

Вакуумные звукоизолирующие конструкции

Д.т.н., профессор И.И. Боголепов

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). Почему?

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 её равна [1]:

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

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), то есть при $Z_3=0$, звукоизоляция двустенной конструкции стремится к бесконечности, то есть $R \rightarrow \infty$. Таким образом, теоретически вакуумные конструкции 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 ясность вопроса влияния этих двух факторов на звукоизоляцию многие годы ставила под сомнение рациональность применения этого способа.

Первое серьезное исследование этого вопроса было проведено известным немецким акустиком Эрвином Майером [2]. Уже при пробном разрежении им межстеночного пространства двустенной металлической конструкции (с помощью воздухомасляного насоса) простое прослушивание показало, что звукоизоляция стала хуже. Измерения подтвердили эти результаты (сначала для почти половины атмосферы внутри стены, а затем для понижения давления на атмосферу). 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 прижимаются 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.

Но эти 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 началом многих научных изысканий, в частности работ другого выдающегося немецкого акустика Л. Кремера и его ученика М. Хекля [3, 4, 5], а также исследований у нас в стране, например, [6-10]. Позднее эта идея была распространена на все виды звукоизоляции и получила название «принципа рассогласования импедансов» [11].

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 было бы проводить испытания вакуумных конструкций. Такая установка была создана, и если судить по известным автору опубликованным данным, впервые в мире [11- 13].

Теперь можно было начать новое исследование рациональности применения вакуума для звукоизоляции в реальных конструкциях. Со времен первых экспериментов (сороковые годы прошлого столетия) научно-технический прогресс достиг больших успехов. Наши испытания были проведены на базе этих успехов: с использованием современных технологий изготовления вакуумных конструкций, 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 мм на 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 неё был сжатый воздух. Критическая частота каждого листа [11] составляла примерно 6300 Гц. Схема легкой панели показана на рис.1.

