



Оценка углов падения волн акустического давления на поверхность стрингерной конструкции сухого отсека при старте ракеты

П. А. Попов | кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор
отдела нагрузок;
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;
email: banduir@rambler.com

В работе представлены экспериментальные характеристики звукоизоляции стрингерного отсека ракеты-носителя. Показано, что меняющиеся от старта к старту резонансные провалы в спектре звукоизоляции зависят от углов падения акустических волн на поверхность отсека. Данные выводы были сделаны на основании математической модели, позволяющей учесть угловое падение акустических волн на цилиндрическую оболочку. Предложены формулы оценки эквивалентных характеристик стрингерных обечаек отсеков для оценки исследуемых параметров звукоизоляции (эквивалентная толщина, модуль упругости, плотность, цилиндрическая и мембранная жёсткости).

Ключевые слова: стрингерный отсек ракет; акустическое поле; коэффициент звукоизоляции; угловое падение акустических волн

Цитирование: Попов, П. А. Оценка углов падения волн акустического давления на поверхность стрингерной конструкции сухого отсека при старте ракеты / П. А. Попов // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №2. – С. 87-96. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-87-96

Введение

Анализ результатов измерений виброакустического нагружения стрингерной конструкции сухого отсека ракеты-носителя (РН) показал, что частотный профиль звукоизоляции может изменяться от пуска к пуску. Для изучения данного явления были проанализированы результаты проведённых работ по оценке звукоизоляции усечённого сегмента отсека [1] и применена модель звукоизоляции цилиндрической оболочки при наклонном падении на неё плоских акустических волн [2], так была сделана гипотеза о влиянии изменения направленности акустических волн при падении их на поверхность отсека. Анализ открытых источников также показывает, что, как правило, звукоизоляционный спектр можно условно разбить, в том числе для цилиндрической стрингерной конструкции, на четыре области [3, 4]. Так, на представленном на рисунке 1 профиле звукоизоляции сегмента стрингерной цилиндрической конструкции, полученном в результате эксперимента [1], выделяют область I, характеризующуюся тем, что в данном частотном диапазоне исследуемая величина зависит от жёсткостных характеристик оболочки. Повышение изгибной жёсткости ведёт к повышению низкочастотной звукоизоляции, при этом её тренд вдоль частотной оси будет ниспадающим вплоть до основной резонансной частоты конструкции. На данном графике область I условно распространяется до центральной частоты 125 Гц, тогда как основной резонанс конструкции попадает в полосу частот 160 Гц. В следующей «резонансной» частотной области II звукоизоляция определяется динамическим модулем потерь $E\eta$, где E, η – модуль упругости и по-

тери в конструкции, и геометрическим расположением стрингеров и шпангоутов относительно друг друга. Как было отмечено, первый минимум области II обусловлен основным резонансом панели, второй, попадающий в полосу частот 625 Гц, объясняется резонансом волнового совпадения панели с эквивалентными параметрами для данной панели. В частотной области III с повышением поверхностной массы повышается звукоизоляция конструкции, при этом её тренд вдоль частотной оси будет восходящим в соответствии с «законом массы» не более 6 дБ на октаву, как это показано на рисунке 1. При этом погрешность в результатах экспериментов, вызванная данным фактором, не превысила 1 дБ [8].

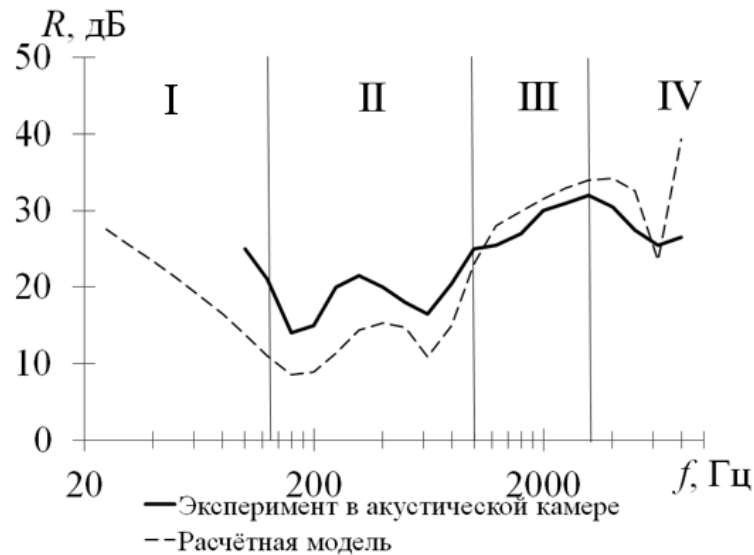


Рисунок 1 – Типичная частотная характеристика звукоизоляции для стрингерной панели:
I – область упругости (жесткости); II – область резонансов; III – область закона массы;
IV – область волнового совпадения

