

УДК 534.83+629.78

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ВНУТРИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ПРИ ЕГО ЗАПУСКЕ В СОСТАВЕ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ТИПА «СОЮЗ»

© 2013 П. А. Попов, А. А. Синдюков, А. Н. Крючков

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье описан метод нахождения резонансных акустических мод, учитывающий влияние геометрии космического аппарата (КА) и головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя (РН) «Союз». Приведён пример нахождения резонансных акустических мод под ГО. Описан метод определения влияния плотности компоновки КА под ГО на акустическое нагружение. Проведён анализ звукоизоляционных характеристик отсека ГО с учётом влияния вырезов элементов звукоизоляции. Даны рекомендации по снижению акустических нагрузок на верхнюю поверхность КА.

Головной обтекатель, космический аппарат, акустическое давление, звукоизоляция, акустические моды, волновое уравнение, стоячая волна, удельный коэффициент потерь, коэффициент поглощения, коэффициент отражения.

Введение

При адаптации КА с РН типа «Союз» решаются вопросы, связанные с особенностью акустического нагружения данного КА. Акустическое поле, создаваемое струями двигательной установки, структурным шумом и турбулентным аэродинамическим потоком, является источником вибрации конструкции КА и его бортовой аппаратуры. Характеристики акустического поля внутри замкнутого цилиндрического отсека ГО неразрывно связаны с определением акустических мод, обусловленных его геометрией и геометрией КА, а также особенностями звукоизоляционных характеристик ГО.

Как показано на рис. 1, 2, конструкции КА очень близко примыкают к обечайке ГО РН. Анализ зазоров показал, что рёбра панелей не помещаются в зону полезной нагрузки. Это обстоятельство вынудило разработчиков ГО произвести вырезы элементов звукоизоляционного покрытия, выполненного из пенополиуретана (ППУ-35). Кроме того, столь близкое расположение панелей КА в поперечном направлении и небольшие продольные размеры дают основание сделать предположение о более высокой плотности аку-

стической энергии в поперечном сечении «ГО-КА», появлении высокочастотных составляющих между панелью ГО и КА, а также низкочастотных радиальных и продольных мод над КА.

Таким образом, необходимо решить несколько задач:

- определение уровня акустического давления в зависимости от занимаемого КА площади поперечного сечения ГО,
- определение уровня акустического давления в зависимости от предлагаемых вырезов элементов звукоизоляционного материала ГО,
- модальный анализ акустических полей.

Для решения первой задачи был использован метод статистического энергетического суммирования звуковых волн со случайными фазами прямого звука и всех его отражений. При этом предполагалось, что акустические волны проходят через всю поверхность ГО, падая и отражаясь от КА, равномерно.

Вторая задача решена путём нахождения отношения энергии падающих волн и суммы энергий волн, прошедших через каждую неоднородность поверхности ГО для первоначальной его поверхности (без вырезов) и поверхности с вырезами эле-

ментов звукоизоляции ГО. При этом при расчёте были использованы удельные коэффициенты потерь, полученные в [1].

В третьей задаче на основе волновой теории получено решение волнового уравнения Гельмгольца с условиями на границе ГО и КА.

1. Исходные данные

Для решения поставленных задач были использованы следующие данные:

- Площадь створок панелей ГО – S , суммарная масса створок необлицованных панелей – M .

- Объёмная плотность звукоизоляционного материала – r , его толщина – h на створках ГО.

- Конструктивно-компоновочная схема (ККС) переходного отсека (П×О), ГО, разгонного блока (РБ) и КА (рис.1).

