

DOI: 10.18287/2409-4579-2018-4-1-21-26

УДК 534.83

**П.А. Попов,  
А.В. Кузнецов,  
А.А. Иголкин,  
В.М. Муртазин**

Самарский национальный исследова-  
тельский университет имени  
академика С.П. Королева (национальный  
исследовательский университет)  
Московское шоссе, 34, г. Самара,  
Российская Федерация, 443086  
al.vl.kuznetsov@mail.ru

## МОДЕЛЬНЫЙ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ ПОДХОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОТСЕКОВ КОСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

*При проектировании ракетно-космической техники решается проблема прогнозирования акустического воздействия на элементы конструкции ракеты-носителя (РН) и полезной нагрузки. Источниками такого воздействия являются, работающие на старте двигатели и набегающий поток воздуха, действующий на РН при старте и на активном участке полёта в земной атмосфере. Однако, решение указанной проблемы, осложняется невозможностью проведения испытаний в стендовых условиях. Проверка адекватности выбора метода проектирования проводится лишь при запуске РН. Поэтому важной задачей является разработка методики расчёта минимальной звукоизоляции на основе физических параметров материала и геометрических параметров конструкции. Расчёт указанных параметров проводился по моделям конструкций, в связи с чем предлагаемый подход был назван модельным. Проведено моделирование методом конечных элементов при упрощении исходной конструкции до аналогичной по жёсткости. Было выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** Ракета-носитель; акустическое воздействие; звукоизоляция; метод конечных элементов

### 1 Введение

Важной задачей при проектировании ракетно-космической техники является задача прогнозирования акустического воздействия на элементы конструкции ракеты-носителя и полезной нагрузки. В работе [1] показан алгоритм замены акустического нагружения на эквивалентное вибрационное нагружение, проведена верификация конечно-элементной модели панели с аппаратурой для. Использовались статистические данные результатов пусков РН и не ставилась задача о прогнозировании звукоизоляции конструкции РН. В работе [2] описано построение математической модели для прогнозирования акустического нагружения конструкции космических аппаратов и РН. Объяснены причины снижения звукоизоляции, но отсутствует анализ влияния конструктивных параметров на величину звукоизоляции. В работе [3] рассматривается применение метода обратной матрицы для вычисления звукоизоляции, а в

работе [4] применение совместного статистического энергетического метода и метода конечных элементов для моделирования испытаний. Рассматривая работы [1-4], можно заключить следующее: для оценки звукоизоляции необходимо проанализировать экспериментальные данные, геометрические и физические характеристики конструкции; для оценки звукоизоляции возможно применение метода конечных элементов. В данной работе рассмотрено применение модельного и конечно-элементного подходов оценки звукоизоляции.

Цель работы: оценить значение звукоизоляции для сборочно-защитного блока (СЗБ) космического модуля (КМ) проанализировать значение звукоизоляции различных вариантов применяемых звукоизоляционных материалов. Для наиболее точной оценки звукоизоляции решено использовать два подхода к определению звукоизоляции конструкции СЗБ КМ.

## 2 Модельный подход

При модельном подходе оценки звукоизоляции СЗБ (КМ) использовался следующий алгоритм, разработанный на основе имеющихся экспериментальных данных.

1. Использовались экспериментальные данные по результатам измерений акустического давления (1/3-октавные уровни) на внешней и на внутренней поверхностях ракетного отсека (использовался межбаковый отсек (МБО) блока III ступени, так как данная конструктивная зона представляет собой подкреплённую силовым набором цилиндрическую обечайку (как и отсеки КМ) с достаточно большой статистикой результатов измерений). Звукоизоляция МБО блока III ступени определялась как разность между полученными внешними и внутренними уровнями акустического давления на соответствующих частотах 1/3-октавного спектра.