В частотной области IV после увеличения звукоизоляции по частотной оси в области действия закона масс III наблюдается её новый спад, связанный с эффектом волнового совпадения, возникающим в обшивке панели, в рассматриваемом примере это явление достигается в полосе частот 6300 Гц. На частоте волнового совпадения след падающей на панель звуковой волны равен длине свободных изгибных волн, возбуждающихся в ней [3]. Эта частота зависит от угла падения звуковых волн и наименьшего значения достигает при касательном падении. Для подтверждения сказанного на рисунке 1 нанесён график, представляющий собой результат расчёта для аналогичной стрингерной панели при угловом падении акустических волн, составляющих 70° от нормали. Свойства областей I-IV соответствуют импедансным характеристикам:

$$Z = \begin{cases} i(\omega m_1 - \frac{D}{\omega}), \omega \leq 0,5\omega_p, \\ i(\omega m_1 - \frac{iD\eta}{\omega}), 0,5\omega_p < \omega \leq 2\omega_p, \\ i\omega m_2, 2\omega_p < \omega < 0,5\omega_c, \\ i[\omega m_2 - \frac{D(1+i\eta)\omega^3 \sin^4(\theta)}{c^4}], \omega \geq 0,5\omega_c, \end{cases}$$

где m_1 – поверхностная масса панели с учётом стрингеров, m_2 – без их учёта, D – цилиндрическая жесткость, c – скорость звука в воздухе, η – потери в конструкции пане-

ли, θ – угол падения акустических волн, отсчитываемый от нормали, проведённой к поверхности панели, $\omega=2\pi f$ – круговая частота, ω_p – основная резонансная частота панели, ω_c – её частота волнового совпадения, диапазон частот $\omega \leq 0,5\omega_p$ соответствует области I, $0,5\omega_p < \omega \leq 2\omega_p$ – области II, $2\omega_p < \omega < 0,5\omega_c$ – области III, $\omega \geq 0,5\omega_c$ – области IV.

Как показали результаты измерений акустического нагружения ракет-носителей и головных обтекателей, важным параметром для оценки спектральных характеристик снижения звукоизоляции в области резонансов явился параметр направленности падения акустических волн на конструкцию отсека, поэтому для решения поставленной задачи был использован механический импеданс оболочки Z , в которой упомянутая направленность была учтена [2]:

$$Z = \frac{p_1 - p_2}{v_r} = i\omega m \left[1 - \frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) - \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi) \right], \quad (1)$$

где E – комплексный модуль упругости, h – толщина, r – радиус оболочки, c – скорость звука среды под оболочкой, θ, ψ – углы между направлением падающей волны и, соответственно, поперечным и продольным сечениями оболочки. Проекция волны на поперечную плоскость (радиальное направление, r) и продольную плоскость показаны пунктирными линиями и представлены на рисунке 2.

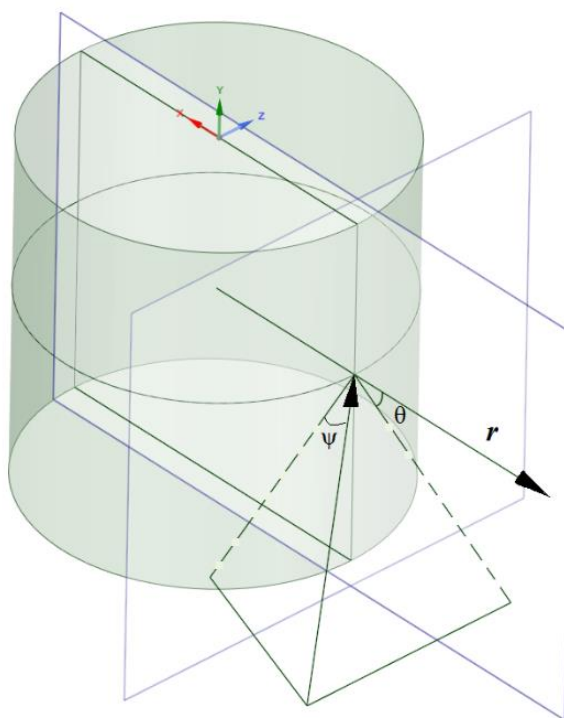


Рисунок 2 – Направление падения акустической волны на цилиндрическую поверхность

В рамках проведённой работы была оценена направленность падения акустических волн, получена формула для оценки характеристик потерь конструкций на резонансных частотах, были предложены формулы для оценки параметров эквивалентной гладкой оболочки, с которой в дальнейшем проводились все необходимые процедуры для получения всех вышеуказанных показателей.