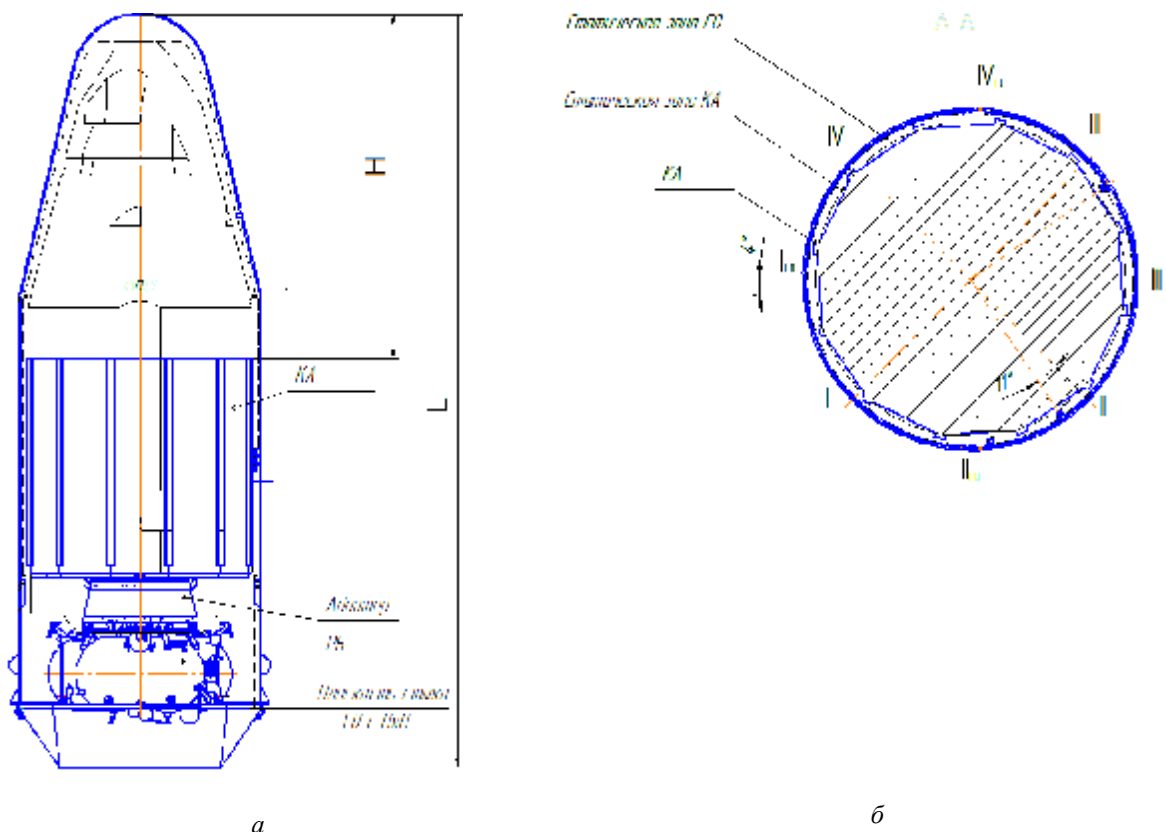


Рис. 1. а – ККС П×О, ГО, РБ и КА; б – поперечное сечение ГО и КА

Панели КА довольно плотно прилегают к конструкции ГО, при этом заполнение в поперечном сечении – 80% (рис. 2).

Как показано на рис.1а, над КА имеется свободное пространство, при этом расстояние от верхней панели КА до вершины конической поверхности ГО – H , диаметр ГО – D .

Как показано на рис. 2, произведено 12 вырезов (1) прямоугольной формы (по 6 вырезов на одной створке). Размеры вырезов составляют 10% от площади цилиндрической части ГО, а их глубина – 20 мм, при этом ППУ-35 в данных местах убрано полностью.

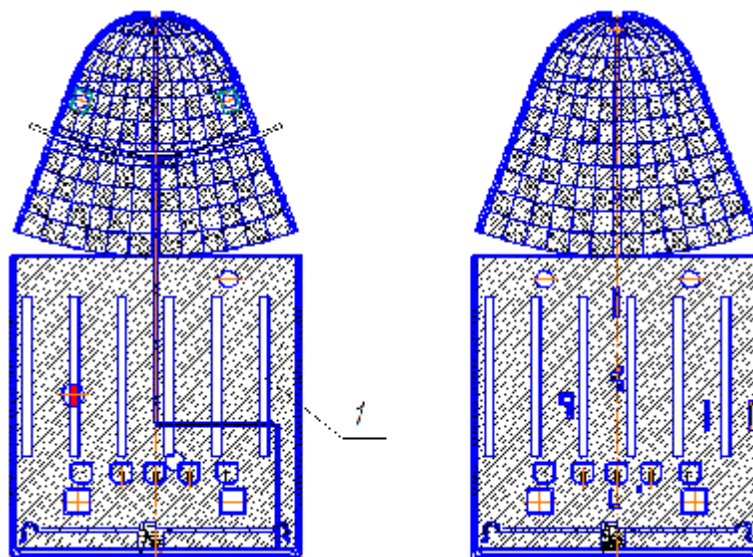


Рис. 2. Схема вырезов элементов звукоизоляции ППУ-35 на створках ГО

2. Описание расчётных моделей

2.1. Расчётная модель прогнозирования изменения уровня акустического давления в зависимости от наполненности ГО

