

Использование вакуума для звукоизоляции.

Боголепов И.И., д.т.н., проф. Инж.-строт. Ф-та СПб го. Политех. Ин-та, ОиВК

Физическое явление, состоящее в том, что звук не может распространяться в пустоте, известно давно и считается общепризнанным научным фактом. В школе, например, иногда демонстрируется опыт с будильником под стеклянным колпаком, из-под которого выкачан воздух: видно, что будильник звенит, а звука не слышно. Предложения об использовании вакуума для звукоизоляции делались неоднократно. Однако, насколько можно судить по опубликованным данным, вакуумные конструкции в качестве звукоизолятора никогда до сих пор не использовались (в отличие от широкого применения их в качестве теплоизолятора, например, в термосах). В чем же дело?

Рассмотрим воздушную среду с импедансом Z_0 по обе стороны двустенной конструкции, между стенками которой с импедансами Z_1 и Z_2 на расстоянии d находится газообразная среда с импедансом Z_3 . При нормальном падении плоских гармонических звуковых волн на эту конструкцию звукоизоляция ее равна:

$$R = 10 \lg \frac{e^{i(k_3 - k_0)d}}{4Z_0Z_3} (Z_3 + Z_0)^2 \left\{ \left[\frac{Z_1}{2Z_0} \left(\frac{Z_3 - Z_0}{Z_3 + Z_0} \right) - \left(1 + \frac{Z_1}{2Z_0} \right) \right] \left[\frac{Z_2}{2Z_0} \left(\frac{Z_3 - Z_0}{Z_3 + Z_0} \right) - \left(1 + \frac{Z_2}{2Z_0} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{Z_1}{2Z_0} - \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} \right) \left(\frac{Z_3 - Z_0}{Z_3 + Z_0} \right) \right] \left[\frac{Z_2}{2Z_0} - \left(1 + \frac{Z_2}{2Z_0} \right) \left(\frac{Z_3 - Z_0}{Z_3 + Z_0} \right) \right] e^{-2ik_3d} \right\}^2,$$

где k_0 и k_3 есть волновые числа окружающей среды и среды между стенками. Из формулы следует, что при полном разрежении газообразной среды между стенками (при вакууме), т.е. при $Z_3 = 0$, звукоизоляция двустенной конструкции стремится к бесконечности, т.е. $R \rightarrow \infty$. Таким образом, вакуумные конструкции теоретически обладают идеальной звукоизоляцией.

Однако практически полного вакуума достичь нельзя, и между стенками вакуумной конструкции кроме разреженной среды всегда находятся также соединительные элементы и стенки, ограждающие разреженную среду с боков. Именно недостаточная выясненность вопроса влияния этих двух факторов на звукоизоляцию ставила рациональность применения этого способа борьбы под сомнение многие годы.

Первое серьезное исследование этого вопроса было проведено, как известно, Эрвином Майером. Уже при пробном разрежении им межстеночного пространства двустенной металлической конструкции (с помощью воздухонасоса) простое прослушивание показало, что звукоизоляция стала хуже. Измерения подтвердили эти результаты (сначала для почти 0,5 атм. внутри стены, а затем для понижения давления на 1 атм.).

Стало ясно, что звукоизоляция благодаря разрежению ухудшается. Объяснение этой неожиданной для всех неудачи Майер пытался найти по количественным результатам. В указанной статье он писал: «Вследствие большой нагрузки (наибольшее значение 26 тонн) обе металлические стены так сильно натянуты и одновременно с такой большой силой сжимаются друг к другу, что вся конструкция в целом ведет себя как согласованная одиночная стена».

Выдающийся немецкий акустик, проведя пионерский эксперимент, пришел к выводу о том, что три проблемы делают вакуумную звукоизоляцию бесперспективной. Во-первых, ограничительные элементы и опоры между пластинами являются звуковыми мостиками,

через которые звук идет от одной стенки к другой, обходя вакуум. Во-вторых, огромное наружное давление на стенки, создаваемое из-за вакуума между ними, может разрушить конструкцию.