1 Объект исследований, формулы эквивалентной гладкой оболочки и исходные данные

Обработка телеметрии

Измерения вибрационных ускорений и акустического давления при пусках осуществлялись с использованием данных телеметрической системы измерения (СИ), установленной на борту РН и обеспечивающей контроль вибрационного и акустического нагружения её ступеней и головного обтекателя. Измерение акустического давления на внешней и внутренней поверхности отсека осуществлялось с помощью акустических датчиков, установленных на СО согласно рисунку 3. Измерение радиального ускорения стрингерного отсека (СО) проводилось с помощью акселерометра, измерение акустического давления на внешней и внутренней поверхности отсека осуществлялось с помощью акустических микрофонов.

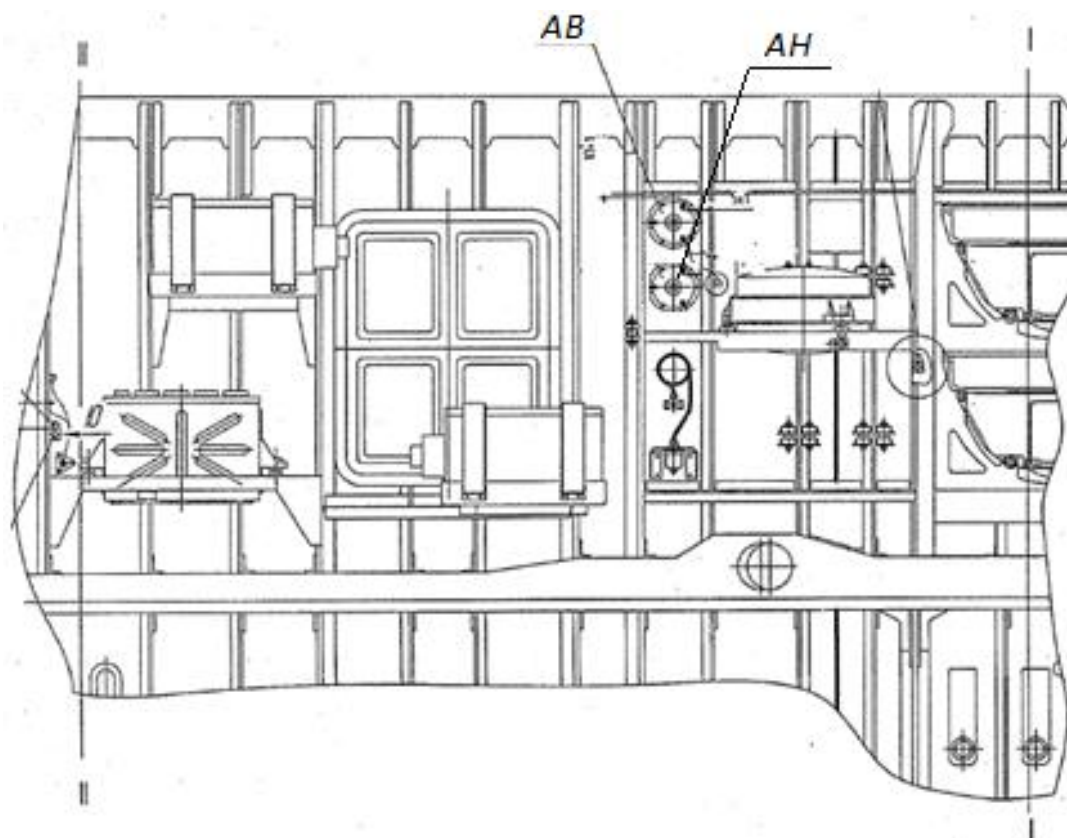


Рисунок 3 – Установка датчиков акустического давления на обечайку СО:
АН – акустический наружный; АВ – акустический внутренний

