

УДК 534.83+629.78

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ РАЗЛИЧНЫХ ПО ТОЛЩИНЕ СЛОЁВ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 П. А. Попов

ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС», г. Самара

В статье описывается метод, позволяющий проводить оценку изменения звукоизоляционной способности панелей головного обтекателя (ГО), учитывая все неоднородности его конструкции, и приведены результаты расчёта влияния снятия части звукоизоляционного материала с поверхности штатного ГО ракеты-носителя (РН) на акустическое давление под ГО.

Акустическое давление, звукоизоляция, головной обтекатель, коэффициент потерь, дифракция, "малая" и "большая" неоднородности, "параллельный" и "последовательный" методы.

Акустическое давление, создаваемое струями двигательной установки, структурным шумом, а также турбулентным аэродинамическим потоком, является источником вибрации при старте и полёте ракеты-носителя. Для обеспечения виброакустической среды под головным блоком на уровне, соответствующем проектному, необходимо подобрать "вырезы" таким образом, чтобы акустическое давление по всей поверхности космического аппарата (КА) увеличилось не более, чем на 10% на всех частотах спектра. При этом аппаратуру КА, находящуюся непосредственно у "вырезов", нужно проверить на более высокие уровни вибрации, соответствующие увеличенным уровням акустического нагружения.

Изначально штатные панели ГО представляли собой конструкцию, состоящую из углестостеклопласта (УССП) и пенополиуретана (ППУ-35) разной толщины (рис.1):

1 - поверхность ГО заполнена двадцатимиллиметровым слоем ППУ-35, что составляет 86,5% от общей площади ГО;

2 - гаргроты ГО заполнены 140 мм слоем ППУ-35, что составляет 13,5% от общей площади ГО.

Проведённые "вырезы" изменили первоначальные толщины покрытия ППУ-35 (рис. 2):

1 - толщиной 20 мм - 80,9 %;

2 - гаргротов толщиной 140 мм - 12,8%;

3 - поверхности с переменной толщиной ППУ-35 10 ÷ 70 мм - 0,1%;

4 - десятимиллиметрового покрытия составила 5,6% от общей площади створок ГО;

5 - шестидесятимиллиметрового покрытия (в гаргротах) - 0,6%.

Участки с низкой или, наоборот, повышенной звукоизоляцией способны изменить общую звукоизоляцию конструкции и называются акустическими отверстиями (неоднородностями, вырезами и пр.).

С точки зрения особенностей передачи звуковой энергии через неоднородности их следует разделить на "большие" и "малые". "Большая неоднородность" характеризуется большим отношением линейных размеров (l) неоднородности к длине падающей на неё звуковой волны (λ):

