

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАПОТОВ МАЛОГО ОБЪЕМА

© 2015 Л.Ф. Дроздова, В.Ю. Кирпичников, А.В. Кудяев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 20.10.2015

Дана оценка определения акустической эффективности звукоизолирующего капота малого объема. Выполнен анализ резонансных явлений в объеме воздуха и в пластинах. Проведены экспериментальные исследования влияния на эффективность капота наличия звукопоглощающего материала и вибропоглощающего покрытия на его стенках. Разработаны основные рекомендации по проектированию капотов малого объема.

Ключевые слова: акустическая эффективность, малогабаритный капот, звукопоглощающий материал, вибропоглощающее покрытие, малогабаритный источник.

Звукоизолирующие капоты относятся к наиболее эффективным средствам уменьшения шума источника в значительной степени в непосредственной близости от него. Капоты малого объема устанавливаются на малогабаритные источники (МГИ). Они могут быть переносными, съёмными или разборными, при этом иметь проёмы для ввода коммуникаций и смотровое окно.

Для капотов малого объема, исходя из физических представлений об условиях формирования полей переменных давлений в воздушной среде внутри оболочек малого объема и последующего излучения оболочкой во внешнюю среду, была определена следующая концепция их построения при условии отсутствия тепловыделения при работе МГИ и, следовательно, необходимости вентиляции внутреннего объема капота:

- малогабаритный капот (МГК) формируется как герметичная оболочка малого объема с повышенной жесткостью;

- на внутреннюю и (или) наружную поверхности оболочки наносится эффективное вибропоглощающее покрытие (ВПП) толщиной равной примерно двум толщинам пластин корпуса;

- поверх ВПП устанавливается стальной армирующий лист толщиной 0,3–0,5 мм;

- на армирующий лист в объеме капота наносится слой звукопоглощающего материала (ЗПМ) толщиной 30–40 мм с объемной плотностью 20–40 кг/м³; для защиты от механических повреждений при установке МГИ в капот звукопоглощающий материал закрывается перфорированным листом из стали толщиной около 0,3 мм с коэффициентом перфорации не менее 30%.

Такие капоты выполняются из стали, дюралюминия и других материалов. ВПП можно наносить также на наружную поверхность пластин корпуса капота. Устанавливается капот на упругих прокладках, не допускающих жесткой связи корпуса капота с изолируемым источником.

Для исследования акустической эффективности малогабаритного капота (МГК) был использован капот, представляющий собой стальной прямоугольный параллелепипед без дна с основанием 500x500 мм и высотой 300 мм, поставленный на лист резины толщиной 70 мм. Корпус капота представляет собой каркас из стальных уголков, к которому закреплены стальные пластины толщиной 2 мм, облицованные изнутри и снаружи слоями перфорированной и монолитной резины общей толщиной 4 мм с каждой стороны пластин.

В качестве источника шума был использован малогабаритный источник (МГИ) высотой 150 мм и диаметром 300 мм. При указанных выше габаритах МГИ выбранные размеры капота можно считать минимально необходимыми для удобства установки МГИ в капот и возможности размещения внутри капота средств снижения шума МГИ (рис. 1).

В основу конструктивного построения звукоизолирующего капота был положен принцип акустической изоляции источника шума от окружающей среды путем размещения его в замкнутой звукоизолирующей оболочке с воздушным зазором между источником и поверхностью оболочки.

Для оценки степени изоляции можно использовать два понятия:

- акустическая эффективность капота;
- звукоизоляция капота (его ограждений).

Акустическая эффективность капота есть разность ΔL между уровнями шума источника в контрольных точках, когда источник не имеет звукоизолирующей оболочки, и уровнями шума в тех же точках, создаваемых звукоизолированным источником.

Дроздова Людмила Филипповна, кандидат технических наук, профессор. E-mail: drozdovalf@yandex.ru
Кирпичников Валерий Юлианович доктор технических наук, профессор.
Кудяев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент.