Телеметрическая информация по быстроменяющимся параметрам (БМП) принималась и регистрировалась приёмными станциями космодрома. Информация по БМП СИ передавалась в виде массивов. Каждый передаваемый массив содержал 512 последовательных измерений одного датчика БМП. Обработка телеметрической информации (ТМИ) СИ по быстроменяющимся параметрам вибрационного ускорения и акустического давления была проведена в два этапа. На первом этапе исходная оцифрованная ТМИ СИ («оцифровка» производилась на борту РН) обрабатывалась и представлялась в виде отдельных текстовых файлов по каждому параметру в физических величинах; на втором этапе проводился спектральный анализ оцифрованных процессов со следующими функциональными параметрами: шаг по частоте – 1 Гц; продолжительность «временного окна» – 1 с; перекрытие окон – 0,5 с; частотный диапазон анализа – 1/3-октавный. Далее в рамках каждого 1/3-октавного диапазона

вычислялись спектральные плотности мощностей виброускорений и акустических давлений, что позволяло найти осреднённые характеристики всех физических величин в рамках данных диапазонов через 1 Гц. Например, для осреднённого значения акустического давления через 1 Гц:

$$p_{1Гц}(f) = \sqrt{\frac{p_{1/3}^2}{\Delta_{1/3}} \cdot 1Гц},$$

где $p_{1/3}$ – суммарное акустическое давление в 1/3-октавном диапазоне с шириной $\Delta_{1/3}$ Гц.

Формулы эквивалентной гладкой оболочки для стрингерной обечайки

Для анализа результатов экспериментов и проведения расчётов были выбраны параметры гладкой оболочки эквивалентной по жёсткости подкреплённой обшивке СО. При этом использовалось следующее правило для проведения расчётов эквивалентной цилиндрической D_e и мембранной жёсткости B_e [5, 6]:

1) с одной стороны, D_e (B_e) является суммой удельной изгибной (удельной продольной) жёсткости силового элемента и цилиндрической (мембранной) жёсткости обечайки без силовых элементов:

$$\begin{aligned} D_e &= \frac{E_1 J}{l} + \frac{E_2 \delta^3}{12(1-\nu^2)}, \\ B_e &= \frac{E_1 F}{l} + \frac{E_2 \delta}{1-\nu^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $E_1, E_2, J, F, \delta, l, \nu$ – модули упругости силового набора и обечайки, момент инерции при изгибе силовых элементов, площадь сечения силового элемента, толщина обечайки, расстояние между силовыми элементами, коэффициент Пуассона соответственно.

2) с другой стороны, их можно представить в виде цилиндрической и мембранной жёсткости в эквивалентных параметрах:

$$\begin{aligned} D_e &= \frac{E_e \delta_e^3}{12(1-\nu_e^2)}, \\ B_e &= \frac{E_e \delta_e}{1-\nu_e^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где E_e, δ_e – эквивалентные модуль упругости и толщина. Эквивалентный коэффициент Пуассона примем равным аналогичному коэффициенту для обечайки без стрингеров:

$$\nu_e = \nu.$$

Из (3) с учётом (2) получим следующие соотношения для эквивалентной толщины δ_e , модуля упругости E_e и плотности ρ_e :

$$\begin{aligned} \delta_e &= \sqrt{12 \frac{D_e}{B_e}}, \\ E_e &= \frac{B_e(1-\nu^2)}{\delta_e}, \\ \rho_e &= \frac{M}{S \delta_e}, \end{aligned} \quad (4)$$

где M – масса обечайки, S – площадь её поверхности.

Используемые при анализе характеристики СО, вычисленных по формулам (4), приведены в таблице 1.

В таблице также представлены частоты кольца обечайки без стрингеров f_r и критические частоты волнового совпадения с учётом стрингеров f_c , на которых предположительно реализуются провалы проводимости акустической вибрации [7], соответственно вычисленные по формулам [2, 3, 8, 9]:

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s(1-\nu^2)}}, \\ f_c &= \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_e}{D_e}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где E_s , ρ_s , m_s – модуль Юнга, плотность, поверхностная масса отсеков без стрингеров или гладких отсеков, m_e – поверхностная масса стрингерной обечайки.

Таблица 1 - Характеристики обшивки

m_s , кг/м ²	3,705
m_e , кг/м ²	15,0
E_e , Па	$5,0 \cdot 10^9$
h_e , мм	46,7
D_e , Н·м	$4,7 \cdot 10^4$
B_e , Н/м	$2,6 \cdot 10^8$
f_r , Гц	696
f_c , Гц	334,6

Из таблицы 1 видно, что исследуемый СО имеет достаточно высокую поверхностную массу за счёт вклада силового набора, тогда как поверхностные массы обшивок составляют 25%.