В-третьих, трудно обеспечить достаточную герметичность вакуумной конструкции. Авторитет Майера был настолько велик, что к вопросу вакуумной звукоизоляции ученые и инженеры долго не возвращались. И вакуумная звукоизоляция оказалась в загоне (лукавая реклама не в счет). Исследования Майера дали другой важный результат. Ученый впервые обратил пристальное внимание на прохождение звука через «звуковые мостики» в двустенных конструкциях и сформулировал основную идею уменьшения проходимости звуковой энергии через такие мостики.

Статья Майера послужила отправной точкой многих научных изысканий, в частности другого выдающегося немецкого акустика Л. Кремера и его ученика М. Хекля, а также в России [6–10]. Позднее эта идея была распространена на все виды звукоизоляции и получила название «принципа рассогласования импедансов». Спустя десятилетия после указанного пионерского эксперимента автором была предпринята попытка продолжить исследования Майера.

Для продолжения работ надо было создать новую, специальную экспериментальную установку, на которой можно было бы измерить с высокой степенью точности и надежности звукоизоляцию двустенных конструкций как со звуковыми и звукоизолирующими мостиками, так и без них, и удобно проводить испытания вакуумных конструкций. Такая установка была создана, и если судить по известным автору опубликованным данным, — впервые в мире.

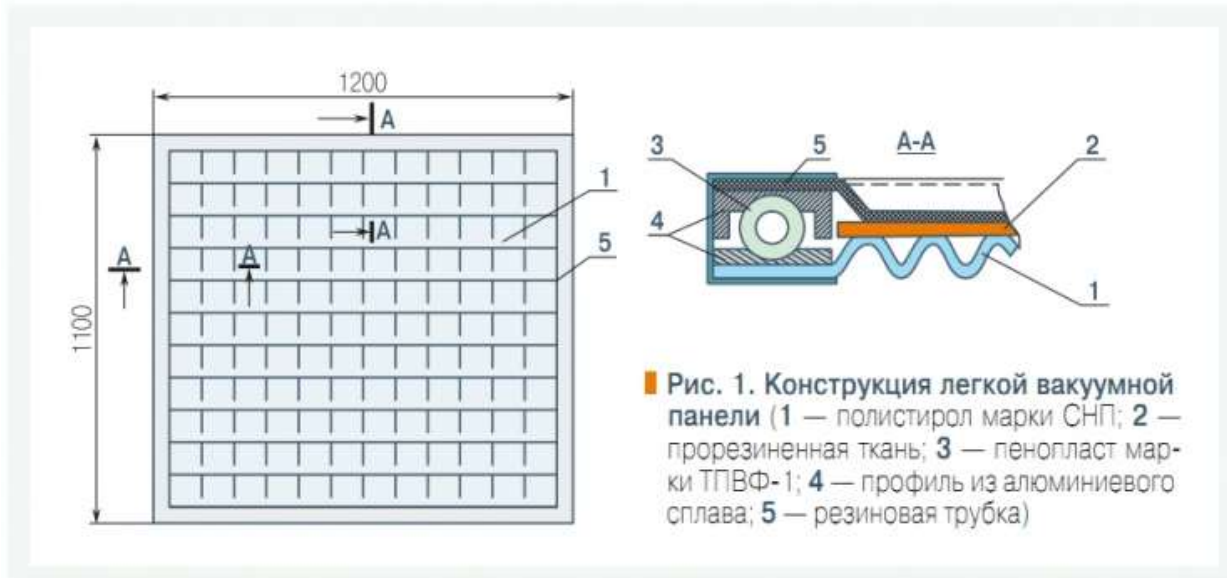
Теперь можно было начать новое исследование для уточнения ответа на вопрос о рациональности применения вакуума для звукоизоляции в реальных конструкциях. С тех баснословных времен (сороковые годы прошлого столетия) научно-технический прогресс достиг очень больших успехов. Исследование было проведено на базе этих успехов: с использованием современных технологий изготовления вакуумных конструкций, вакуумной техники получения и контроля вакуума и электронных средств измерения звукоизоляции.

Ниже излагаются методика проведения нового эксперимента и наиболее важные его результаты. Специально для этого эксперимента были спроектированы, изготовлены и проверены на герметичность вакуумные конструкции размерами 1100×1200 мм двух типов: очень легкие и очень массивные. Испытания звукоизоляции проводились в указанной выше установке методом реверберационных камер по международному стандарту, признанному основным Международной организацией по стандартизации (ISO 140).