$$\left| \frac{l}{\lambda} \right| \gg 1.$$

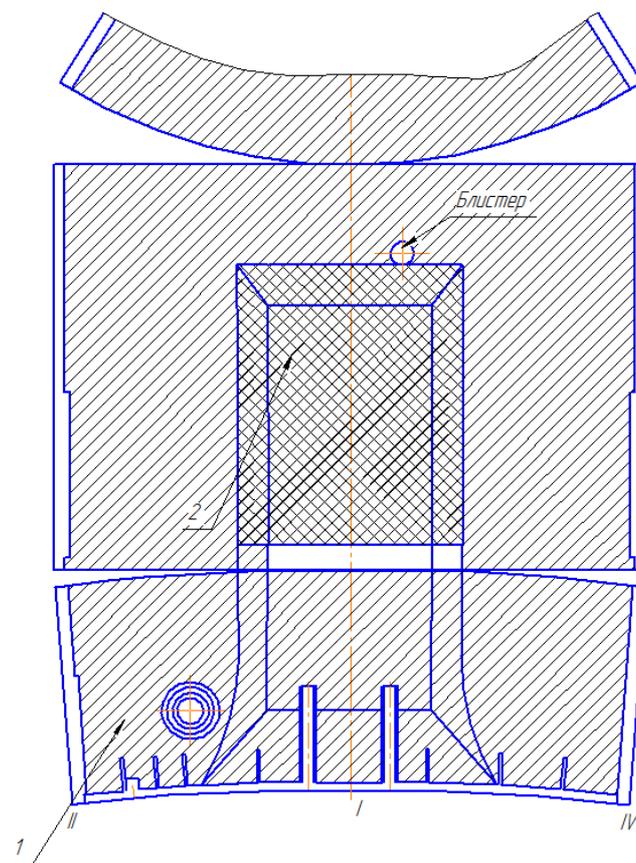


Рис. 1. Схема штатной панели ГО

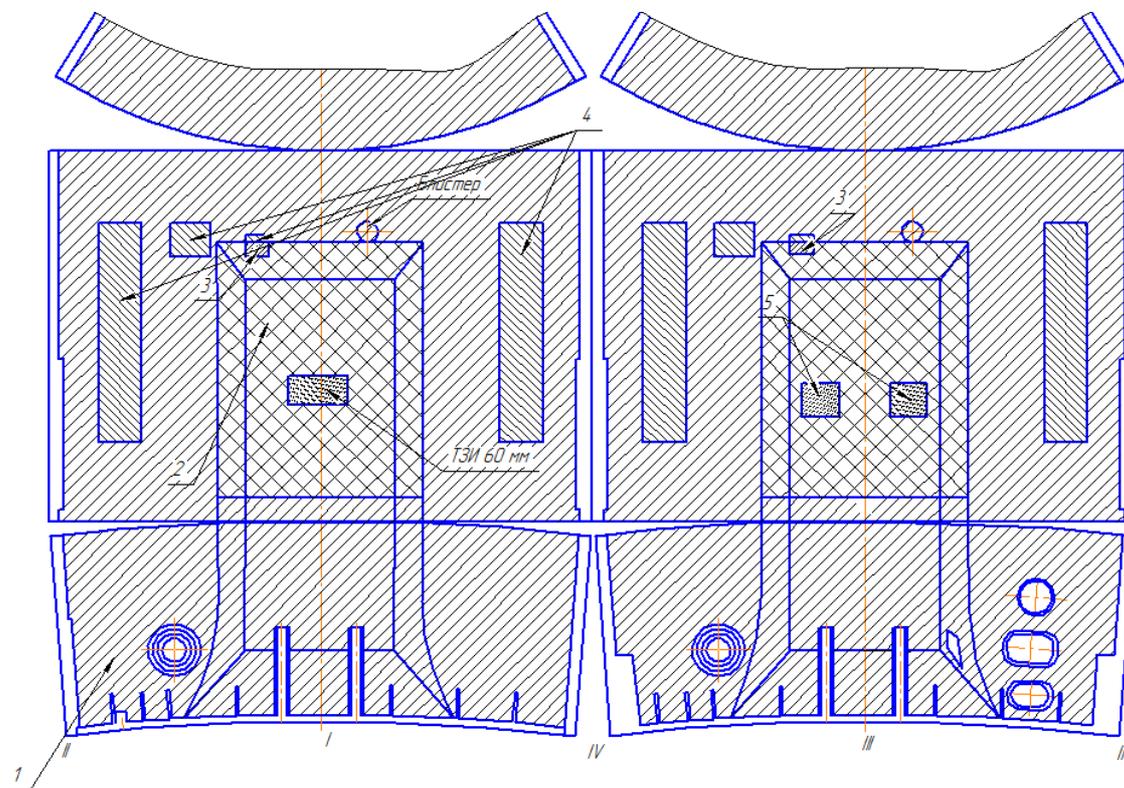


Рис. 2. Схема вырезов на ГО

Практически можно считать, что звуковые волны проходят через большую неоднородность по законам геометрической акустики, а прошедшая через неё звуковая энергия пропорциональна её площади.

Если отношение линейных размеров неоднородности к длине падающей волны мало ($\left|\frac{l}{l}\right| \leq 1$), то нельзя пренебречь дифракционными эффектами (явление огибания волн большой длины препятствий). Законы геометрической акустики здесь не применимы, в связи с чем через малую неоднородность может проходить гораздо меньше звуковой энергии. Прошедшая через отверстие звуковая энергия в этом случае не пропорциональна площади отверстия.