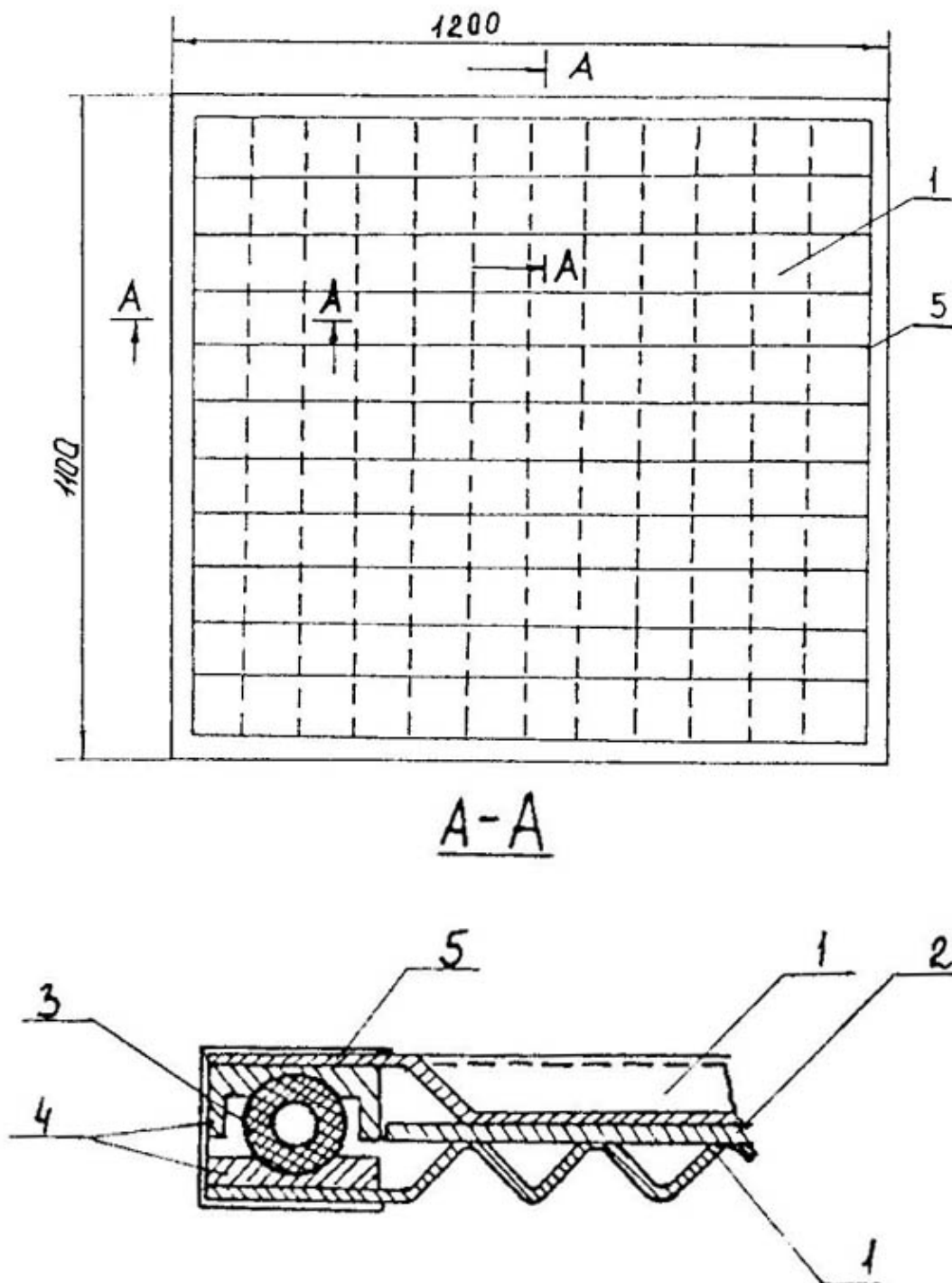


Рис. 1. Конструкция легкой вакуумной панели

1 — полистирол марки СНП; 2 — прорезиненная ткань; 3 — пенопласт марки ТПВФ-1; 4 — профиль из алюминиевого сплава; 5 — резиновая трубка.

Массивная вакуумная конструкция представляла собой двустенную панель из двух стальных одинаковых листов толщиной 6 мм, соединенных между собой жесткой 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) равнялось 60 мм. Испытание на герметичность производилось гелиевым течеискателем. Критическая частота каждой пластины равна примерно 2000 Гц. Схема массивной вакуумной панели показана на рис.2.