Для прогнозирования изменения уровня акустического давления в зависимости от наполненности объёма под ГО использовался энергетический подход. Суть применения энергетического подхода при оценке шума под ГО состоит в том, что уровень звукового давления определяется из уравнения баланса энергии – суммирования энергий падающих и многократно отражённых волн для различных случаев наполненности пространства под ГО и равенства с произведением коэффициента звукоизоляции на сумму энергий падающих и отражённых волн от внешней конструкцией ГО:

$$k(f) \cdot (W_{nad} + W_{omp}) = (w_{nad}(r) + \sum_{i=1}^m a_{cp}^i w_{omp}(r) + T), \quad (1)$$

где $k(f)$ – коэффициент звукоизоляции, зависящий от частоты f , W_{nad} – энергия волн, падающих на внешнюю поверхность ГО, W_{omp} – энергия волн, отражённых от внешней поверхности ГО, $w_{nad}(r)$ – энергия волн, прошедших внутрь ГО, $w_{omp}(r)$

– энергия волн, отражённых от ГО или КА, m – количество отражений, a_{cp} – средний по ГО и КА коэффициент отражения:

$$a_{cp} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n b_k S_k}{\sum_{k=1}^n S_k},$$

b_k – коэффициент поглощения поверхности площадью S_k , r – расстояние от обечайки ГО до расчётной точки (КА), T – вся энергия, кроме акустической (тепловая, деформации), в которую перешла акустическая энергия в результате взаимодействия частиц среды воздуха, поглотителя, жёсткой конструкции.

Рассмотрим пространство под ГО, занимаемое КА (рис. 1а, 1б). Акустическое давление, прошедшее через обечайку ГО, падает на конструкцию КА под различными углами. Падение уровня акустической энергии в пространстве происходит по нескольким причинам:

Диссипация энергии. При прохождении акустического давления через обечайку изначальная энергия волны в соответствии с законом её сохранения должна остаться той же при её сферическом расширении (удалении точек среды от изначального их положения). Другими слова-

ми, энергия волны в точке около ГО и суммарная энергия на полусфере при расширении акустического поля должны быть одинаковыми (не рассматриваются потери в среде, о которых будет сказано ниже). Поэтому энергия в точке на полусфере будет меньше, чем энергия на обечайке ГО в $\frac{1}{Ar^2}$ раз, где A – телесный угол направления распространения акустического поля. Таким образом, можно сделать вывод, что диссипация приводит к падению акустической энергии в соответствии с законом: $w \sim \frac{1}{Ar^2}$.

Потери в пространстве под ГО и при многократном отражении от стенок ГО и поверхностью КА. Данное снижение акустической энергии обусловлено переходом её в другие виды энергии, в том числе в тепловую энергию, выделяемую при трении элементарных частиц среды друг о

друга, и в колебательную энергию конструкции ГО и КА. При падении акустической энергии на панели ГО и КА часть энергии поглощается конструкцией, а часть её отражается. При этом интенсивность падающей $I_{пад}$ и поглощенной $I_{погл}$ волн связаны соотношением $\frac{I_{погл}}{I_{пад}} = a_{погл}(f)$, где $a_{погл}(f)$ – коэффициент поглощения. При повторном отражении волны коэффициент отражения $(1 - a_{погл}(f))$ возводится в соответствующую степень, а энергии складываются в соответствии с (1). Коэффициенты поглощения для поверхности ГО, облицованного материалом ППУ-35, получены в [1] и представлены в табл. 1. Коэффициент поглощения для поверхности полезного груза принят равным 0,1 для всех рассматриваемых диапазонов частот в соответствии с [2].

