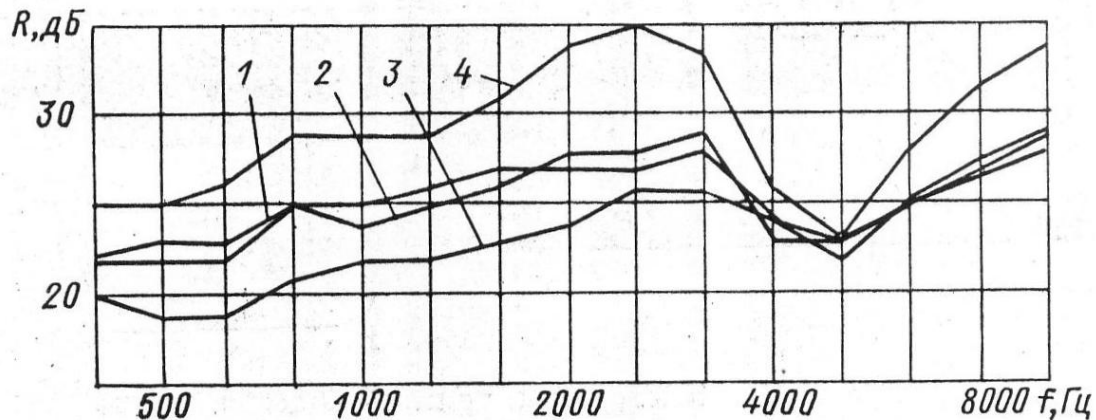
Для малого акустического отверстия при  $\frac{S_0}{S_1} \ll 1, R_0 = 0$  и большой звукоизоляции  $R_1$  формула влияния акустического отверстия принимает вид:

$$\Delta R_0 = 10 \lg \left[ \frac{1 + \varphi \frac{S_0}{S_1} 10^{\frac{R_1 - R_0}{10}}}{1 + \frac{S_0}{S_1}} \right] \quad (3)$$

Здесь  $\varphi$  — безразмерный экспериментальный коэффициент, учитывающий увеличение прохождения звука в условиях диффузного звукового поля. Он зависит от величины отверстия и от частоты; его значения могут составлять от 3 до 10. Если, например, принять для малого отверстия  $\frac{S_0}{S_1} = 0,001$ , звукоизоляцию без отверстия  $R_1 = 30 \text{ дБ}$  и коэффициент  $\varphi = 4$ , то уменьшение звукоизоляции от отверстия составит примерно  $\Delta R_0 = 7 \text{ дБ}$  и, таким образом, звукоизоляция пластины будет уже порядка  $R = 23 \text{ дБ}$ . В расчетах звукоизоляции пластин с запасом на незнание рекомендуется принимать этот коэффициент:  $\varphi = 10$ .

Рассмотрим в качестве иллюстрации один из результатов экспериментального исследования влияния акустических отверстий на звукоизоляцию преграды, проведенного автором [1, 2]. Измерения звукоизоляции проводились в звукомерных камерах реверберационным методом по международному стандарту ISO 140 [1].

В данном случае опыт состоял в определении влияния на звукоизоляцию дюралюминиевой пластины размерами 1000 на 1100 мм<sup>2</sup> и толщиной 3 мм сквозных отверстий равной площади  $S_0 \approx 10 \text{ см}^2$ , но выполненных по-разному: а) в виде одного большого отверстия диаметром 36 мм в центре пластины; б) в виде 16 малых отверстий диаметром 9 мм, расположенных по пластине равномерно; в) в виде щели шириной в 1 мм и длиной 1000 мм в центре пластины, расположенной параллельно более короткой стороне пластины. На рис. 1 показаны частотные зависимости звукоизоляции пластины без отверстий и с указанными отверстиями при одинаковом отношении  $\frac{S_1}{S_0} \approx 1000$ .



**Рисунок 1. Частотные зависимости звукоизоляции пластины с разными отверстиями одинаковой площади и без отверстий**

**1 – одно большое отверстие, 2 – 16 малых отверстий, 3 – щель, 4 – без отверстий**

Из рисунка видно, что, во-первых, акустические отверстия существенно ухудшают звукоизоляцию в широком диапазоне частот; во-вторых, на высоких частотах щель и круглые отверстия равной площади ухудшают звукоизоляцию на одну и ту же величину (эффект большого отверстия), на средних частотах щель ухудшает звукоизоляцию больше, чем точечные отверстия (эффект сочетания малого и большого отверстия); в третьих, на средних частотах одно отверстие диаметром 38 мм и 16 отверстий диаметром 9 мм равной площади уменьшили звукоизоляцию пластины практически одинаково (эффект большого отверстия). В районе критической частоты ( $f_{кр} \approx 4000 \text{ Гц}$ ) звук проходит через пластину и отверстия примерно с равной интенсивностью, то есть  $R_1 - R_0 \approx 0$ , и поэтому для большого отверстия  $\Delta R_0 \approx 0$ . По формуле для малого отверстия для  $\frac{S_1}{S_0} \approx 1000$ ,  $R_1 \approx 30$ ,  $\varphi = 4$  имеем  $\Delta R_0 \approx 7 \text{ дБ}$ , что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Напомним бытующее в науке и, как показано выше, не лишённое основания мнение американских инженеров-акустиков [3]: ничто так не ухудшает звукоизоляцию преграды, как отверстия — образно говоря, «если вы сделали очень хорошую звукоизоляцию комнаты, но оставили открытой замочную скважину, то все ваши усилия по обеспечению тишины могут быть тщетны» (известный американский инженер-акустик А. Сэбин).