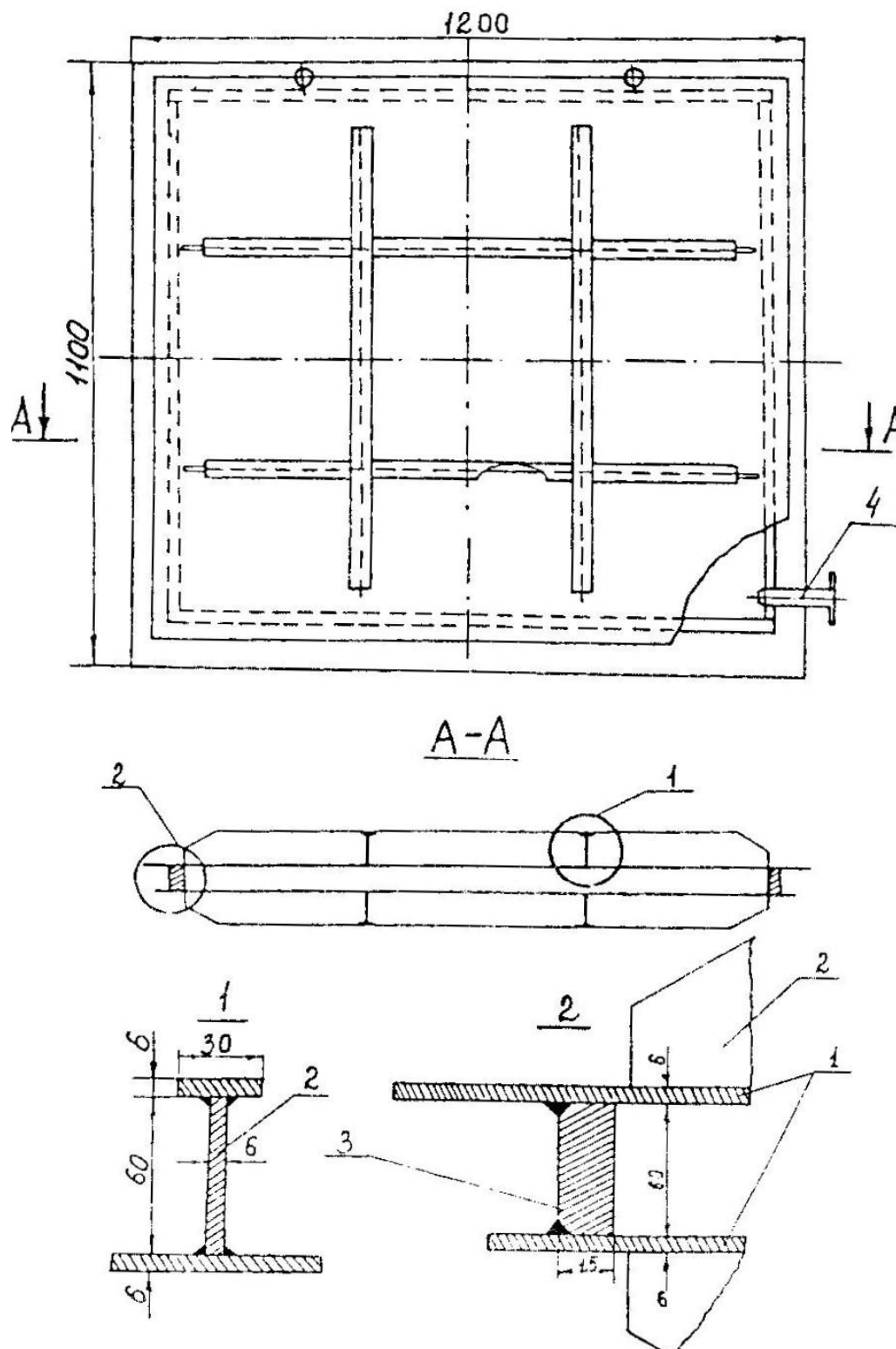


Рис. 2. Конструкция массивной вакуумной панели

1 — пластины; 2 — ребра жесткости; 3 — опорная рамка; 4 — штуцер

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 термопарного и ионизационного манометров.