Понятия "большое" и "малое" определяются отношением линейных размеров к длине волны, а следовательно, зависят от частоты звука. Поэтому одна и та же неоднородность может обладать свойствами "большой" в области высоких частот и свойствами "малой" в области низких.

"Малую неоднородность" оценить сложно, так как для этого необходимы экспериментальные исследования для нахождения эмпирических коэффициентов дифракции для учёта их в формулах. Поэтому для расчёта общего снижения или увеличения акустического давления от появления неоднородностей в конструкции предлагается их рассчитывать как "большие". При такой оценке уровни акустического давления в полости под ГО или КА будут больше из-за пренебрежения дифракцией.

В то же время есть альтернативный метод, когда в низкочастотной области, где длины звуковых волн больше линейных размеров неоднородности, влияние её на акустическую среду в отсеке (ГО) не учитывается. На высоких же частотах, где длины звуковых волн меньше линейных размеров и работают законы геометрической акустики (из-за малой дифракции), расчёт должен проводиться как для

"большой" неоднородности.

"Параллельный" (предлагаемый автором) и "последовательный" (представленный в [1]) методы рассматриваются ниже.

"Параллельный" расчёт неоднородностей состоит в том, что имеется изначально неоднородная панель с n локальными неоднородностями площадью S_i , $i = \overline{1, n}$. После появления других неоднородностей в той же панели их локальные площади составляют S_k , $k = \overline{1, m}$. При этом общая площадь панели после появления новых неоднородностей осталась без изменения:

$$S = \sum S_i = \sum S_k .$$

Необходимо оценить, насколько изменилась звукоизоляция неоднородной панели после появления новых вырезов (или неоднородностей).

Пусть I_i - интенсивность прошедшей волны через изначальную i -ю неоднородность, а I_k - интенсивность прошедшей звуковой волны через k -ю вновь получившуюся неоднородность. Тогда положив, что интенсивность внешних акустических волн, падающих под одинаковым углом j , постоянна по панели, получим для акустических мощностей, падающих и прошедших через разные слои акустических волн, следующие выражения:

$$N = \iint_S I_n(x, y) dS = IS \cos(j) ,$$

где $I_n(x, y)$ - интенсивность давления внешних акустических волн в зависимости от координат (x, y) , которая в рассматриваемом случае: $I_n(x, y) = I = const$,

N - мощность внешнего акустического поля на поверхности панели;

$$N_1 = \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} I_{ni}(x, y) dS = \sum_{i=1}^n I_i S_i \cos(j_i) ,$$

где I_{ni} - интенсивность давления акустических волн внутри i -й неоднородности,

N_1 - мощность внутреннего акустического поля первоначальной неоднородной оболочки;

$$N_2 = \sum_{k=1}^m \iint_{S_k} I_{nk}(x, y) dS = \sum_{k=1}^m I_k S_k \cos(j_k),$$

где I_{nk} - интенсивность давления акустических волн внутри k -й неоднородности,

N_2 - мощность внутреннего акустического поля изменённой неоднородной оболочки.

При этом в соответствии с законом Снеллиуса $j = j_i = j_k$.

Пусть изначальная звукоизоляция панели определяется формулой

$$R_1 = 10 \lg\left(\frac{N}{N_1}\right),$$

а звукоизоляция получившейся изменённой панели определяется формулой:

$$R_2 = 10 \lg\left(\frac{N}{N_2}\right).$$

Тогда их разность покажет, насколько изменилась звукоизоляция панели:

$$\begin{aligned} \Delta &= R_1 - R_2 = \\ &= 10 \lg\left(\frac{\sum_{k=1}^m I_k S_k \cos(j_k)}{\sum_{i=1}^n I_i S_i \cos(j_i)}\right) = \\ &= 10 \lg\left(\frac{\sum_{k=1}^m I_k S_k}{\sum_{i=1}^n I_i S_i}\right). \end{aligned}$$

Теперь поделим выражение, стоящее под знаком логарифма, на $I_{i\phi}$ ($i\phi$ - фиксированная неоднородность), используя тождество $A = 10^{\lg(A)}$:

$$\Delta = 10 \lg\left(\frac{\sum_{k=1}^n 10^{(R_{\phi i} - R_k)/10} S_k}{S_{\phi i} + \sum_{i=1, i \neq i\phi}^n 10^{(R_{\phi i} - R_i)/10} S_i}\right). \quad (1)$$