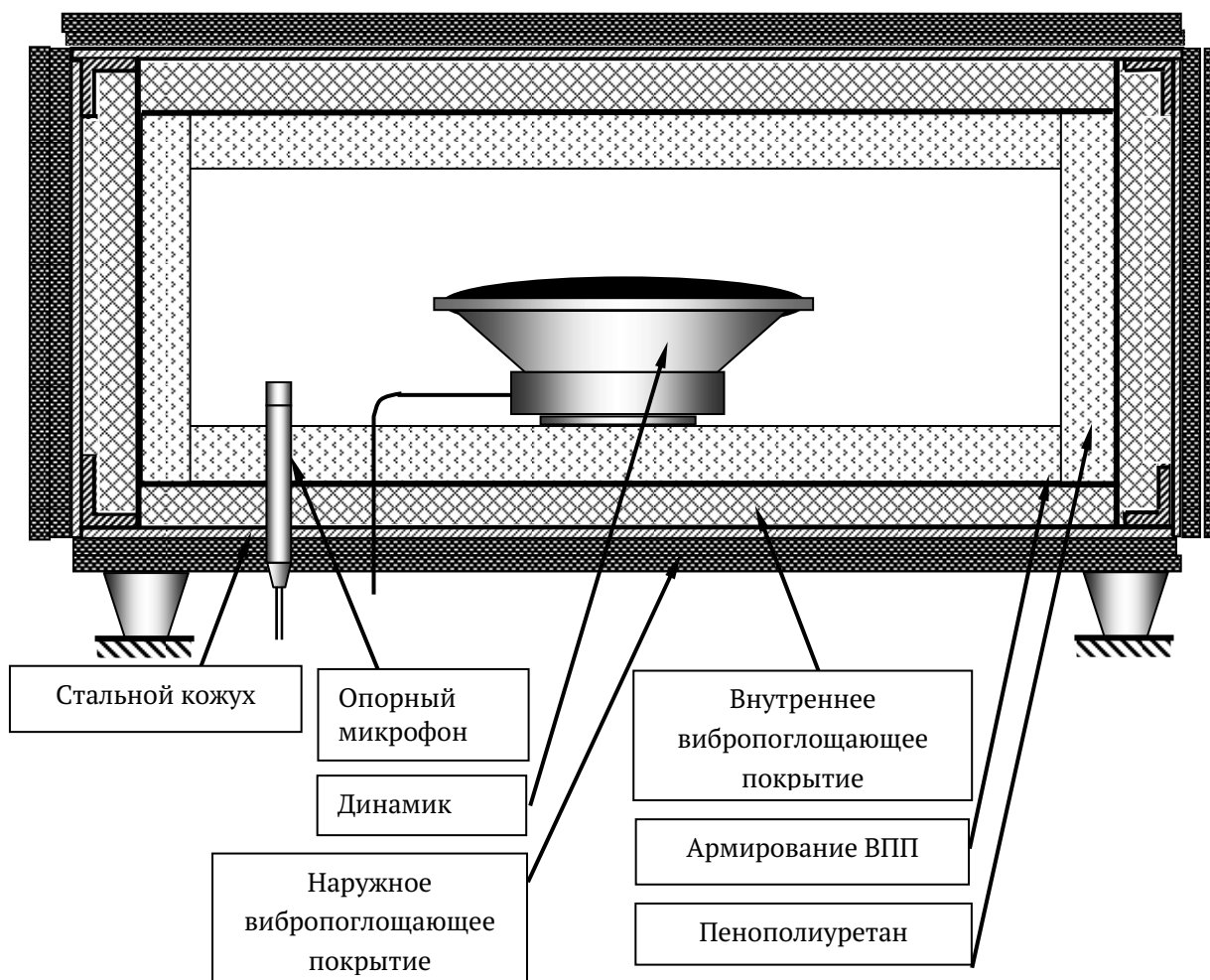


Рис. 1. Схема макета переносного малогабаритного капота

Оценка акустических качеств капота малого объема производилась с использованием звукоизоляции ограждений капота ($R_{КАП}$) с последующим расчетным определением его акустической эффективности (ΔL).