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

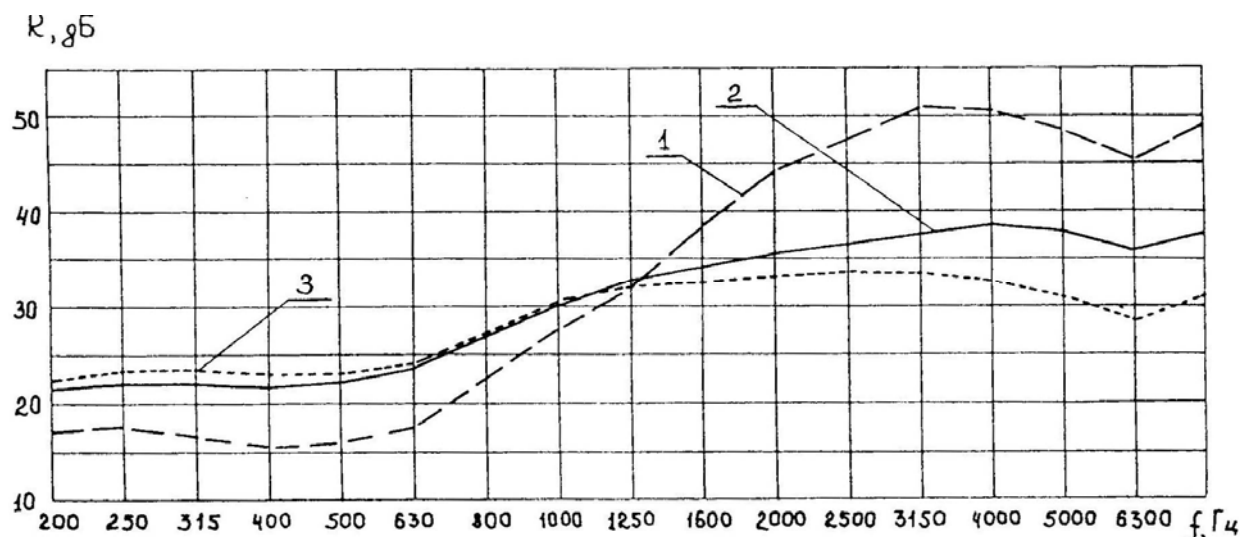


Рис. 3. Звукоизоляция легкой вакуумной панели

- 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 в районе 6300 Гц. При этом внешнее атмосферное давление с всё 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 всё 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 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 — 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 $9 \cdot 10^{-4}$ Па (0,9 атм) и при большом вакууме в $2 \cdot 10^{-5}$ Па (0,02 атм) звукоизоляция увеличилась примерно на одинаковую величину, то есть 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 [14]. 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.

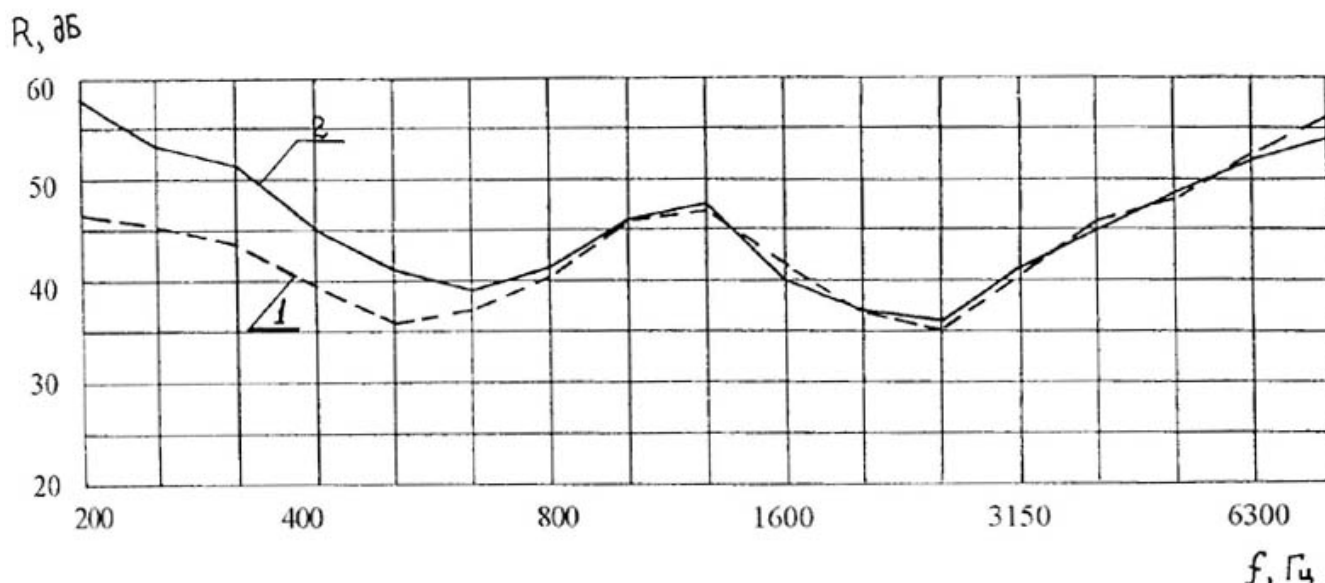


Рис. 4. Звукоизоляция массивной вакуумной панели

1 — при атмосферном давлении; 2 — при вакууме

Итак, общая картина звукоизоляции после откачки воздуха из вакуумной полости здесь получилась иная, чем для легкой вакуумной конструкции. Отметим её четыре существенные особенности.