2 Взаимосвязь импеданса цилиндрической оболочки и звукоизоляции

Принимая во внимание гармоническое поведение акустических волн, из (1) получим связь между импедансом оболочки и её коэффициентом звукоизоляции:

$$r = \frac{p_1^2}{p_2^2}, \quad (6)$$

где p_1 – амплитуда волн акустического давления падающих снаружи на оболочку, p_2 – амплитуда волн, прошедших под оболочку.

Для этого учтём потери в материале обшивки η и произведём переход к комплексной жёсткости и комплексному модулю упругости по формулам:

$$\begin{aligned} D &\rightarrow D(1+i\eta), \\ E &\rightarrow E(1+i\eta). \end{aligned} \quad (7)$$

Используя (1), (7) перейдём к комплексному импедансу:

$$Z = \omega m \left[i \left(1 - \frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) - \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi) \right) + \eta \left(\frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) + \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi) \right) \right]. \quad (8)$$

Учтём в (8) круговую критическую (наименьшую) частоту волнового совпадения и круговую частоту кольца по формулам (5) и перепишем в виде:

$$Z = \omega m [i(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^4(\theta) - \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \sin^4(\psi)) + \eta(\frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^4(\theta) + \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \sin^4(\psi))]. \quad (9)$$

Для оценки коэффициента звукоизоляции (6) воспользуемся выражением (9) и выражением, связывающим нормальную колебательную скорость v_r и звуковые давления по обе стороны оболочки [2, 3, 8, 9]:

$$v_r = - \int_t \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt = \frac{p_2 \cos(\theta)}{\rho c}, \quad (10)$$

где ρc – акустические сопротивления внутри оболочки.

Решая (1) и (10) совместно получим:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{Z \cos(\theta)}{2\rho c} + 1. \quad (11)$$

Подставим (9) в (11):

$$\begin{aligned} \frac{p_1}{p_2} &= 1 + \frac{mi\omega \cos(\theta)}{\rho c} (1 - \frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) - \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi)) + \frac{mi\omega \cos(\theta)}{\rho c} i\eta (-\frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) - \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi)) = \\ &= \frac{mi\omega \cos(\theta)}{\rho c} (1 - \frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) - \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi)) + 1 + \frac{m\omega \eta \cos(\theta)}{\rho c} (\frac{D\omega^2}{mc^4} \sin^4(\theta) + \frac{Eh}{m\omega^2 r^2} \sin^4(\psi)). \end{aligned}$$

С учётом (6) получим модуль коэффициента звукоизоляции:

$$r = (\frac{\omega m \cos(\theta)}{2\rho c} [\eta(\frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^4(\theta) + \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \sin^4(\psi)) + 1]^2 + (\frac{\omega m \cos(\theta)}{2\rho c} (1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^4(\theta) - \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \sin^4(\psi)))^2 \quad (12)$$

Выражение (12) является *теоретическим* результатом получения звукоизоляции цилиндрической оболочки, нагруженной плоской волной акустического давления при различных углах их падения.

Оценка углов падения акустических волн на поверхность СО

Оценка углов падения акустических волн на поверхность СО, как показывает формула (1), является важной частью проведения расчётов внутреннего акустического нагружения и звукоизоляции. Для получения значений θ и ψ , представленных на рисунке 2, воспользуемся значениями нуждающейся в уточнении звукоизоляции, полученной на обечайке СО при трёх пусках РН, и проведём расчёт по формуле (12), подобрав такие углы падения ψ и θ , чтобы в результате расчёта реализовались провалы, представленные на рисунке 3, и вычислим из этого выражения величину $R=10\lg(r)$.

Как показано на рисунке 4, возникновение провалов в спектре звукоизоляции на частотах 200–315 Гц и 625–800 Гц обусловлено падением акустических волн под углами $\psi=32^\circ-40^\circ$ и $\theta=39^\circ-44^\circ$, их схематичное представление показано на рисунке 2. Первый минимум, попадающий в полосы частот 200–315 Гц, соответствует частоте кольца, второй минимум, попадающий в полосы 625–800 Гц, соответствует частоте волнового совпадения рассматриваемой стрингерной обечайки с параметрами, вычисленными по формулам (4), (5). Если провести сравнение данных, приведённых в таблице 1, и данных, представленных на графиках

на рисунке 3, то можно заметить, что частота кольца f_r вследствие указанного углового падения сместилась с 696 Гц (при $\psi=90^\circ$) в полосы с центральными частотами 200–315 Гц (при $\psi=32^\circ\text{--}40^\circ$), тогда как частота волнового совпадения f_c по той же причине сместилась с 334,6 Гц (при $\theta>80^\circ$) в полосы частот 625–800 Гц (при $\theta=39^\circ\text{--}44^\circ$). Возможность появления эффекта волнового совпадения на столь низких частотах для подкреплённых панелей подтверждается в том числе результатами расчётов, приведённых в [2, 10].