Приближенно величина ΔL может быть определена с использованием формулы [1]:

$$\Delta L \approx R_{КАП} - 10 \lg \left(\Delta + \frac{1 - \bar{\alpha}}{\alpha} \right), \quad (1)$$

где $R_{КАП}$ – звукоизоляция ограждений капота, дБ;

Δ – поправка на ближнее поле в пространстве между МГИ и стенками капота (в расчете была принята согласно [1]);

$\bar{\alpha}$ – приведенный коэффициент звукопоглощения в воздушном объеме капота [2,3].

Расчетные величины коэффициента $\bar{\alpha}$ для слоя пенополиуретана толщиной 30-40 мм с коэффициентом поглощения $\alpha'_{П}$ приведены в табл. 1

По методике, рекомендованной в [4], определяем частотную характеристику собственной звукоизоляции R_0 плоской стальной бесконечной пластины толщиной 2 мм ($f_{кр} = 6000$ Гц). Полученная характеристика приведена на Рис. 2.

Для пластины ограниченных размеров определяем низшие собственные (резонансные) частоты f_{mn} изгибных колебаний с модами $m = 1$ и $n = 1$

Таблица 1. Расчетные величины коэффициента $\bar{\alpha}$

Частота Гц	50	100	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha'_{П}$	0,06	0,15	0,30	0,50	0,75	0,80	0,83	0,85
$\bar{\alpha}$	0,04	0,10	0,19	0,32	0,48	0,51	0,53	0,54
$1 - \bar{\alpha}$	0,96	0,90	0,81	0,68	0,52	0,49	0,47	0,46
$R_{КАП}$	28	23	15	22	33	36	39	41
ΔL	7	13	9	18	30	34	37	39

$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B_{пл}}{m_{пл}} \left(\frac{m^2}{\ell_1^2} + \frac{n^2}{\ell_2^2} \right)} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B_{пл}}{m_{пл}} \left(\frac{1}{\ell_1^2} + \frac{1}{\ell_2^2} \right)}, \text{Гц} \quad (2)$$

где $B_{пл}$ – изгибная жесткость пластины, Па·м⁵,
 $m_{пл}$ – масса единицы площади пластины, кг/м²;
 ℓ_1 и ℓ_2 – размеры пластины, м.

Размеры пластин стенок и крыши испытанной конструкции МГК, с учетом расположения ребер жесткости, составляют: 0,16х0,15 м² и 0,24х0,16 м² соответственно.

Для пластин стенки капота низшая собственная (резонансная) частота f_{11} изгибных колебаний будет равна 412 Гц, а для крыши – 278 Гц.

При резонансных колебаниях этих пластин на собственных частотах f_{11} их звукоизоляция составит:

$$R_{f11} \approx R_0 + 20 \lg \eta, \text{дБ} \quad (3)$$

При нанесении на пластины капота высокоэффективного ВПП величину коэффициента потерь облицованной пластины можно принять около $\eta = 0,3$.

Тогда звукоизоляция $R_{f11} \approx R_0 - 10$, дБ

На более высоких резонансных частотах снижение звукоизоляции на порядок меньше и при увеличении частоты на октаву относительно f_{11} звукоизоляция пластин может быть принята на уровне R_0 .

Построенная таким образом обобщенная частотная характеристика величины $R_{кап}$ и рассчитанная частотная характеристика ΔL показаны на рис. 2.

Выполнение расчетных оценок эффективности звукоизолирующих оболочек весьма малых объемов теоретическими методами весьма затруднительно. По крайней мере, отработанной сколько-нибудь методики инженерного расчета подобных конструкций нет. Поэтому использо-

ванную здесь методику оценки акустической эффективности испытанного капота малого объема ($V \sim 0,075$ м³) нельзя считать полностью корректной и, как правило, в результате подобных расчетов необходимо вводить экспериментальные поправки [2].