Предельная погрешность результата испытаний не превышала 1 дБ при надежности (вероятности) этой оценки 0,95. Легкая вакуумная конструкция была изготовлена из двух гофрированных листов полистирола толщиной 1,5 мм. Гофры одного листа были расположены перпендикулярно гофрам другого. Между гофрами находилась пластина из эластичной пористой пластмассы толщиной 2 мм. Внутреннее пространство панели (вакуумная полость) образовывалась только за счет гофр.

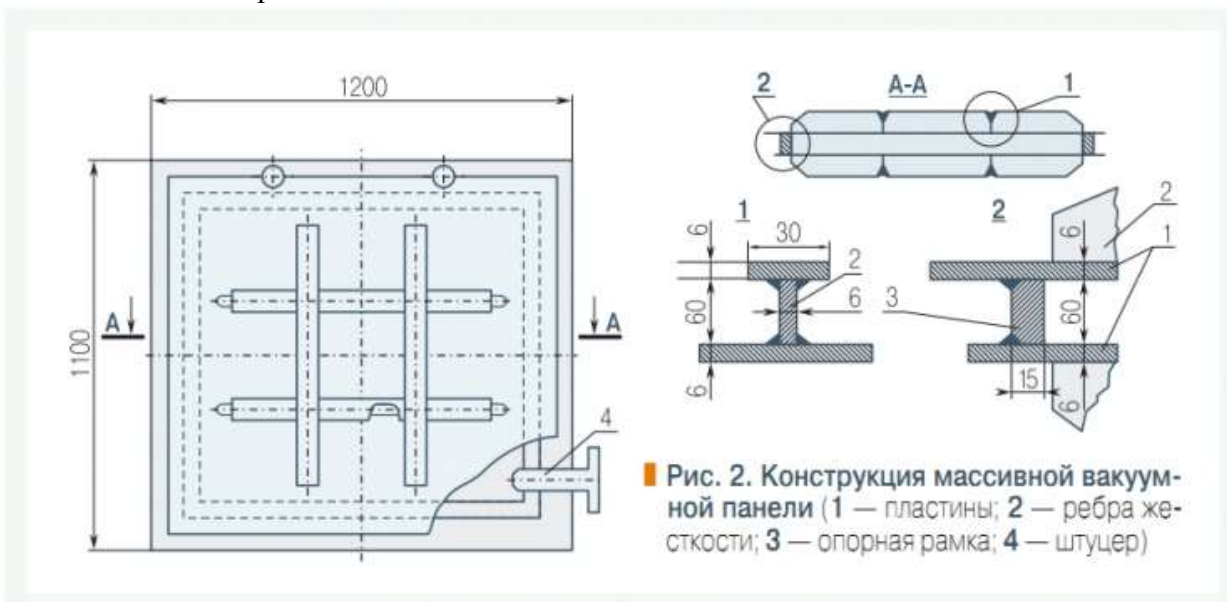
По контуру панели гофрированные листы были герметично соединены между собой через звукоизолирующий мостик, состоящий из двух металлических профилей и резиновой трубки между ними. Трубка была выполнена герметичной, наподобие камеры шины

автомобиля. Внутри нее был сжатый воздух. Критическая частота каждого листа составляла примерно 6300 Гц. Схема легкой панели показана на рис. 1.



Массивная вакуумная конструкция представляла собой двустенную панель из двух стальных одинаковых листов толщиной 6 мм, которые жестко соединены между собой стальной рамкой толщиной 15 мм, соединенной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом за три прохода. Каждая пластина снаружи имела четыре стальных ребра жесткости толщиной 6 мм. Расстояние между пластинами (толщина пространства, в котором создавался вакуум) равнялась 60 мм.

Испытание на герметичность производилась гелиевым течеискателем. Критическая частота каждой пластины равна примерно 2000 Гц. Схема массивной вакуумной панели также показана на рис. 2.