2. Звукоизоляционные характеристики отсеков КМ находились по их физическим и геометрическим параметрам, определяющим основной оболочечный резонанс конструкции. В ряде источников [5], [6] отмечается, что минимальные уровни звукоизоляции цилиндрической конструкции попадают в полосу частот соответствующую частоте равной:

$$f_k = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (1)$$

где,  $r$  – радиус цилиндрической оболочки,  
 $E$  – модуль упругости;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Исходя из формулы (1), для цилиндрических оболочек КМ и МБО блока III ступени, выполненных из алюминиевых сплавов, минимальная звукоизоляция реализуется на частотах, попадающих в 1/3-октавные уровни с центральными частотами 400 Гц и 625 Гц соответственно. Предполагалось, что в полосе частот с центральной частотой 400

Гц для цилиндрической части КМ реализуются аналогичные уровни звукоизоляции, что и для МБО на частоте 625 Гц (рисунок 1).



Рисунок 1. Звукоизоляция и резонанс КМ

3. Снижение толщины несущего слоя приведет к снижению звукоизоляции в высокочастотной области (закон «масс») на 0,6 дБ (рисунок 2).



Рисунок 2. Снижение звукоизоляции на 0,6 дБ

4. Геометрия отсека влияет на пространственные резонансы, в частности первый радиальный резонанс приближённо может быть вычислен по формуле:

$$f = \frac{c}{2d}, \quad (2)$$

где,  $c$  – скорость звука в пространстве (в воздухе, под головным обтекателем);

$d$  – диаметр цилиндрической конструкции.

Вычисление по формуле (2) показывает, что, например, при старте РН пространственный резонанс для цилиндрического отсека КМ будет попадать в полосу частот 1/3-октавного спектра с центральной частотой 40 Гц, поэтому в данной полосе будет проявляться минимум в спектре изоляции, который по уровню равен соответствующему

минимуму для МБО блока III ступени РН (рисунок 3).



Рисунок 3. Смещение акустического резонанса

5. Для учёта силового набора при оценке звукоизоляции были использованы соотношения, полученные в [7], на основании которых граничная частота,  $f_k$ , до которой возможно влияние силового набора, вычисляется по формуле:

$$f_{\Gamma} = \frac{c_0^2}{2f_{кр}L^2}, \quad (3)$$

где  $f_{кр}$  – критическая частота пластины, толщина которой равна толщине обшивки:

$$f_{кр} = \frac{c_0^2}{2\pi} \left( \frac{\rho h}{D} \right)^{1/2},$$

$D$  – изгибная (цилиндрическая) жёсткость:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)},$$

где,  $E$  – модуль упругости,  
 $\rho$  – плотность, коэффициент Пуассона,  
 $h$  – толщина оболочки,  
 $c_0$  – скорость звука в воздухе,  
 $L$  – расстояние между рёбрами жёсткости.

Исходя из формулы (3) влияние силового набора на звукоизоляцию для МБО происходит в полосе частот до 140 Гц, для КМ, в силу более частого расположения стрингеров (через 2,5 градуса по окружности), это влияние распространяется до 250 Гц. В силу этого, особое влияние силового набора для КМ будет заметно в полосе частот от 140 Гц до

250 Гц. Поэтому для оценки нерезонансной компоненты звукоизоляции  $R$  в данном диапазоне частот принимался закон упругости [7]:

$$R = 10 \lg \left( 1 + \left( \frac{\pi f_k m}{f \rho_0 c_0} \right)^2 \right), \quad (4)$$

где  $f$  – частота;

$f_k$  – частота кольца (2);

$m$  – поверхностная масса обечайки с учётом распределённой массы стрингеров для опорного отсека (Оп), и без стрингеров для МБО;

$\rho_0 c_0$  – акустическое сопротивление воздуха.

Расчёт по формулам (3), (4) показывает, что звукоизоляция цилиндрической конструкции КМ достигнет величин, представленных на рисунке 4.



Рисунок 4. Увеличение звукоизоляции в полосе частот 140-250 Гц за счёт учёта жёсткости стрингеров

Аналогичным образом была проведена оценка звукоизоляции для полётного случая (рисунок 5).