Таблица 1. Коэффициент поглощения для поверхности ГО

Акустический коэффициент поглощения [2]	Октавный диапазон частот с центральной частотой, $f_{ц}$						
	31,5	63	125	250	500	1000	2000
$a(f)$	0,12	0,12	0,12	0,09	0,12	0,38	0,9

Данные обстоятельства учтены в математической модели. После преобразований выражения (1) можно получить величину, связывающую уровень звуковой мощности с уровнем шума в расчётной точке в зависимости от расположения её от источника звука (в рассматриваемом случае – это обечайка ГО и боковая поверхность КА) [1]:

$$L = 10 \lg\left(\frac{N}{N_0}\right) + 10 \lg\left(\frac{\Phi}{S} + \frac{4y}{Q}\right), \quad (2)$$

где N – акустическая мощность источника, N_0 – пороговая акустическая мощность, Φ – коэффициент направленности излучения (принимается единичным), $S = Ar^2$, A – телесный угол (принимается равным $2p$, соответствовал источнику на обечайке), y – коэффициент, который учитывает отклонение реального поля от

диффузного, r – расстояние до расчётной точки (до боковой поверхности КА), Q – постоянная помещения, учитывающая поглощение всех поверхностей и их площадей.

Известно, каково акустическое поле для заполнения ГО на 70%. Необходимо было найти: насколько оно изменится при заполнении на 80%. Поэтому выражение (2) использовалось в следующей форме для двух различных случаев:

$$\Delta L(f) = L_{80\%} - L_{70\%} = 10 \lg\left(\frac{\frac{\Phi}{S_{80\%}} + \frac{4y}{Q_{80\%}}}{\frac{\Phi}{S_{70\%}} + \frac{4y}{Q_{70\%}}}\right).$$

Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты изменения октавных уровней акустического нагружения КА (наполнение – 80%) при его адаптации с ГО по сравнению с акустическим нагружением КА (наполнение – 70%).

Изменение акустического нагружения в октавных полосах,	Октавный диапазон частот с центральной частотой, $f_{ц}$						
	31,5	63	125	250	500	1000	2000
$\Delta(f) = L_{80\%} - L_{70\%}$, дБ	2,5	2,3	1,9	1,8	1,5	0,3	0,2

Таблица 3. Общее увеличение акустического давления под ГО

f, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	Σ
Δ_0 , дБ	0,13	0,13	0,13	0,52	0,86	0,13	0,13	0,4(4,7%)

2.2. Расчётная модель оценки изменения акустического нагружения под ГО за счёт вырезов элементов звукоизоляции ППУ-35

Метод оценки изменения акустического нагружения под ГО за счёт вырезов элементов звукоизоляции представлен в работе [3].

Основные участки вырезов показаны на рис. 2. По результатам проведённой оценки суммарное среднеквадратическое акустическое давление на КА увеличилось на 4,7 % (0,4 дБ). Общее увеличение акустического давления Δ_0 под ГО на центральных частотах октавных диапазонов частот представлено в табл. 3.

Кроме того, для учёта увеличения акустического нагружения в локальных зонах (зонах «вырезов») была проведена оценка ухудшения звукоизоляционной способности непосредственно в локальных местах ГО. Для этого была использована математическая модель «резонансной звукоизоляции», описанная в [4], и эксперименты [1] на панелях с нанесён-

ными звукопоглощающими материалами типа ППУ.

При уменьшении толщины звукопоглотителя снижение звукоизоляции может происходить по нескольким причинам:

а) снижение поверхностной массы ведёт к снижению «нерезонансной» звукоизоляции;

б) снижение толщины поглотителя ведёт к уменьшению звукоизоляции за счёт снижения демпфирования структурного шума, которое можно оценить при помощи модели «резонансной звукоизоляции» с использованием коэффициентов потерь.

По проведённым расчётам непосредственно в местах «вырезов» в звукоизоляционном покрытии глубиной 20 мм (звукоизоляционное покрытие полностью убрано) акустическое нагружение возрастёт на 2,3 дБ, что приведёт к локальному увеличению вибрационного нагружения на 30%. Увеличение акустического давления $\Delta_{20\text{ мм}}$ в октавном спектре частот непосредственно у вырезов глубиной 20 мм показано в табл. 4.