Поэтому для приближенной оценки акустической эффективности капота малого объема при расстояниях от МГК соизмеримых с его размерами целесообразно использовать разность между уровнями шума внутри и вне капота.

Такой подход и был использован при определении акустической эффективности испытанного капота.

Возбуждение шума производилось с помощью помещенной внутри капота низкочастотной электродинамической головки громкоговорителя, создававшей существенно большие, чем фоновая помеха, уровни акустического давления как внутри, так и вне капота в диапазоне с третьоктавными полосами от 10 Гц до 6,3 кГц (рис. 1).

Измерения акустического давления проводились при помощи двух микрофонов, один из них постоянно находился внутри капота в одной и той же для всех вариантов точке (опорный микрофон), другой был закреплен на штативе, и размещался в различных точках измерения как внутри, так и вне капота.

В ходе эксперимента были проведены многоточечные измерения акустического давления на расстояниях 25 и 80 см от двух боковых сторон капота на высотах 5, 15 и 25 см от основания и на высотах 25 и 80 см над крышкой капота. Кроме того, были проведены измерения акустического давления внутри капота под крышкой и у стенок. Вибрации измерялись вибродатчиком в точках, расположенных в зоне геометрического центра стенок и крышки.

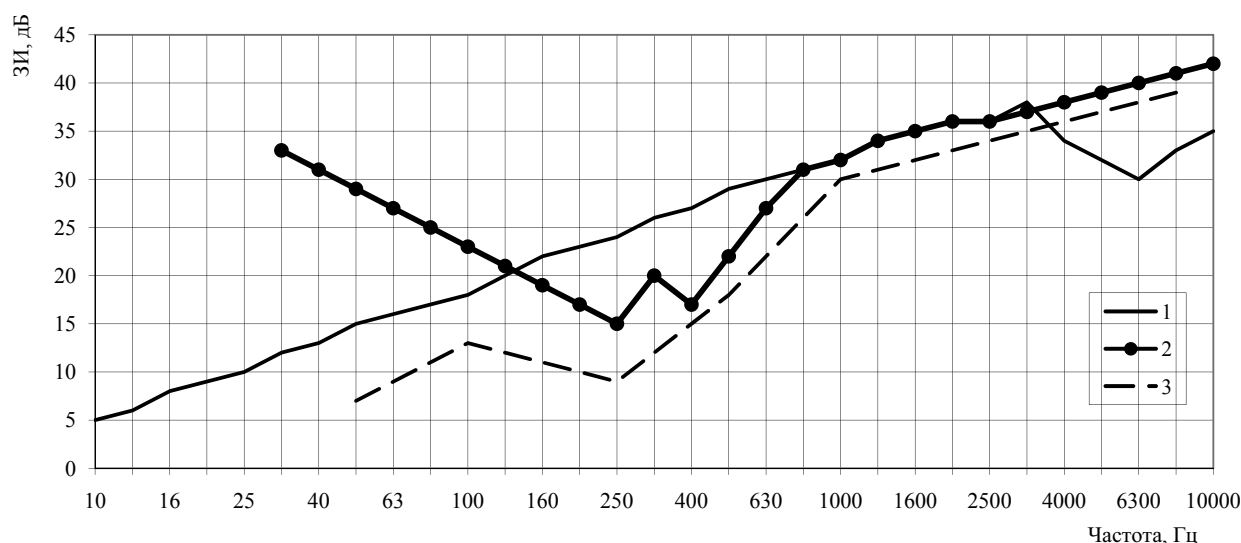


Рис. 2. Спектры эффективности:

- 1 – собственная звукоизоляция (R_0) бесконечной стальной плоской пластины толщиной 2 мм;
- 2 – обобщенная звукоизоляция МГК ($R_{кап}$ с учетом эффекта ВПП);
- 3 – расчетная акустическая эффективность МГК (ΔL)