Внутренние пространства как в легкой, так и в массивной панелях соединялись через вакуумный штуцер и трубопровод с форвакуумным и паромасляными насосами. Степень разрежения (величина вакуума) во внутреннем пространстве панелей определялась и контролировалась вакуумметром с помощью термпарного и ионизационного манометров.

Результаты измерения звукоизоляции легкой вакуумной панели представлены на рис. 3.

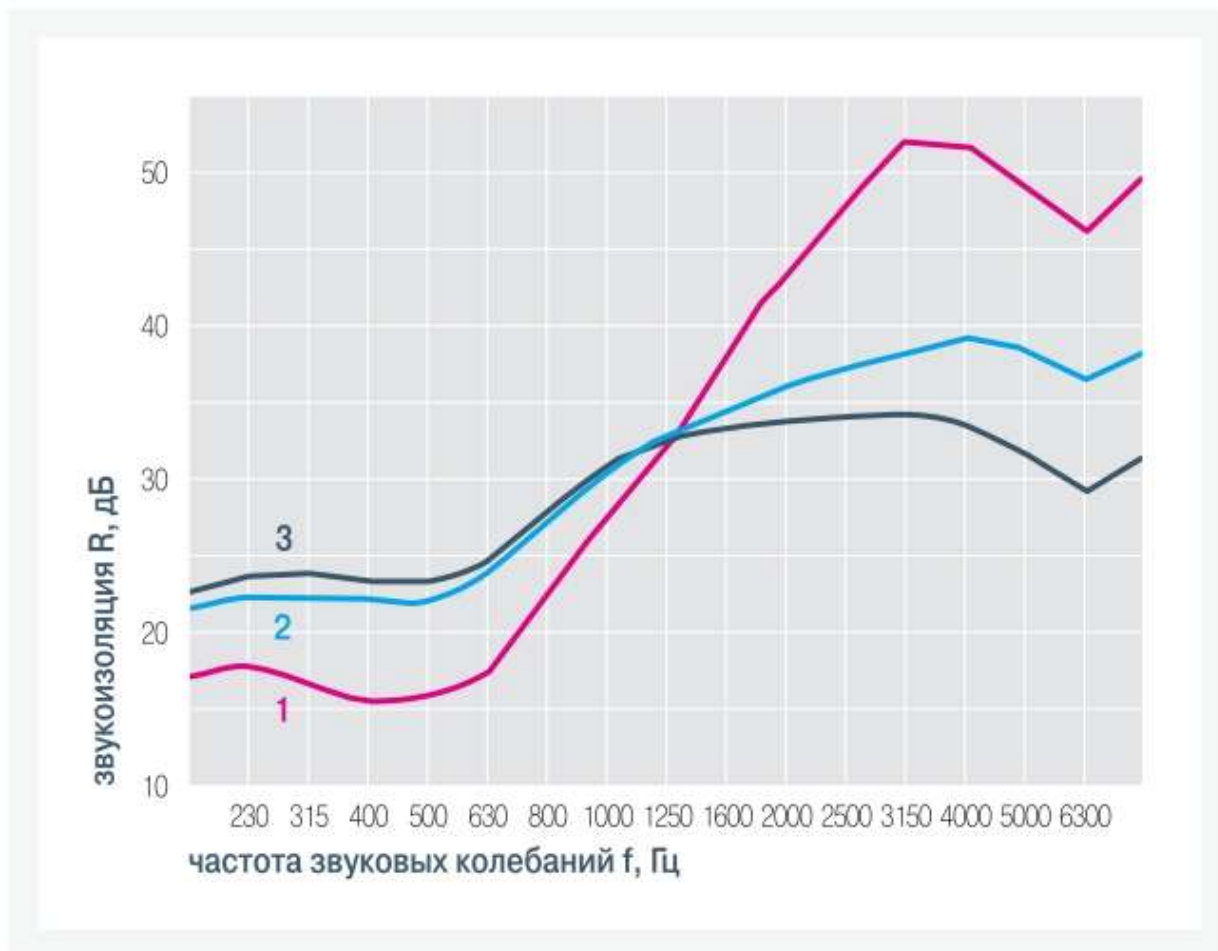


Рис. 3. Звукоизоляция легкой вакуумной панели (1 — давление внутри панели 10^5 Па (1,0 атм); 2 — давление внутри панели $9 \cdot 10^4$ Па (0,9 атм); 3 — давление внутри панели $2 \cdot 10^3$ Па (0,02 атм))

Итак, в области высоких и отчасти средних частот звукоизоляция ухудшилась, а в области низких — улучшилась. Кривая звукоизоляции по мере откачки воздуха поворачивается по часовой стрелке относительно средней части диапазона частот, сохраняя минимум на критической частоте пластины около 6300 Гц.