1. Испытания звукоизоляции проводились при различном вакууме очень широкого диапазона, а именно при $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па ($1,33 \cdot 10^{-7}$ атм), при $1,33 \cdot 10$ Па ($1,33 \cdot 10^{-4}$ атм) и при $2 \cdot 10^4$ Па (0,2 атм). Важный экспериментальный факт: изменения вакуума в полости массивной панели практически не повлияли на звукоизоляцию при всех указанных разрежениях (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, как уже отмечалось, в сторону самых низких частот. По форме эта кривая имеет W-образный вид. Первый минимум звукоизоляции в районе 500-630 Гц соответствует основной резонансной частоте двустенной конструкции как единого целого, а второй минимум в районе 2000-2500 Гц соответствует 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 [14]. 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 (так же, 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 её свойств двустенности).

С учетом данных эксперимента Майера, стало ясно, 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 в 6-12 дБ. Звукоизоляция на самых низких частотах стала больше, чем на самых высоких. 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 это делалось традиционно ранее. Это позволило в дальнейшем приступить к разработкам в области инфразвукоизоляции. Для инфразвукоизоляции увеличение жесткости конструкций оказалось вообще *единственным* способом получения необходимого уровня звукоизоляции [15, 16].

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 [11]. 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. Оно вызвало, следует полагать, увеличение звукоизоляции, так что кривая звукоизоляции переместилась параллельно первоначальной: кривая панели при атмосферном давлении внутри в диапазоне 315 Гц – 500 Гц идет параллельно кривой панели с вакуумом внутри в диапазоне 400 Гц – 630 Гц. Только ниже полосы 400 Гц начинает проявляться дополнительная звукоизоляция, которую можно отнести непосредственно на счет вакуума.

Вывод: главная инновация в области звукоизоляции XXI века

Для реальной высокоэффективной вакуумной звукоизоляции автором статьи предложена конструкция, указанная в авторском свидетельстве № 1270251 [17-20]. Схема такой конструкции представлена на рис. 5.

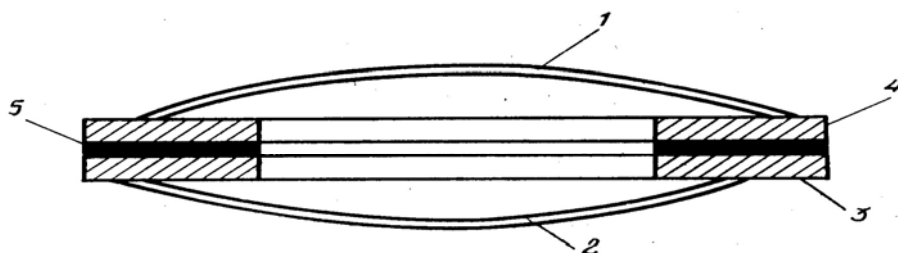


Рис. 5. Вакуумная звукоизолирующая панель

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 извлекают конструкцию с вакуумом внутри 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, тем больше звукоизоляция и тем 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 а) стенок с рамками и б) 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, также 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 широкое применение в промышленных зданиях: механизмы, помещенные в вакуумные оболочки, не будут излучать шум. Прозрачные вакуумные конструкции в медицине обеспечат тишину, хорошую стерильность и визуальный контроль.

Шум в мире растет. Основное средство борьбы с ним — звукоизоляция. В концепции долгосрочного развития России до 2020 года Минэкономразвития РФ особое внимание уделяет инновационному пути становления государства [21]. Вакуумные звукоизолирующие конструкции — это, возможно, главная инновация в высокоэффективной звукоизоляции жилых, общественных и промышленных зданий будущего, а также, конечно, в современной авиакосмической технике. Поэтому научные исследования и опытно-конструкторские разработки в области вакуумной звукоизоляции, я полагаю, будут продолжены.