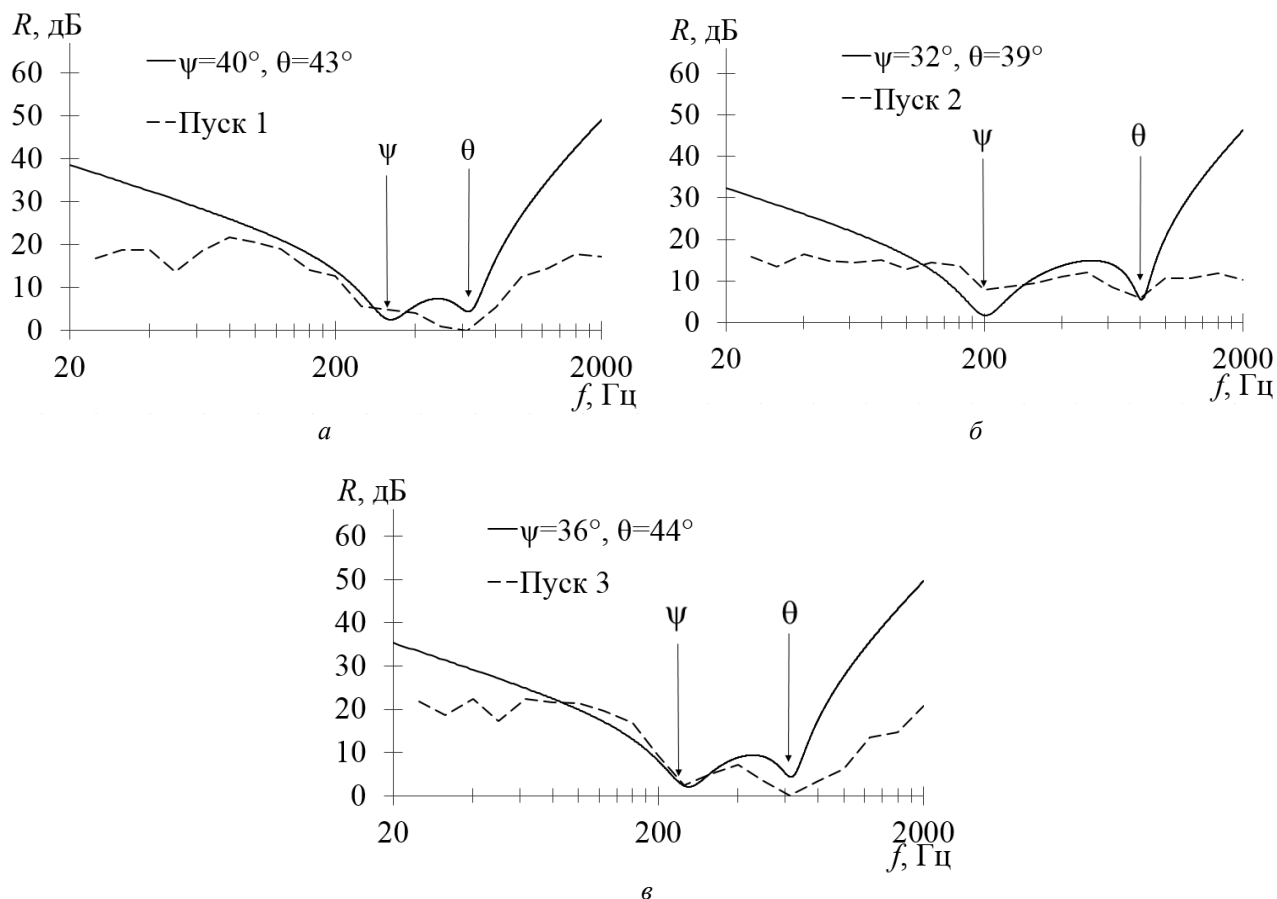


Рисунок 4 – Результаты оценки углов падения ψ и θ по формуле (12), соответствующих провалам в спектре звукоизоляции в полосах частот: *a* – 315 Гц и 625 Гц, *б* – 200 Гц и 800 Гц, *в* – 250 Гц и 625 Гц

Как показано на рисунке 5, при уменьшении угла ψ возникает смещение минимумов в спектре звукоизоляции на низшие частоты, тогда как при уменьшении угла θ – наоборот смещение минимума звукоизоляции на высшие частоты.