Здесь $R_i = 10 \lg\left(\frac{I}{I_i}\right)$ - звукоизоляция i -й локальной зоны;

$R_k = 10 \lg\left(\frac{I}{I_k}\right)$ - звукоизоляция k -й локальной зоны;

$R_{\phi i} = 10 \lg\left(\frac{I}{I_{\phi i}}\right)$ - звукоизоляция i -й фиксированной локальной зоны.

Выражение (1) справедливо для оценки изменения звукоизоляции неоднородной панели при акустических "окнах" с линейными размерами, большими чем длины звуковых волн.

Рассмотрим "последовательный" расчёт неоднородностей в панели. Этот метод исходит из того представления, что расчёт изменения звукоизоляционных характеристик панели от появления одной неоднородности соответствует формуле (1), полученной выше в предположении одной неоднородности:

$$\Delta_1 = 10 \lg\left(\frac{S_1 + S_1^* \cdot 10^{\frac{R_1 - R_1^*}{10}}}{S_1 + S_1^*}\right),$$

где S_1 - площадь панели без выреза; S_1^* - площадь выреза; R_1 - звукоизоляция пластины; R_1^* - звукоизоляция неоднородности.

Тогда получившаяся звукоизоляция новой пластины определяется по формуле

$$R_2 = R_1 - 10 \lg\left(\frac{S_1 + S_1^* \cdot 10^{\frac{R_1 - R_1^*}{10}}}{S_1 + S_1^*}\right).$$

Учтём влияние n неоднородностей (от 2-й до n -й):

$$\begin{aligned}
 R_3 &= R_2 - 10 \lg \left(\frac{S_2 + S_2^* \cdot 10^{\frac{R_2 - R_2^*}{10}}}{S_2 + S_2^*} \right); \\
 R_4 &= R_3 - 10 \lg \left(\frac{S_3 + S_3^* \cdot 10^{\frac{R_3 - R_3^*}{10}}}{S_3 + S_3^*} \right); \\
 R_5 &= R_4 - 10 \lg \left(\frac{S_4 + S_4^* \cdot 10^{\frac{R_4 - R_4^*}{10}}}{S_4 + S_4^*} \right); \\
 R_{i+1} &= R_i - 10 \lg \left(\frac{S_i + S_i^* \cdot 10^{\frac{R_i - R_i^*}{10}}}{S_i + S_i^*} \right); \\
 &\dots\dots\dots \\
 R_n &= R_{n-1} - 10 \lg \left(\frac{S_{n-1} + S_{n-1}^* \cdot 10^{\frac{R_{n-1} - R_{n-1}^*}{10}}}{S_{n-1} + S_{n-1}^*} \right).
 \end{aligned} \tag{2}$$

По последовательности (2) можно найти изменение звукоизоляционной характеристики изначально однородной панели.

Для нахождения коэффициента звукоизоляции отдельных неоднородных слоёв принята математическая модель "резонансной звукоизоляции", описанная в [1], а также результаты экспериментальных работ [2]. При этом для определения коэффициента потерь h твёрдой пласти-

ны с мягким покрытием была использована следующая формула [3]:

$$h = \frac{h_2 [2s h(n_2 h_2) - \sin(2n_2)]}{2m_1 n_2 h_2 [\cos(n_2) + c h(n_2 h_2)] + h_2 \sin(n_2) + 2c h(n_2 h_2)},$$

где h_2 - коэффициент материала покрытия;

$$n_2 = k_2 h_2;$$

$$m_{12} = \frac{m_1}{m_2};$$

$$m_1 = r_1 h_1;$$

$$v_2 = k_2 h_2;$$

$$m_2 = r_2 h_2;$$

k_2 - модуль волнового числа волн сжатия в покрытии; h_1, h_2 - толщина пластины и покрытия; r_1, r_2 - плотность панели и покрытия. На рис. 3 изображены характеры изменения коэффициента потерь от толщины звукоизоляционного слоя (ППУ-35) на резонансных частотах 250, 500 Гц (некоторые значения были уточнены результатами экспериментов ЦАГИ по нахождению коэффициента потерь методом "полуширины резонансного пика").