На рис. 3 и 4 кривыми 2 представлены основные результаты проведенного эксперимента, а именно – частотные характеристики акустической эффективности капота при полной схеме комплектации средствами звуко- и вибропоглощения. Там же, для сравнения, представлены частотные характеристики акустической эффективности капота, не оборудованного этими средствами. Представленные результаты характеризуют эффективность капота малого объема, определенную как разность ΔL , дБ между

осредненными уровнями акустического давления внутри и вне капота на расстояниях r от геометрического центра источника примерно 0,5 м и 1,0 м.

Несколько меньшие значения ΔL , дБ, полученные в измерениях при $r \approx 0,5$ м по сравнению с результатами при $r \approx 1,0$ м, скорее всего, объясняются влиянием ближней неволновой зоны акустического поля капота, поскольку это расстояние сопоставимо с размерами излучателя, которым вне капота является его корпус.

Сопоставление акустической эффективности



Рис. 3. Эффективность капота на расстоянии 0,5 м:
 1 – без покрытий на боковых стенках и крышке;
 2 – при полной облицовке покрытиями по конструктивной схеме;
 3 – расчетная обобщенная звукоизоляция МГК (с учетом ВПП)

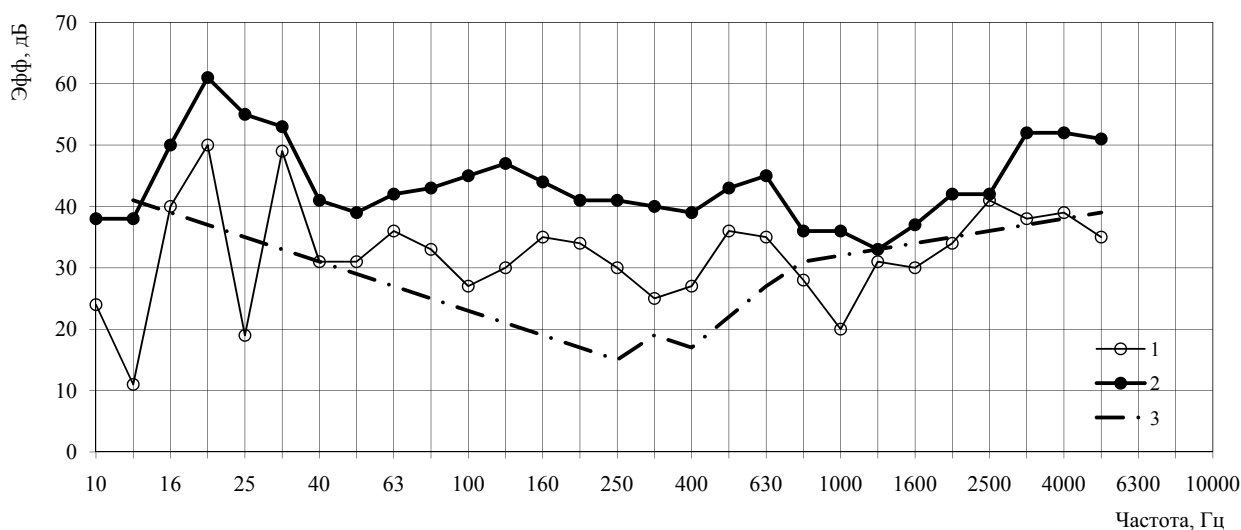


Рис. 4. Эффективность капота на расстоянии 1 м:
 1 – без покрытий на боковых стенках и крышке;
 2 – при полной облицовке покрытиями по конструктивной схеме;
 3 – расчетная обобщенная звукоизоляция МГК (с учетом ВПП)

капота по результатам измерений с расчетной характеристикой его звукоизоляции $R_{\text{кап}}$ показывает достаточно удовлетворительное совпадение для капота без шумозаглушающих покрытий на боковых стенках и крышке, кроме диапазона средних звуковых частот (от ~100 Гц до ~800 Гц). Указанное расхождение вполне объяснимо, принимая во внимание результаты исследования звукоизоляции замкнутых оболочек малых размеров [1], [4], проявлением эффектов звуко- и вибропоглощения из-за наличия листа резины под капотом.