Таблица 4. Увеличение акустического давления в октавном спектре частот непосредственно у вырезов

f, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000
$\Delta_{20\text{ мм}}$, дБ	1,2	1,2	1,2	2,6	4	1,2	1,2

2.3. Нахождение акустических мод и резонансов

Когда граничные поверхности располагаются напротив друг друга, звуковая волна отражается от одной из них в направлении другой, затем снова в обрат-

ном направлении, и так много раз до тех пор, пока не рассеется её энергия. И если расстояние между граничными поверхностями – от источника звука к первой поверхности, затем ко второй и обратно к источнику – является кратным длине вол-

ны, то возвращающаяся волна будет такой же по фазе, что и исходящая волна. В результате их взаимодействия энергия звуковой волны на этой частоте будет усиливаться. Это явление называется *резонансом*. Резонансы могут возникать также вследствие отражения от множества поверхностей ГО и КА. Существует несколько основных типов резонансных мод в цилиндрическом отсеке, каковым является ГО:

- Осевые (продольные) моды возникают между двумя поверхностями и распространяются параллельно образующим цилиндра ГО (например, поверхность конической части ГО и верхняя поверхность КА).

- Радиальные моды возникают в радиальных направлениях свободной поверхности ГО, многократно отражаются каждый раз от радиально противоположной стороны (в соответствии с уравнением Бесселя).

- Тангенциальные (касательные) моды «ходят» по кругу, касаясь поверхности ГО, и остаются параллельными поверхности основания ГО.

- Косые (наклонные) моды возникают между всеми поверхностями ГО и КА и не распространяются параллельно ни одной из них. Их движения более сложны, а вклад модальной энергии значительно ниже упомянутых выше видов мод.

На рис. 1а изображен ГО и располагающийся в нём КА. Как видно, главной особенностью является плотная компоновка КА под ГО до высоты $L-H$, при этом расстояние от панели КА до поверхности ГО по нормали составляет Δ .

Построим математическую модель, описывающую поведение акустических мод и распределение собственных (акустических) частот в пространстве под ГО.

Пусть имеется цилиндрический ГО радиусом R , высотой цилиндрической части h_0 , ограниченный на основаниях плоскостью $z=0$ (верхняя часть КА) и конической поверхностью с углом J между образующей конуса и его основанием. Радиальные, продольные и окружные моды

акустического давления \bar{P} в цилиндрическом отсеке описываются волновым уравнением в цилиндрической системе координат (r, j, z) :

$$\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{P}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial j^2} + \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial t^2} = 0.$$

В данном соотношении, используя подстановку $\bar{P}(r, j, z, t) = P(r, j, z) e^{i\omega t}$, получим уравнение Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial j^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + I^2 P = 0, \quad (3)$$

где $I = \frac{\omega}{c}$ – волновое число.

Введём граничные условия для функции P . Выделим слой газа, прилегающий к границам КА и ГО. Выделенный слой при распространении у границы перемещаться не будет, сила реакции со стороны жёстко закреплённой перегородки в любой момент времени равна силе давления, оказываемой на выделенный слой со стороны всего остального газа. Пусть $\dot{u}(r, t)$ – функция перемещения газа под ГО вдоль радиального направления, тогда на граничных поверхностях должны быть наложены условия:

$$\dot{u}(R, t) = 0.$$

Так как выделенный слой не перемещается, то скорости частиц газа $\dot{v}(R, t)$ в выделенном приграничном слое будут равны нулю:

$$\dot{v}(R, t) = 0.$$

В соответствии с уравнением Эйлера движения газа:

$$r_0 \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = - \frac{\partial P}{\partial r},$$

где r_0 – плотность среды, получим:

$$\frac{\partial P}{\partial r}(R, t) = 0.$$

Аналогичное условие можно получить, рассматривая продольные направления распространения акустических волн. Поэтому граничные условия для (3) выбираются следующим образом:

- на краях цилиндра, конуса и на верхней поверхности КА производные по направлениям r и z от амплитуды акустических волн равны нулю,

- окружные моды внутри отсека повторяются с периодичностью $2p$,

- на центральной линии отсека решение не является бесконечным,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial r}(r=R, j, z) &= 0, \\ \frac{\partial P}{\partial z}(r, j, z=h(r)) &= 0, \\ \frac{\partial P}{\partial z}(r, j, z=0) &= 0, \\ P(r, j, z) &= P(r, j+2p, z), \\ P(r=0, j, z) &< \infty, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $h(r) = h_0 + (R-r) \cdot \text{tg}(J)$ – граница конической поверхности.