При этом внешнее атмосферное давление со все большей силой прижимает гофры листов друг к другу и образует, по всей видимости, эффективные звуковые мостики по всей площади панели. В этих условиях имеющиеся звукоизолирующие мостики по контуру панели оказались неэффективными. При уменьшении давления внутри панели внешняя сила сжимает панель с большой силой. Но критическая частота не смещается по частотной оси, значит, звукоизоляция панели в этой частотной области сохраняет свойства двустенной конструкции.

Следовательно, из-за большого давления эластичная пористая пластмасса прокладки между гофрами, уплотняясь, превращается в местах контактов листов в звуковые мостики, которые и ухудшают звукоизоляцию легкой панели. В итоге по мере откачки воздуха звуковая энергия начинает во все больших количествах идти не через разреженный воздух, а через образовавшиеся мостики. Полученный в этой части результат соответствует данным эксперимента Майера.

Однако с понижением частоты картина меняется: звукоизоляция легкой панели по мере откачки воздуха начинает увеличиваться. Гипотетически причина этого увеличения состоит, видимо, в том, что в области низких частот двустенная панель ведет себя как одностенная трехслойная конструкция, модуль сдвига среднего слоя которой увеличивается с увеличением внешнего давления.

Действительно, если критические частоты изгибных волн панели находятся выше определенного диапазона частот, а критическая частота сдвиговых волн панели лежит ниже этого диапазона, то можно ожидать роста звукоизоляции панели за счет увеличения модуля сдвига. Об этом косвенно говорит тот факт, что при небольшом вакууме в 9104 Па (0,9 атм) и при большом вакууме в 2103 Па (0,02 атм) звукоизоляция увеличилась примерно на одинаковую величину, т.е. если сжать пористую пластмассу до монолитного состояния, то дальнейшее сжатие мало увеличит модуль сдвига, а следовательно, и звукоизоляцию панели. Это новый результат.

Сильно прижатые друг к другу через пористую пластмассу листы с перпендикулярными гофрами по сочетанию малого веса и большой цилиндрической жесткости напоминают сотовые металлические конструкции. Именно на сотовых конструкциях была в дальнейшем проверена и получила экспериментальное подтверждение гипотеза увеличения звукоизоляции трехслойных панелей за счет увеличения модуля сдвига промежуточного слоя.

Но этот новый результат выходит за рамки данной статьи. Таким образом, непосредственно эффективно использовать вакуум для увеличения звукоизоляции легких конструкций не удалось, но попутно был получен важный результат, позволивший в дальнейшем увеличить звукоизоляцию таких новых строительных панелей, какими являются упомянутые выше сотовые металлические конструкции, за счет увеличения их изгибной жесткости и жесткости на сдвиг.

Результаты измерения звукоизоляции массивной вакуумной конструкции представлены на рис. 4. Итак, общая картина звукоизоляции после откачки воздуха из вакуумной полости получилась иная, нежели для легкой вакуумной конструкции. Отметим ее четыре существенные особенности. 1. Испытания звукоизоляции проводились при различном вакууме очень широкого диапазона, а именно при величинах $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па ($1,33 \cdot 10^{-7}$ атм); $1,33 \cdot 10$ Па ($1,33 \cdot 10^{-4}$ атм) и $2 \cdot 10^4$ Па (0,2 атм).

Важный экспериментальный факт — изменение вакуума в полости массивной панели практически не повлияло на звукоизоляцию при всех указанных разрежения (единая кривая 2 по сравнению со звукоизоляцией без вакуума — кривая 1). Для легкой панели степень вакуума сильно влияла на звукоизоляцию. 2. На высоких и средних частотах даже высокий вакуум ($1,33 \cdot 10^{-2}$ Па) совершенно не повлиял (ни положительно, ни отрицательно) на звукоизоляцию массивной конструкции.