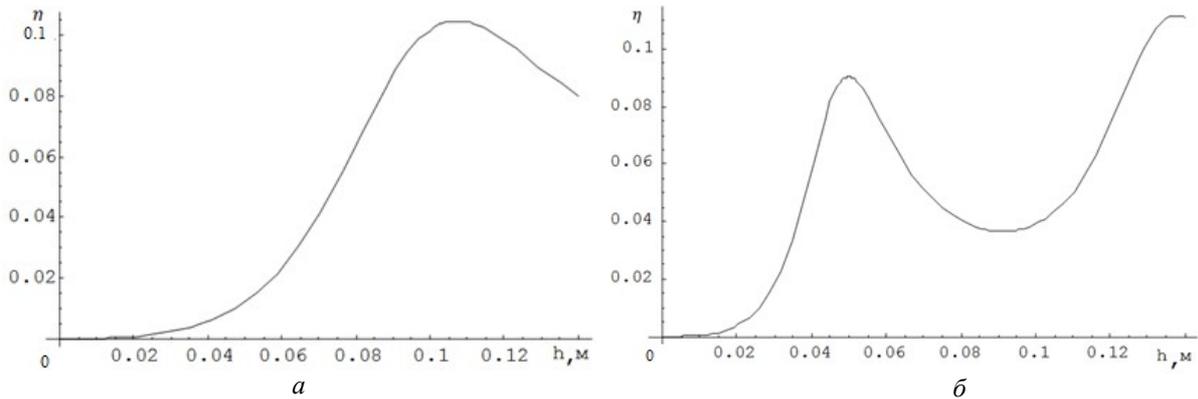


Рис. 3. Характер изменения коэффициента потерь от толщины звукоизоляционного слоя (ППУ-35) на резонансных частотах 250 Гц (а) и 500 Гц (б)

Формула, выражающая "параллельный" метод, для данного случая внедре-

ния неоднородностей будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \Delta = R' - R &= 10 \lg \left(\frac{S_{20} + 10^{(R_{20} - R_{140})/10} S_{140} + 10^{(R_{20} - R_{60})/10} S_{60}}{S_{20}' + 10^{(R_{20} - R_{140})/10} S_{140}'} + \right. \\
 &+ \left. \frac{10^{(R_{20} - R_{10})/10} S_{10} + 10^{(R_{20} - R_{10-70})/10} S_{10-70}}{S_{20}' + 10^{(R_{20} - R_{140})/10} S_{140}'} \right).
 \end{aligned}$$

Здесь R_{60} , R_{10} , R_{20} , R_{10-70} , R_{140} характеризуют эффективность звукоизоляции при прохождении звуковой волны соответственно через слои:

$$-20 \text{ мм}, R_{20} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{внеш}}}{I_{20}} \right);$$

$$-140 \text{ мм}, R_{140} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{внеш}}}{I_{140}} \right);$$

$$-10 \div 70 \text{ мм}, R_{10-70} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{внеш}}}{I_{10-70}} \right);$$

$$-10 \text{ мм}, R_{10} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{внеш}}}{I_{10}} \right);$$

$$-60 \text{ мм}, R_{60} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{внеш}}}{I_{60}} \right).$$

Формулы, выражающие "последовательный" метод, имеют вид

$$R_{i+1} = R_i - 10 \lg \frac{S_i + S_i^* + 10 \frac{R_i - R_i^*}{40}}{S_i + S_i^*},$$

где $i=1, \dots, 4$ (всего пять неоднородностей с площадями S_{20} , S_{140} , S_{10-70} , S_{10} , S_{60}).

Результаты расчётов по двум методам приведены в табл. 1.