Задача решается методом разделения переменных:

$$P(r, j, z, t) = R(r)\Phi(j)Z(z)T(t). \quad (5)$$

Подставим (5) в (3) и поделим получившееся на (5):

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \Phi(j)}{dj^2} + \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} + I^2 = 0. \quad (6)$$

Условие (6) выполняется, когда:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \hat{O}(j)}{\hat{O}(j)} &= -m^2, \\ \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} &= -h^2, \\ I^2 &= m^2 + h^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Первое из уравнений (7) умножим на r^2 и после преобразования получим:

$$\frac{r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + r \frac{dR(r)}{dr}}{R(r)} + m^2 r^2 + \frac{d^2 \Phi(j)}{\Phi(j)} = 0. \quad (8)$$

Условие (8) выполняется, когда каждая часть равна константам, одинаковым по модулю, но имеющим разные знаки:

$$\left. \begin{aligned} \frac{r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + r \frac{dR(r)}{dr}}{R(r)} + m^2 r^2 &= a^2, \\ \frac{d^2 \hat{O}(j)}{dj^2} &= -a^2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Второе из уравнений (9) описывает окружные моды внутри отсека. Рассмотрим следующую задачу нахождения собственных чисел α_i (задача Штурма – Лиувилля):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \hat{O}(j)}{dj^2} + a^2 \hat{O}(j) &= 0, \\ \hat{O}(j) &= \hat{O}(j+2p). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из (10) окружные моды примут вид:

$$\hat{O}_i(j) = A_i \cos(a_i j) + B_i \sin(a_i j), \quad (11)$$

$a_i = i \in Z$.

Первое из выражений (9) является уравнением Бесселя. Из (11) можно сделать вывод, что его порядок – целое число.

Радиальные моды представляют собой сумму двух линейно независимых функций Бесселя $I_i(mr)$ и Неймана $Y_i(mr)$:

$$R_i(r) = C_i I_i(mr) + D_i Y_i(mr).$$

Известно, что функции Неймана сингулярны в нуле. Поэтому в соответствии с последним из условий (4) можно сделать вывод, что радиальные моды будут представлены лишь функциями Бесселя:

$$R_i(r) = C_i I_i(m_i^k r), \quad (12)$$

где k – номер корня функции Бесселя порядка i .

Были рассмотрены радиальные и круговые моды реверберационных акустических полей. Для дальнейшего анализа рассмотрим продольные моды и найдём акустические резонансы. Для этого воспользуемся вторым уравнением из (7) с граничными условиями вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial z}(z = h_0 + (R - r) \cdot \operatorname{tg}(J)) &= 0, \\ \frac{\partial Z}{\partial z}(z = 0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Условия (13) дают:

$$-F_j h_j \sin(h_j (h_0 + (R - r) \cdot \operatorname{tg}(J))) = 0,$$

и поэтому:

$$\sin(h_j (h_0 + (R - r) \cdot \operatorname{tg}(J))) = 0. \quad (14)$$

Имеется набор собственных чисел, полученных из (14):

$$h_j = \frac{p_j}{h_0 + (R - r) \cdot \operatorname{tg}(J)}. \quad (15)$$

Продольные моды, согласно (15), имеют вид:

$$Z_j(z) = F_j \cos\left(\frac{p_j}{h_0 + (R - r) \cdot \operatorname{tg}(J)} z\right).$$

Вдоль центральной линии ($r=0$) между конусом и верхней частью панели КА имеются продольные акустические моды вида:

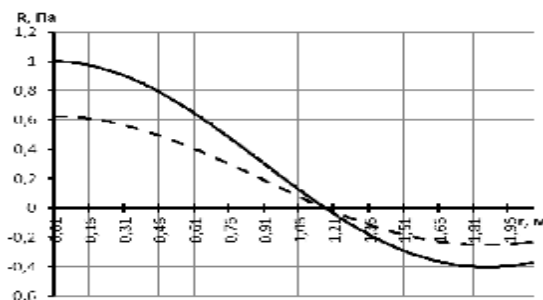
$$Z_j(z) = F_j \cos\left(\frac{p_j}{h_0 + R \cdot \operatorname{tg}(J)} z\right).$$

Особенностью расположения КА под ГО является имеющееся свободное пространство над КА, которое составляет

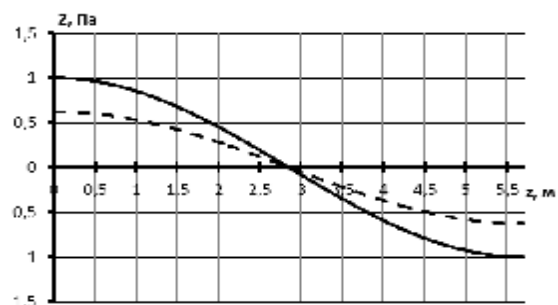
$h_0 + R \cdot \operatorname{tg}(J)$ в длину (от вершины конуса ГО до поверхности КА) и $2R$ в поперечном направлении. Данное обстоятельство приведёт к возникновению радиальных акустических мод, начиная с 62 Гц, и продольных, начиная с 30 Гц.