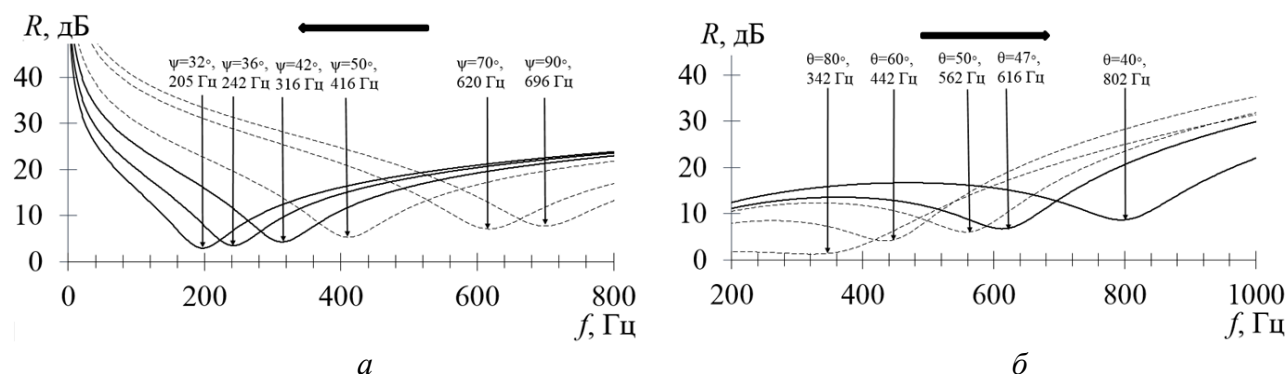


Рисунок 5 – Смещение провалов звукоизоляции при изменении углов падения: *a* – ψ , *б* – θ

3 Заключение

Статистические данные по направленности акустических волн при старте РН позволяют более точно формировать внешние акустические воздействия при нагружении отсеков при проведении расчётов виброакустического нагружения конструкции и аппаратуры РН.

В рамках проведённой работы были получены следующие результаты:

1. Получены формулы для эквивалентной гладкой оболочки для вычисления величины внутреннего акустического давления и звукоизоляции обечайки СО в частотных полосах влияния силового набора.

2. С помощью модели, учитывающей углы между направлением падающей волны и поперечным или продольным сечениями оболочки, произведена оценка их падения на обечайку СО на участке старта.

3. Сделан вывод о том, что характеристические провалы в звукоизоляции СО, меняющиеся по частоте от пуска к пуску, являются следствием меняющегося угла падения волн акустического давления от различных источников шума.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение рекуррентных соотношений для нахождения взаимосвязи между параметрами акустического давления снаружи и внутри отсека, а также соответствующего им радиального виброускорения.

Список использованных источников

1. Ткачев, А. А. Определение звукоизоляции межбакового отсека (МБО) блока 3 ступени РН / А. А. Ткачев, Л. К. Горохова, А. В. Рыков. – Москва: ЦАГИ, 1999. – 38 с.
2. Мунин, А. Г. Авиационная акустика. В 2-х частях. Ч.2. Шум в салонах пассажирских самолётов / А. Г. Мунин. – Москва: Машиностроение, 1986. – 264 с.
3. Боголепов, И. И. Промышленная звукоизоляция / И. И. Боголепов. – Ленинград : Судостроение, 1986. – 367 с.
4. Файловый архив студентов: [сайт]. – Саратов, 2015. – URL: <https://studfile.net/preview/4583047/page:9/> (дата обращения: 23.01.2025). – Текст: электронный.
5. Пяткин, В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. 3-е изд. перераб. и доп. / В. А. Пяткин, В. Т. Лизин. – Москва : Машиностроение, 1994. – 384 с.
6. Биргер, И. А. Прочность, устойчивость, колебания. Том 2. Справочник в трёх томах / И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. – Москва: Машиностроение, 1968. – 148 с.
7. Попов, П. А. Изменение параметров вибрации конструкции летательных аппаратов при росте их акустического нагружения / П. А. Попов // Акустический журнал. – 2024. – Т. 70, №5. – С. 740–746.
8. Шендеров, Е. Л. Волновые задачи гидроакустики/ Е. Л. Шендеров. – Ленинград : Судостроение, 1972. – 352 с.
9. Шендеров, Е. Л. Излучение и рассеяние звука/ Е. Л. Шендеров. – Ленинград : Судостроение, 1989. – 304с.
10. Кудисова, Л. Я. Исследование возможности измерения звукоизоляции подкреплённых пластин при наклонных углах падения звука с помощью звукомерной камеры ЦАГИ / Л. Я. Кудисова, Н. Н. Писаревский // Труды ЦАГИ. – 1978. – № 1902. – С. 50-55.