Отрицательное влияние *сквозных* акустических отверстий на звукоизоляцию конструкций должно быть устранено надёжной *герметизацией*. Выполнение этого требования объясняет, например, широкое применение так называемых звукоизолирующих стеклопакетов, где основной эффект достаточно большой звукоизоляции определяется именно хорошей герметизацией окна. Требование по ликвидации акустических отверстий должно выполняться неукоснительно и во всех других необходимых для хорошей звукоизоляции обстоятельствах. По крайней мере, если все участки конструкции будут иметь одинаковую звукоизоляцию, то ухудшение защиты от шума по причине акустических отверстий точно не будет. К этому очевидному, но иногда трудновыполнимому условию максимально возможной в данном случае звукоизоляции надо стремиться всегда. Окончательное слово здесь остается за результатами измерения звукоизоляции [1].

Главный санитарный врач Москвы Николай Филатов в «Российской газете» от 21 января 2008 г. заявил, что за последние 10 лет из-за лишних децибел в городе в 2-3 раза возросло количество сердечнососудистых заболеваний и гипертонии, и что излишне громкие звуки даже сокращают на 8-12 лет продолжительность жизни москвичей. Столичные власти обеспокоены: почти 70 процентов территории Москвы находятся в зоне

шумового дискомфорта. Не лучше обстоит дело и в других городах России и мира. Поэтому обеспечение надежной звукоизоляции людей в жилых, общественных и промышленных зданиях, в том числе и за счет ликвидации опасных акустических отверстий в строительных конструкциях, продолжает оставаться актуальным вопросом.

## Литература

### 1. Международный стандарт по измерению звукоизоляции

ISO 140-1:1997	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 1. Требования к лабораторному испытательному оборудованию с подавлением побочных путей распространения звука
ISO 140-1:1997/ Amd 1.2004	Specific requirements on the frame of the test opening for lightweight twin leaf partitions	Изменение 1. Частные требования к каркасу испытательного проема для легких двухслойных перегородок
ISO 140-2:1991	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Determination, verification and application of precision data	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 2. Методы получения, подтверждения и применения информации о точности измерений
ISO 140-2:1991/ Cor 1.1993	Installation guidelines for lightweight twin leaf partitions	Руководство по установке легких двухслойных перегородок
ISO 140-3:1995	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 3. Лабораторные измерения звукоизоляции элементами зданий
ISO 140-4:1998	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 4. Измерение звукоизоляции между помещениями в реальных условиях
ISO 140-5:1998	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 5. Измерение звукоизоляции фасада здания и его частей в реальных условиях
ISO 140-6:1998	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 6. Лабораторные измерения звукоизоляции ударного шума полами
ISO 140-7:1998	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 7. Измерения звукоизоляции ударного шума полами в реальных условиях
ISO 140-8:1997	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 8. Лабораторные измерения ослабления передачи ударного шума напольным покрытием на тяжелом полу
ISO 140-10:1991	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 10: Laboratory measurement of airborne sound insulation of small building elements	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 10. Лабораторные измерения звукоизоляции воздушного шума малыми элементами конструкций

ISO 140-11:2005	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 11. Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact sound by floor coverings on lightweight reference floors	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 11. Лабораторные измерения ослабления передачи ударного шума напольными покрытиями по облегченному полу
ISO 140-14:2004	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 14: Guidelines for special situations in the field	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 14. Руководство по проведению измерений в особых полевых условиях
ISO 140-16:2006	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 16: Laboratory measurement of the sound reduction index improvement by additional lining	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 16. Лабораторные измерения повышения звукоизоляции за счет дополнительной облицовки
ISO 140-18:2006	Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 18: Laboratory measurement of sound generated by rainfall on building elements	Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий. Часть 18. Лабораторные измерения шума, возникающего от падения осадков на элементы зданий

2. Боголепов И.И. Строительная акустика. Общие профессиональные дисциплины в политехническом университете. Выпуск 2. / Под научной ред. Козлова В.Н. СПб., 2006.
3. Handbook of Noise and Vibration Control / Ed. Malcolm J. Crocker. N..Y.: John Wiley and Sons, 2007.

*\*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*