Было установлено, что нанесение ВПП на пластины корпуса существенно повышает его акустическую эффективность в широком диапазоне частот, начиная с низших резонансных частот изгибных колебаний крышки и стенок. Эти частоты для испытанного капота оцениваются ~50 Гц (крышка) и ~100 Гц (боковые стенки), что хорошо видно при анализе кривых 1 и 2 (рис.3 и 4).

Результаты определения акустической эффективности капота с полной его комплектацией средствами уменьшения шума, согласно предложенной конструктивной схеме, показывают значительный прирост ΔL практически по всему частотному диапазону измерений.

Для получения более детальной информации о свойствах армированного вибропоглощающего покрытия (АВПП) и его влияния на акустическую эффективность капота был проведен комплекс специальных исследований.

Исследования проводились на пластинах из стали толщиной 2 мм с размерами в плане 500x500 мм при полной облицовке диссипативным слоем из перфорированной и монолитной резин (площадь облицовки составляла 100%), при частичной облицовке теми же материалами (площадь облицовки составляла 30%) и без облицовки. В качестве армирующего слоя был использован стальной лист толщиной 0,3 мм. Проведенные исследования подтвердили пре-

имущества конструкции АВПП с полной облицовкой пластины. Толщина диссипативного слоя во всех случаях была одинаковой (4 мм).

Влияние звукопоглощения в объеме капота на его акустическую эффективность, исходя из общих принципов акустики, достаточно очевидно. Как известно, звукоизоляция пластины, облицованной со стороны источника шума слоем звукопоглощающего материала (ЗПМ), возрастает за счет поглощения части падающей на нее звуковой энергии при прохождении через слой ЗПМ. За счет установки ЗПМ снижается уровень реверберационного шума в замкнутом объеме, в том числе снижаются и амплитуды резонансных колебаний объема воздуха на собственных частотах колебаний.

При проведении экспериментов с малогабаритным капотом при увеличении звукопоглощения в его объеме, было установлено, что эффект звукопоглощения за счет установки ЗПМ проявляется на достаточно высоких частотах (более 600–800 Гц). Наблюдается также снижение уровней давления в низкочастотном диапазоне до 100 Гц. Результаты проведенного эксперимента приведены на рис. 5.

Следует также отметить, что при наличии слоя ЗПМ имеет место некоторое снижение негативного влияния резонансов внутреннего объема воздуха на формирование акустического поля в объеме капота. (Низшие резонансные частоты объема воздуха равняются примерно 340 Гц и 570 Гц). Это заметно по сглаживанию частотной характеристики давлений, при установке ЗПМ.

Характерное для испытанного капота без ЗПМ снижение акустической эффективности в диапазоне с третьоктавной полосой 315 Гц можно объяснить влиянием именно этих резонансных явлений.

На более высоких частотах влияние резонансных явлений объема становится менее выражен-