Таблица 1. Общее увеличение акустического давления под ГО за счёт всех вырезов

f , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000
Δ парал, дБ (предложено автором)	0,033	0,032	0,032	0,19	0,46	0,032	0,033
Δ послед, дБ (предложено в [1])	0,038	0,038	0,03	0,199	0,468	0,039	0,033

Для учёта увеличения акустического нагружения в локальных зонах (в зонах "вырезов") и отработки аппаратуры КА, попадающей в эти зоны, на более жёсткие вибрационные воздействия была проведена оценка ухудшения звукоизоляционной способности непосредственно в локальных местах ГО. Для этого была использована математическая модель "резонансной звукоизоляции", описанная в [1], а также результатов экспериментов [2] на панелях с нанесёнными звукопоглощающими материалами типа ППУ.

При уменьшении толщины звукопоглотителя снижение звукоизоляции может происходить по нескольким направлениям.

1. Уменьшение поверхностной массы ведёт к снижению "нерезонансной" звукоизоляции, которую можно оценить в соответствии с формулой

$$\Delta = 10 \lg \left(1 + \left(\frac{w m_1}{2rc} \right)^2 \right) - 10 \lg \left(1 + \left(\frac{w m_2}{2rc} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где m_1 и m_2 - поверхностные массы изначальной и получившейся панелей; $\omega_{\text{рез}}$ -

круговая частота; ρ - плотность воздуха, c - скорость звука в воздухе.

Из формулы (3) следует, что в нерезонансных полосах частот звукоизоляция уменьшится.

При уменьшении слоя с 20 мм до 10 мм (снижении поверхностной массы на 4%) она снизится на 0,36 дБ. При уменьшении слоя со 140 мм до 60 мм (снижение поверхностной массы на 22%) она снизится на 2 дБ.

Кроме того, если учесть дифракционные явления, а они будут возникать для данных "вырезов" (60 мм) до 1000 Гц, то предполагаемое увеличение акустики на 2 дБ может быть лишь на частотах свыше 1000 Гц.

2. Уменьшение толщины поглотителя ведёт к уменьшению звукоизоляции за счёт снижения демпфирования структурного шума, которое можно оценить при помощи модели "резонансной звукоизоляции" [1] с использованием коэффициентов потерь, полученных в [5]:

$$\Delta = 10 \lg \left(\frac{2rc + w_{\text{рез}} m_1 h_1}{2rc + w_{\text{рез}} m_2 h_2} \right), \quad (4)$$

η_1 и η_2 - коэффициенты потерь изначальной и получившейся панелей;

$\omega_{рез}$ - резонансная частота.

Учитывая, что изначальное отношение толщины поглотителя ППУ к толщине корпуса ГО на гаргротах было 7:1, а в остальных местах ГО - 1:1, вычисления в соответствии с (4) показали следующее.

При уменьшении слоя с 20 мм до 10 мм:

- на резонансной частоте, попадающей в октавную полосу 250 Гц, падение звукоизоляции составляет 0,57 дБ (6,8 %);

- на резонансной частоте, попадающей в октавную полосу 500 Гц, падение звукоизоляции составляет 0,72 дБ (8,6 %).

При уменьшении слоя с 140 мм до 60 мм на резонансных частотах 250 и 500 Гц падение звукоизоляции в соответствии с (4) составляет 6 дБ (100 %).

Таким образом, из всех вырезов опасными являются вырезы глубиной до 60 мм, так как в этих местах уровни акустического нагружения могут возрасти в два раза в области частот 250-500 Гц. На высоких частотах (от 1000 Гц) это возрастание может быть около 2 дБ (26%). Изменение звукоизоляции при различных условиях эксплуатации РН представлено на рис. 4.

Увеличение акустического нагружения в остальных местах не превышает допустимых 10%.