А у легкой панели на этих частотах даже небольшой вакуум значительно уменьшил звукоизоляцию. 3. На самых низких частотах представленного диапазона при создании вакуума (независимо от его степени — подчеркнем это) звукоизоляция массивной панели проявила себя с несколько большей тенденцией подъема в сторону низких частот, чем у легкой панели. Важный экспериментальный факт — звукоизоляция на самых низких частотах сравнялась и стала даже несколько больше, чем звукоизоляция на самых высоких частотах.

Появилось новое решение старой проблемы создания высокой звукоизоляции на низких частотах без значительного утяжеления преграды. 4. Кривая звукоизоляции массивной конструкции имеет характерный вид: она почти симметрична в диапазоне 200–8000 Гц, имеет посередине этого диапазона максимум, по обе стороны которого наблюдаются минимумы; по краям указанного диапазона звукоизоляция увеличивается в сторону самых высоких и, что особенно важно, в сторону самых низких частот. Кривая имеет W-образный вид.

Первый минимум звукоизоляции в диапазоне 500–630 Гц соответствует основной резонансной частоте двустенной конструкции как единого целого, а второй (в диапазоне 2000–2500 Гц) — критической частоте каждой из пластин двустенной конструкции. Такая W-образная форма кривой звукоизоляции оказалась в дальнейшем исходной для создания новых конструкций с большой цилиндрической жесткостью. Это тоже новый результат.

В итоге общая картина зависимости звукоизоляции массивной панели от вакуума сводится к тому, что кривая звукоизоляции по мере откачки воздуха из вакуумной полости приподнимает свою низкочастотную ветвь относительно примерно того же центра на частотной оси, что и поворот кривой для легкой панели, оставляя без изменения высокочастотную ветвь этой кривой. Критическая частота при откачке воздуха из пространства между пластинами массивной панели не сместилась по частотной оси (также как и у легкой панели).

Значит, можно полагать, что в этой области частот массивная панель постоянно сохраняет свойства двустенной конструкции, несмотря на мощные звуковые мостики по контуру панели (в легкой панели эти мостики появились по всей площади панели по мере откачки воздуха, лишив ее свойств двухстенности). Стало ясно, с учетом данных эксперимента Майера, что звук в области высоких и средних частот передается главным образом через контур массивной панели, а не через пространство между пластинами.

Поэтому вакуум в этой области частот практически не оказал влияния на звукоизоляцию. В области низких частот вакуум даже при наличии мощного звукового мостика по контуру панели увеличил звукоизоляцию массивной конструкции на значительную величину — на 6–12 дБ. Звукоизоляция на самых низких частотах стала больше, чем на самых высоких частотах. Этот новый результат, ранее экспериментально никогда не наблюдаемый, дал импульс для разработки конструкций с большой звукоизоляцией в области низких частот за счет увеличения их жесткости, а не массы, как ранее это традиционно делалось. Это позволило в дальнейшем приступить к разработкам в области инфразвукоизоляции.

Для инфразвукоизоляции увеличение звукоизоляции за счет жесткости оказалось вообще единственным способом получения необходимой звукоизоляции. В связи с этим следует особо подчеркнуть, что увеличение звукоизоляции с понижением частоты для массивной конструкции наблюдается и без вакуума. Теоретически ниже основной резонансной частоты звукоизоляция панели может определяться жесткостью конструкции, и тогда она увеличивается с уменьшением частоты.

После откачки воздуха под действием большой нагрузки стенки конструкции прогибаются внутрь панели, что приводит к появлению дополнительной жесткости и к смещению вследствие этого основной резонансной частоты в сторону высоких частот. Это смещение имеет место на рис. 4.