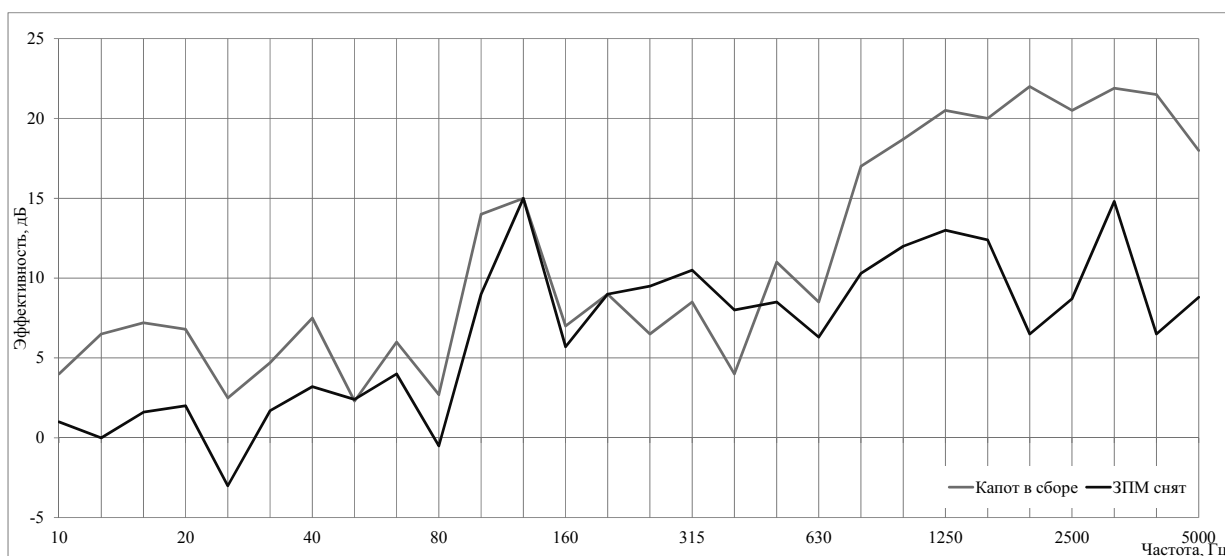


Рис. 5. Влияние установки ЗПМ на внутренних поверхностях капота на его эффективность

ным, т.к. снижается интенсивность колебаний во внутреннем объеме, за счет увеличения звукопоглощения, при одновременном росте инерционного сопротивления ограждений капота и потерь колебательной энергии в пластинах его корпуса.

Наличие собственных мод колебаний, как замкнутого воздушного объема, так и пластин корпуса капота, а, следовательно, и неизбежность возникновения и негативного влияния резонансных колебаний на акустическую эффективность капота, является объективным и неисключаемым физическим фактором.

Компенсация отрицательного воздействия этих явлений на акустическую эффективность капота может быть достигнута только путем увеличения звукопоглощения за счет установки эффективного ЗПП и нанесения эффективного ВПП на пластины корпуса капота.

В результате проведенного исследования можно достаточно уверенно говорить, что испытанная конструктивная схема капота малого объема может обеспечить весьма высокую степень акустической изоляции малогабаритного источника при его установке в капот.

На основании полученных результатов разработанное конструктивное исполнение МГК выбранных размеров может быть рекомендовано и для капотов с другими габаритами. Ориентировочно эти рекомендации можно распространить на капоты (при толщине стенок и крышки из стального листа от 2,0 до 3,0 мм) с габаритами в пределах от 400x400x200 мм³ до 700x700x500 мм³. Однако, в силу ряда специфических закономерностей, влияющих на достижение высокой акустической эффективности, подход к конструированию капота должен быть при этом весьма осторожным и требующим в каждом конкретном случае специального рассмотрения.

При использовании для изготовления капота листов из алюминиевых сплавов следует учесть, что для обеспечения изгибной жесткости стенок капота такой же, как у стальной пластины толщиной 2 мм, их толщину следует принять около 3,5 мм. Для сохранения равной звукоизолирующей способности пластины по "закону масс" ее толщина должна составить ≈5,6 мм. При этом толщина ВПП должна быть доведена до 12–15 мм. Следует также обеспечить и жесткость каркаса, соответствующую его жесткости в стальном исполнении.

В результате проведенных исследований при проектировании капотов малого объема могут быть предложены следующие рекомендации [5–8]:

1. Обеспечить достаточную жесткость пластин корпуса капота (что особенно важно при необходимости получить повышенную эффективность на низких частотах). Во избежание значительного ослабления эффективности на частотах резонансных колебаний следует избегать близости низших собственных частот изгибных колебаний пластин

корпуса и низших собственных частот колебаний воздуха в подкапотном объеме.