Assessment of incidence angles of acoustic pressure waves on the surface of the stringer structure of the dry compartment during rocket launch

P. A. Popov

Candidate of Science (Engineering), Leading Design Engineer
of the Department of Loads; Progress Rocket and Space Center JSC,
Samara, Russian Federation;
email: banduir@rambler.com

The paper presents experimental characteristics of sound insulation of the stringer compartment of the launch vehicle. It is shown that the resonant dips in the sound insulation spectrum, changing from launch to launch, depend on the angles of incidence of acoustic waves on the compartment surface. These conclusions were drawn on the basis of the mathematical model allowing to consider angular falling of acoustic waves on the cylindrical shell. Formulas for estimating the equivalent characteristics of the stringer shells of the compartments are proposed to evaluate the studied sound insulation parameters (equivalent thickness, elastic modulus, density, cylindrical and membrane rigidity).

Keywords: stringer compartments of rockets; acoustic field; sound insulation coefficient; angular incidence of acoustic waves

Citation: Popov, P. A. (2025), "Assessment of incidence angles of acoustic pressure waves on the surface of the stringer structure of the dry compartment during rocket launch", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 2, pp. 87-96. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-87-96. (In Russian; abstract in English).

References

1. Tkachev, A. A., Gorokhova, L. K. and Rykov, A. V. (1999), *Opredelenie zvukoizolyatsii mezhbakovogo otseka* [Experimental definition of sound insulation compartment of the block 3 steps of RV], TsAGI, Moscow, 38 p. (in Russian).
2. Munin, A. G. (1986), *Aviatsionnaya akustika. V 2-kh chastyakh. Ch.2. Shum v salonakh passazhirskikh samoletov* [Aviation acoustics. In 2 parts. Part 2. Noise in insides of passenger airplanes], Mashinostroenie, Moscow, 264 p. (in Russian).
3. Bogolepov, I. I. (1986), *Promyshlennaya zvukoizolyatsiya* [Industrial sound insulation], Sudostroenie, Leningrad, 367 p. (in Russian).
4. Students' file Archive: [website] (2015), Saratov, URL: <https://studfile.net/preview/4583047/page:9/> (date of request: 01/23/2025). Text: electronic.
5. Pyatkin, V. A. and Lizin, V. T. (1994), *Proektirovanie tonkostennykh konstruktsiy. 3-e izd. pererab. i dop.* [Design of thin-walled designs], 3rd prod. reslave. and additional, Mashinostroenie, Moscow, 384 p. (in Russian).
6. Birger, I. A. and Panovko, Ya. G. (1968), *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. Tom 2. Spravochnik v trekh tomakh* [Durability, stability, fluctuations. Volume 2. The reference book in three volumes], Mashinostroenie, Moscow, 148 p. (in Russian).
7. Popov, P. A. (2024), "Tendention's priests of conductivity of acoustic vibration of the design of aircraft to lowering with the growth of their acoustic loading", *Acoustic physics*, vol. 70, no. 5, pp. 92-98.
8. Shenderov, E. L. (1972), *Volnovye zadachi gidroakustiki* [Wave tasks Wave problems of hydroacoustics], Sudostroenie, Leningrad, 352 p. (in Russian).
9. Shenderov, E. L. (1989), *Izluchenie i rasseyanie zvuka* [Radiation and sound scattering], Sudostroenie, Leningrad, 304 p. (in Russian).
10. Kudisova, L. I. and Pisarevsky, N. N. (1978), "Research of the possibility of measurement of sound insulation of the supported plates at inclined incidence angles of the sound by means of the sound measured camera of TsAGI", *Trudy TsAGI* [Proceedings of TsAGI], no. 1902, pp. 50-55. (in Russian).