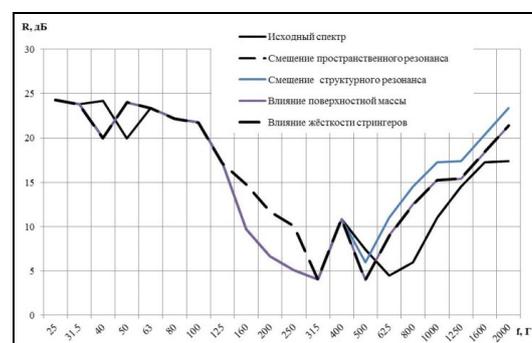


Рисунок 5. Искажение полётного спектра звукоизоляции

Сравнительные значения звукоизоляции при старте и при полёте представлены на рисунке 6.

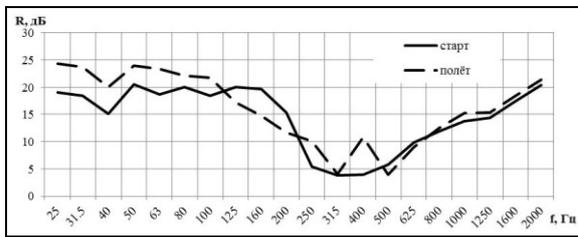


Рисунок 6. Сравнительные значения звукоизоляции при старте и при полёте

### 3 Расчёт методом конечно-элементного моделирования

Расчёт звукоизоляционных характеристик методом конечно-элементного моделирования проводился в программном комплексе ANSYS Mechanical с учётом следующих допущений:

- обшивка и силовой набор, полезная нагрузка, заменены на эквивалентные по жёсткости конструкции;
- использовались только 3D-элементы;
- решалась связанная виброакустическая задача, в которой акустической составляющей являлось воздушное пространство между ГО и ПН;
- на соответствующие поверхности накладывались свойства звукопоглощения в виде зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты [8-10].

Общий вид моделей представлен на рисунке 7.

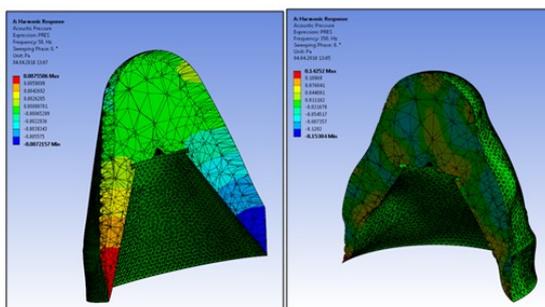


Рисунок 7. Вид в разрезе моделей для конической части ГО для частот 50 и 350 Гц

### 4 Результаты

На рисунке 8 приведены результаты расчёта по минимальной звукоизоляции для всех этапов полёта, получившиеся для модельного метода и метода конечных элементов.

Для каждого расчётного случая были составлены графики уровня акустического давления с учётом минимальной звукоизоляции (рисунки 9, 10).

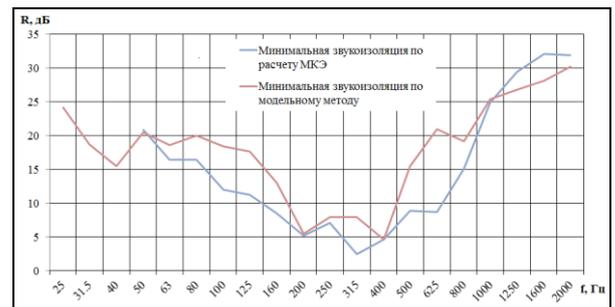


Рисунок 8. Результаты расчётов по обоим методам

Анализ графиков уровней акустического давления и требований разработчика КМ показал, что в частотных полосах 1/3-октавного спектра с центральными частотами 100 Гц - 400 Гц имеются превышения уровня акустического давления без использования звукопоглощающих материалов и уменьшение уровня акустического давления для различных материалов в звукопоглощающей конструкции (рисунки 9, 10).