2. Толщину пластин корпуса капота выбирать с учетом п. 1 и требований к обеспечению необходимых величин уровня звукоизоляции. При этом следует учитывать, что увеличение толщины пластин понижает критическую частоту $f_{кр}$ (явление волнового резонанса), а снижение звукоизоляции в области частот около $f_{кр}$ может быть нежелательным, если именно в ней необходимо обеспечить повышенную эффективность капота. Для пластин из стали и алюминиевых сплавов критическая частота может быть определена: $f_{кр} = 12000/s$, Гц, где s – толщина пластины, мм.

3. Каркас капота, так же как и стенки капота, должен иметь повышенную жесткость во избежание появления его колебаний как пространственной конструкции.

4. Обеспечить наличие на стенках капота высокоэффективного в широком диапазоне частот вибропоглощающего покрытия, тип и места нахождения которого выбираются с учетом диапазона эксплуатационных температур.

5. Обеспечить наличие на внутренней поверхности стенок капота звукопоглощающего покрытия из материала с высоким коэффициентом звукопоглощения и плотностью около 20–40 кг/м³. Толщина покрытия определяется исходя из требований к необходимой эффективности капота в заданном частотном диапазоне.

6. Обеспечить полную герметичность МГК; при необходимости иметь в корпусе капота постоянно открытые проемы их звукоизоляция должна быть обеспечена на уровне звукоизоляции корпуса за счет применения специальных шумозаглушающих узлов.

7. Все смотровые окна, лючки и т.п. должны иметь адекватную звукоизолирующую способность и герметизирующее уплотнение по периметру с прижимом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Л., Судостроение, 1986.
2. Техническая акустика транспортных машин. Справочник [под ред. проф. Н.И. Иванова]. СПб, Политехника, 1992. – 368 с.
3. Drozdova L., Kirpichnikov V., Savenko V. Near-field noise control by means of a compact enclosure // Proceedings of the Eleventh International Congress on Sound and Vibration, 5–8 July 2004, St. Petersburg, Russia
4. Борисов Л.П., Гужас Д.Р. Звукоизоляция в машиностроении. М., Машиностроение, 1990.
5. Справочник проектировщика. Защита от шума [под ред. проф. Е.Я. Юдина]. М., Стройиздат, 1974. 134 с.
6. СП 51.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003) Свод правил. Защита от шума. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. Госстрой России, М., 2011.

7. Дроздова Л.Ф. Кудяев А.В. Особенности проектирования звукоизолирующих капотов // Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия». 17-19 марта 2009г., Санкт-Петербург, 2009.
8. Кирпичников В.Ю., Грушецкий И.В., Дроздова Л.Ф. Структурный шум передвижной компрессорной станции // II Всероссийская научно-практическая конференция «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности», СПб, 1997.

STUDY OF ACOUSTICAL EFFECTIVENESS OF THE ENCLOSURES SMALL VOLUME

© 2015 L. Ph . Drozdova, V. Yu. Kirpichnikov, A.V. Kudaev

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

The assessment to determine the acoustic effectiveness of the sound proofed enclosure a small volume was gave. The analysis of resonance phenomena in the air volume and in the plates was made. Experimental study of the effect of sound absorbing material and vibration-absorbing coatings on the enclosure efficiency was presented. Basic recommendations for the design of small volume enclosures was developed.

Keywords: acoustical effectiveness, sound-insulated enclosure, sound-absorbing material, vibration-damping coating, compact source, small volume.

Luydmila Ph Drozdova (Ph.D(Tecn.). Professor.

E-mail: drozdovalf@yandex.ru

Valery Yu. Kirpichnikov (Dr.Sci.(Tecn.), Professor

Aleksandr V.Kudaev (Ph.D(Tecn.), Assosiate Professor