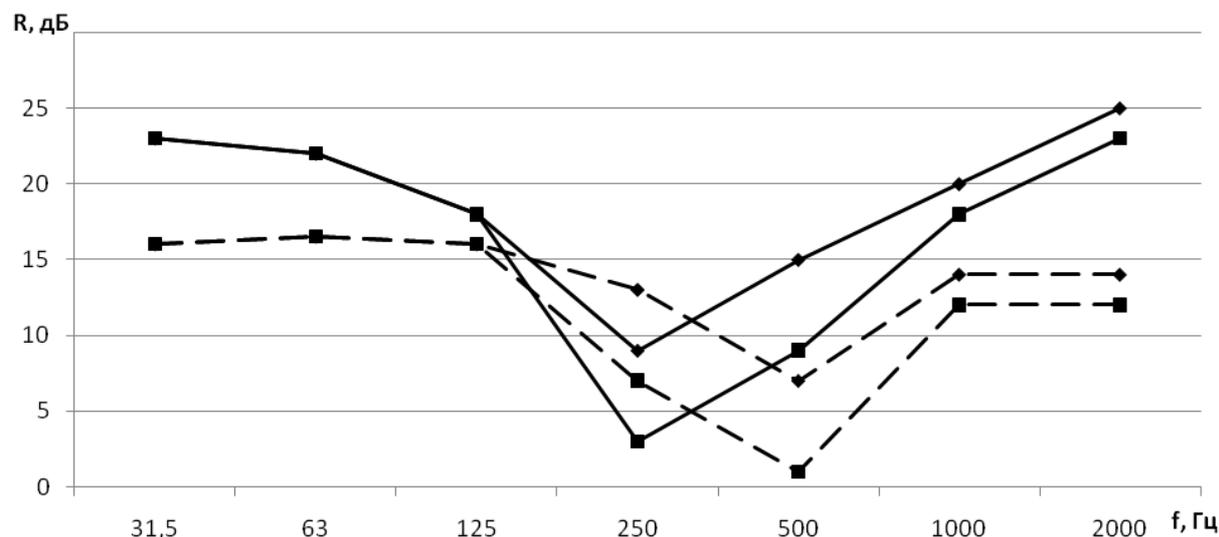


Рис. 4. Изменение звукоизоляции при полёте (—) и старте (----) ракеты-носителя:

◆ - ГО, ■ - в местах выреза глубиной 80 мм

Выводы

Методика, описанная в [1], предполагает оценку изменения звукоизоляции от постепенного ввода новой неоднородности (2). Это требует изначальной однородности поверхности изучаемого объекта, что не всегда удобно и заставляет тратить больше времени для решения задачи.

В работе предложен "параллельный" метод исследования изменения звукоизоляции от введения неоднородностей в конструкцию ГО, в котором неоднородно-

сти оцениваются все сразу ("параллельно") в соответствии с формулой (1).

Библиографический список

1. Боголепов, И. И. Промышленная звукоизоляция [Текст] / И. И. Боголепов – Л.: Судостроение, 1986. - 367 с.
2. Экспериментальное определение звукоизоляции межбакового отсека блока III ступени РН "Союз" [Текст] / НТО, инв. №5535, ЦАГИ, 1999. - 38 с.
3. Никифоров, А. С. Вибропоглощение на судах [Текст] / А. С. Никифоров.- Л.: Судостроение, 1979. - 184 с.

4. Карпушин, В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре [Текст] / В. Б. Карпушин. – М.: Советское радио, 1971.- 343 с.

5. Определение виброакустических характеристик фрагментов конструкции головного обтекателя РН "Союз" [Текст] / НТО, №5527, ЦАГИ, 1999. – 34с.

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE SOUND-PROOF ABILITY OF THE ROCKET FAIRING WITH LAYERS OF SOUND-PROOF MATERIALS VARYING IN THICKNESS

© 2012 P. A. Popov

State Research and Production Space Rocket Center "TsSKB-Progress"

The paper presents a method that makes it possible to assess the changes in the sound-proof ability of the panels of the head part of a rocket, considering all the heterogeneities of its structure. The results of calculating the influence of removing part of the sound-proof material from the surface of a standard head part of a rocket on the ultrasonic pressure under the head part are presented.

Acoustic pressure, sound insulation, head fairing, factor of losses, diffraction, «small» and «great» heterogeneity, «parallel» and «consecutive» methods.

Информация об авторе

Попов Павел Александрович, начальник группы, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: banduir@rambler.ru. Область научных интересов: звукоизоляция и акустические нагрузки.

Popov Pavel Aleksandrovich, head of group, Space Rocket Center "TsSKB-Progress". E-mail: banduir@rambler.ru. Area of research: sound insulation and acoustic loads.