При возникновении резонанса амплитуда падающей волны возрастает при первом отражении и наложении резонансной акустической моды в $(1 + \sqrt{a_{\text{отр}}})$ раз, где $a_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения по энергии. Для снижения акустического давления на указанных выше частотах было предложено в свободном пространстве под ГО произвести монтаж в радиальном и продольном направлениях матов ППУ толщиной 40-50 мм. Это, во-первых, будет являться естественным препятствием на пути распространения радиальных и продольных мод и, во-вторых, снизит уровни акустического давления в октавных полосах с центральными частотами 31,5 и 63 Гц на 4 дБ (в соответствии с формулой: $\Delta R = 8,7bh$, где ΔR , дБ – улучшение акустической способности; b , m^{-1} – коэффициент затухания материала ППУ, определенный в [5]; h , m – толщина поглотителя).

Если принять максимально возможную амплитуду единичной (Па): график (—) на рис. 4, то при использовании мероприятий по снижению акустического нагружения амплитуда акустического давления уменьшится на 4 дБ (58%): график (----) на рис. 4.



а



б

Рис. 3. Акустические моды: а – радиальная мода, представляющая собой функцию Бесселя нулевого порядка $R=C_1R(r)$, соответствующая резонансной частоте 62 Гц; б – продольная мода, $Z=F_1Z(z)$, соответствующая резонансной частоте 30 Гц

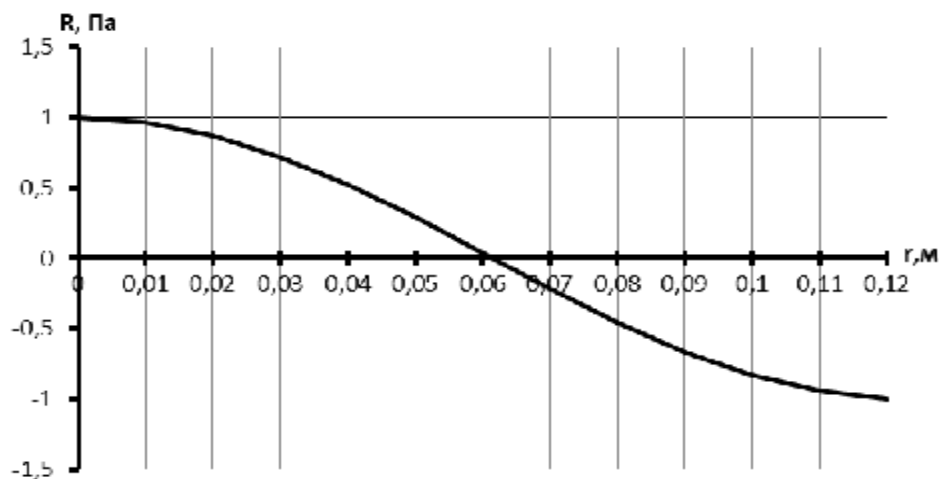


Рис. 4. Радиальная мода $R=C_1R(r)$ между поверхностью КА и обечайкой ГО

Аналогично проведён анализ определения акустических резонансных мод между каркасом ГО и боковой поверхностью КА. Указанные разработчиком КА габариты приводят к довольно плотной компоновке и к возникновению первого акустического резонанса на частоте 1382 Гц. На рис. 5 представлена соответствующая данной частоте радиальная мода.

Эта частота не является критической, так как максимальные уровни акустического нагружения в спектре зависят от вида источника нагружения (параметров двигателя, аэродинамики конструкции) и, как правило, попадают в октавные полосы с центральными частотами 250 и 500 Гц, а остальные резонансные частоты предположительно будут кратны первой резонансной частоте. Вместе с тем уменьшение объёма свободного пространства увеличивает плотность акустической энергии в нём. Это приводит к росту акустического нагружения. Однако поскольку плотность мод существенно мала (первый резонанс – 1382 Гц, второй – 2764 Гц и т.д.), то это ведёт к уменьшению акустической энергии под ГО. В зависимости от того, какое из этих двух явлений будет преобладающим, заполнение свободного пространства под обтекателем может привести как к увеличению, так и к уменьшению фактических уровней аку-

стического давления в рассматриваемой части ГО и КА [6].