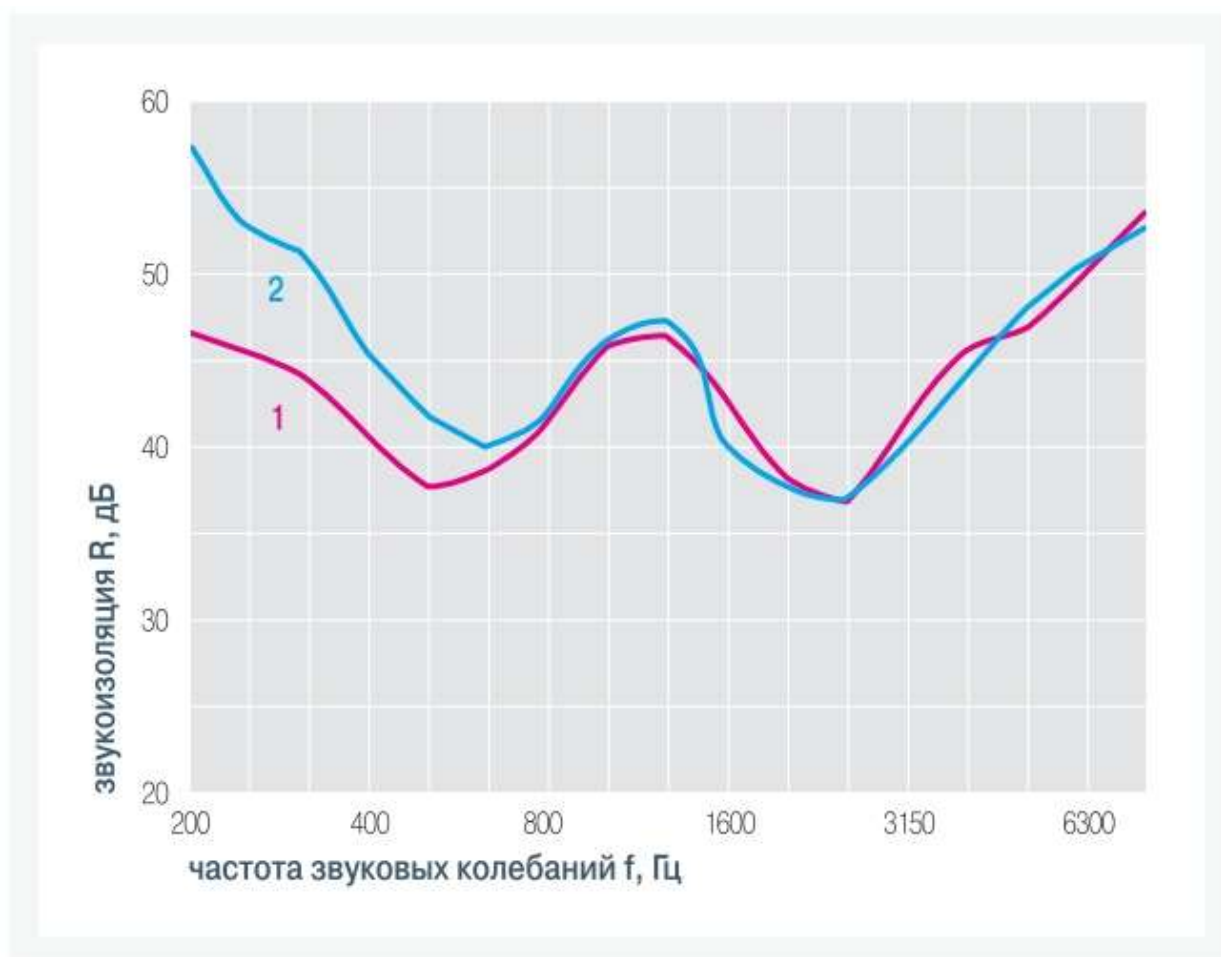


Рис. 4. Звукоизоляция массивной вакуумной панели (1 — при атмосферном давлении; 2 — в вакууме)

Оно вызвало, следует полагать, увеличение звукоизоляции, т.ч. кривая звукоизоляции переместилась параллельно первоначальной: кривая панели при атмосферном давлении внутри диапазона 315–500 Гц идет параллельно кривой панели с вакуумом внутри диапазона 400–630 Гц.

Только ниже полосы 400 Гц начинает проявляться дополнительная звукоизоляция, которую можно отнести непосредственно за счет вакуума.

Вывод:

Для реальной эффективной вакуумной звукоизоляции автором предложена конструкция, указанная в авторском свидетельстве №1270251 — см. рис. 5.