Список литературы

1. Боголепов И.И. Теоретическое исследование звукоизолирующей способности судовых двустенных конструкций. Труды института, вып. 45. Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения, Л., Изд. «Судостроение», 1963.
2. Meyer E. Versuche über Körperschalleitung (Schallbrücken), Akustische Zeitschrift, № 2, 1937.
3. Cremer L. Calculation of Sound Propagation in Structures, Acustica, vol.3, 1953.
4. Cremer L. Berechnung der Wirkung von Schallbrücken, Acustica, vol.4, 1954.
5. Heckl M. Untersuchung über die Luftschalldämmung von Doppelwänden mit Schallbrücken, ICA, Stuttgart, 1959.
6. Заборов В.И. О звукоизоляции двойных ограждений со связью по контуру. Акустический журнал АН СССР, М., 1965, т. XI, вып. 2.
7. Боголепов И.И. О влиянии звуковых мостиков на звукоизолирующую способность судовых двустенных переборок. В сб. «Борьба с шумом на судах», Изд. «Судостроение», Л., 1965.
8. Боголепов И.И. О звукоизоляции двустенных судовых конструкций. Журнал «Судостроение». № 11, Л., 1966.
9. Боголепов И.И., Авферинок Э.И. Звукоизоляция на судах. Изд. «Судостроение», Л., 1970.
10. Боголепов И.И. Исследование точечных звуковых мостиков двустенных конструкций. Сб. «Шумоглушение», Всесоюзный центральный научно-исследовательский институт охраны труда ВЦСПС, М., 1976.
11. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Теория, исследования, проектирование, изготовление, контроль. Изд. «Судостроение», Л., 1986.
12. Боголепов И.И. Установка для испытаний на малых образцах звукоизоляции судовых конструкций. Журнал «Технология судостроения», № 5, Л., 1964.
13. Боголепов И.И., Семенова В.Н., Кузнецов Ю.В. Устройство для измерения звукоизоляции. Авторское свидетельство № 408997. Бюллетень изобретений № 48, М., 1973.
14. Боголепов И.И., Ефимцов Б.М., В.Ф.Панин. Экспериментальное исследование звукоизолирующей способности трехслойных панелей с сотовым наполнителем. Труды Центрального аэро-гидродинамического института им. проф. Н.Е.Жуковского (ЦАГИ), Выпуск 1902, Авиационная акустика, Сборник работ. Издательский отдел ЦАГИ, М., 1978.
15. Авилова Г.М., Боголепов И.И., Лебедева И.В. Инфразвукоизоляция замкнутой оболочки. В кн. «Звукоизолирующие и звукопоглощающие конструкции в практике борьбы с шумом». ЛДНТП, Л., 1977.
16. Авилова Г.М., Боголепов И.И., Лебедева И.В. Тартаковский Б.Д. Экспериментальное исследование звукоизоляции оболочек различной формы. Акустический журнал АН СССР, М., 1982, т. XXV, вып. 5.
17. Боголепов И.И., Рыбакова Е.В. Звукоизолирующий элемент. Авторское свидетельство № 1270251. Бюллетень изобретений № 42, М., 1986.
18. Боголепов И.И. Высокоэффективная звукоизоляция XXI века. Сб. «Наука, промышленность, сельское хозяйство и культура в Санкт-Петербурге и Ленинградской области на пороге XXI века», Том 2, Петербургский Союз УИСП, СПб, 2000.
19. Боголепов И.И. Исследование звукоизоляции вакуумных конструкций. Научно-технические ведомости, 4(34)/2003, Санкт-Петербург, Издательство СПбГПУ, 2003.
20. Боголепов И.И. Строительная акустика. Санкт-Петербург, Издательство Политехнического университета, 2006.
21. www.economy.gov.ru.