При оценке акустического нагружения боковых панелей КА рассматривался наихудший вариант преобладания фактора *высокой плотности акустической энергии* (табл. 2).

Заключение

Проведены расчёты по определению уровня акустического давления в зависимости от занимаемого КА площади поперечного сечения ГО и предлагаемых вырезов элементов звукоизоляционного материала ГО.

Использовались три различные методики исследований:

- энергетический метод оценки влияния свободного пространства под ГО (наполненность 80%) на акустическое нагружение КА под ГО;
- энергетический метод влияния вырезов на акустическое давление под ГО;
- модальный анализ для нахождения резонансных частот пространства под ГО.

Получены спектральные уровни изменения акустического нагружения. Увеличение наполненности под ГО с 70% до 80% приводит к увеличению суммарного среднеквадратического уровня акустического давления на 19%.

Библиографический список

1. Определение виброакустических характеристик фрагментов конструкции ГО РН «Союз» [Текст] / НТО, инв. №5527, ЦАГИ, 1999. – 43 с.

2. Расчётное определение звукоизоляции и спектров акустического давления под ГО при старте и полёте РН «Союз-2» [Текст]/ НТО, инв. №4/11-03, РУСАВИА, 2003. – 51 с.

3. Попов, П.А. Оценка изменения звукоизоляционной способности головного обтекателя ракеты носителя при наличии разных по толщине слоёв звукопоглощающих материалов [Текст]/ П.А. По-

пов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – 2012. – Вып. №4. – С.103-110.

4. Боголепов, И.И. Промышленная звукоизоляция [Текст]/ И.И. Боголепов – Л.: Судостроение, 1986. – 368 с.

5. Экспериментальное определение звукоизоляции межбакового отсека блока III ступени РН «Союз» [Текст]/ НТО, инв.№5535, ЦАГИ, 1999. – 38 с

6. Расчётно-экспериментальное определение акустических нагрузок для металлического ГО [Текст]/ НТО, инв.№5548, ЦАГИ, 1999. – 71 с.

**PECULIARITIES OF ACOUSTIC LOADING OF THE SPACE VEHICLE
IN THE NOSE FAIRING LAUNCHED AS PART OF A «SOYUZ»-TYPE ROCKET**

© 2013 P. A. Popov, A. A. Sindyukov, A. N. Kryuchkov

Samara State Space University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The paper describes a method for finding resonant acoustic modes taking into account the influence of the spacecraft geometry and that of the nose fairing of the "Soyuz" rocket. An example of determining the resonant acoustic modes under the nose fairing is given. A method of determining the effects of spacecraft component density under the payload fairing on the acoustic loading is described. The analysis of acoustical characteristics of the nose fairing compartment is carried out taking into account the influence of cutouts of sound insulation elements. Recommendations on the reduction of acoustic loads on the upper surface of the spacecraft are given.

Payload fairing, spacecraft, acoustic pressure, sound insulation, acoustic mode, wave equation, standing wave, specific loss factor, absorption factor, reflection factor.

Информация об авторах

Попов Павел Александрович, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: banduir@rambler.ru. Область научных интересов: звукоизоляция и акустические нагрузки.

Синдюков Артём Арсентьевич, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sindyukovart@mail.ru. Область научных интересов: звукоизоляция и акустические нагрузки.

Крючков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kan@ssau.ru. Область научных интересов: виброакустика и динамика машин.

Popov Pavel Aleksandrovich, post-graduate student, the department of automatic systems of power installations, Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolyov (National Research University). E-mail: banduir@rambler.ru. Area of research: sound insulation and acoustic loadings.

Sindyukov Artem Arsenyevich, post-graduate student, the department of automatic systems of power installations, Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolyov (National Research University). E-mail: sindyukovart@mail.ru. Area of research: sound insulation and acoustic loadings.

Kryuchkov Alexander Nikolaevich, doctor of technical science, professor, professor of the department of automatic systems of power installations, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kan@ssau.ru. Area of research: vibroacoustics and dynamics of machines.