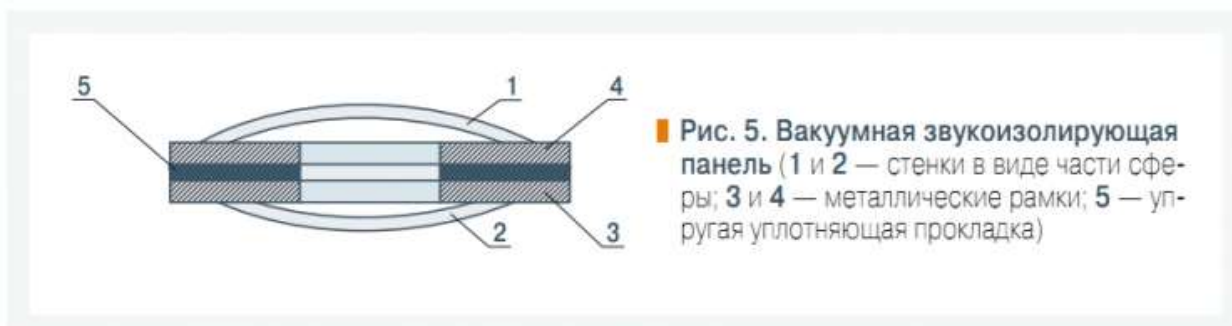


Рис. 5. Вакуумная звукоизолирующая панель (1 и 2 — стенки в виде части сферы; 3 и 4 — металлические рамки; 5 — упругая уплотняющая прокладка)

Звукоизолирующий элемент состоит из двух стенок, выполненных в виде части сферы выпуклостью наружу, прочно и герметично соединенных с массивными рамками, между

которыми установлена виброизолирующая опора в виде упругой уплотняющей прокладки. Между стенками создается вакуум.

Для создания вакуума две стенки с рамками и сплошную резиновую прокладку в разобранном виде помещают в вакуумную камеру, откачивают в камере воздух до необходимого разрежения, прижимают две стенки через прокладку плотно друг к другу и в таком сильно прижатом состоянии конструкцию с вакуумом внутри извлекают из камеры. Внешнее атмосферное давление с очень большой силой прижимает стенки с рамками друг к другу, сжимая прокладку, причем, чем больше вакуум, тем больше сила прижатия и звукоизоляция, а также надежнее герметичность.

Существуют и другие способы создания вакуума, например откачка воздуха из внутренней полости конструкции вакуумными насосами через штуцер, расположенный в одной из рамок конструкции. Выбирая соответствующие импедансы стенок с рамками и прокладок между ними, можно обеспечить по всему контуру необходимую эффективность звукоизолирующего мостика.

Поскольку разреженный воздух, находящийся между стенками, плохо проводит звуковую энергию, а по контуру между стенками имеется звукоизолирующий мостик, так же плохо проводящий звук, то баланс этих двух факторов и обеспечит необходимую звукоизоляцию конструкции в широком диапазоне частот. Вакуумные конструкции, теоретически обладающие идеальной звукоизоляцией, могут найти применение для иллюминаторов и панелей, где одновременно необходима и хорошая теплоизоляция, например в самолетах, скоростном транспорте и на судах, а также в кабинах управления и для кожухов машин, в средствах связи — в кабинах для конфиденциальных переговоров.

В промышленных устройствах механизмы, помещенные в вакуумные оболочки, не будут излучать шум. Прозрачные вакуумные конструкции в медицине обеспечат тишину, хорошую стерильность и визуальный контроль. Вакуумная звукоизоляция, конечно, весьма перспективна и в космических аппаратах. Поэтому научные исследования и опытно-конструкторские разработки в области вакуумной звукоизоляции, я полагаю, будут продолжены.

В концепции долгосрочного развития России до 2020 г. Минэкономразвития РФ особое внимание уделяется инновационному пути становления государства [21]. Шум в мире растет. Основное средство борьбы с ним — звукоизоляция. Вакуумные звукоизолирующие конструкции — это, возможно, главная инновация высокоэффективной звукоизоляции XXI века в сантехнике, отоплении и кондиционировании.