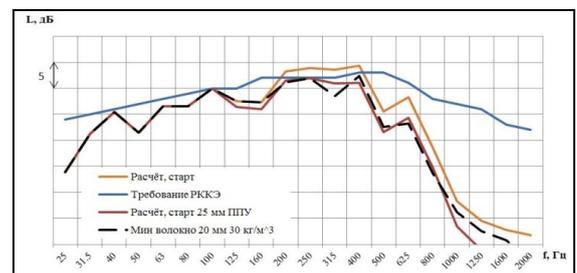


Рисунок 9. Полученные уровни акустического давления под ГО на участках старта

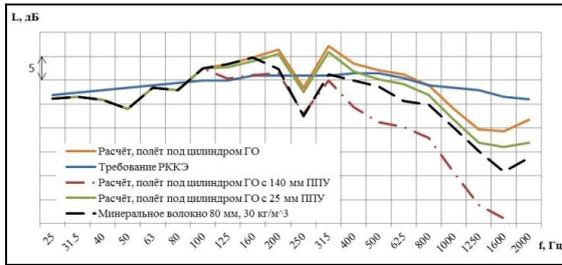


Рисунок 10. Полученные уровни акустического давления под ГО на участках полёта

## 5 Заключение

Проведено исследование звукоизоляции КМ на этапе старта и полёта по модельному и конечно-элементному методу. Проанализированы значения звукоизоляции в зависимости от используемых звукопоглощающих материалов. Для обеспечения наилучшего звукопоглощения необходимо использовать либо материал ППУ толщиной 140 мм, или минеральное волокно толщиной 80 мм.

## 6 Благодарности

Результаты работы получены с использованием средств гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных (номер гранта МД-3082.2017.8).

## Список использованных источников

- [1] Носатенко П.Я. Экспериментальное определение акустических нагрузок при пусках РН «Стрела» и расчётное определение режимов экспериментальной отработки выводимых космических аппаратов / П. Я. Носатенко, А. В. Бобров, М. Л. Баранов, А. Н. Шляпников // Вестник СГАУ. - 2010. - №2. - С. 112-123.
- [2] Попов П.А. Математическая модель исследования нормальных акустических мод отсеков ракеты-носителя / П. А. Попов, А. С. Белов, А. Н. Крючков // Вестник СГАУ. - 2012. - №4. - С. 176-183.
- [3] Попов П. А. Расчёт звукоизоляции многослойной конструкции на основе метода «обратной матрицы» / П. А. Попов, А. А. Синдюков, А. С. Осипов // Вестник СГАУ. - 2014. - №3. - С. 53-60.
- [4] Roibás E. A mode count procedure for mid-frequency analysis of complex vibro-acoustic systems / E. Roibás, M. Chimenó, J. López-Díez, F. Simón // Aerospace Science and Technology. - 2013. - № 29. - С. 165-174.
- [5] Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. - Л.: Судостроение, 1972. - 352 с.
- [6] Мушин А. Г. Авиационная акустика. В 2-ч.: Шум в салонах пассажирских самолётов / А. Г. Мушин. - М.: Машиностроение, 1986. - Ч. 2. - 264 с.
- [7] Экспериментальное определение звукоизоляции межбакового отсека блока III ступени РН "Союз" // НТО, инв.№5535, ЦАГИ, 1999. - 38 с.
- [8] Боголепов И. И. Промышленная звукоизоляция / И. И. Боголепов - Л.: Судостроение, 1986. - 367 с.
- [9] Зверев А. Я. Определение сравнительной эффективности звукопоглощающих материалов в лабораторных условиях и на самолёте / А. Я. Зверев. - М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2017. - С. 209-210.
- [10] Определение виброакустических характеристик фрагментов конструкции головного обтекателя РН "Союз" // НТО, №5527, ЦАГИ, 1999. - 34 с.

**MODEL AND FINITE ELEMENT METHODS FOR STUDING INSULATING LINING OF SPACE MODULE COMPARTMENTS**

**Pavel A. Popov,  
Aleksandr V. Kuznetsov,  
Aleksandr A. Igolkin,  
Vilsur M. Murtazin**

Samara University  
34, Moskovskoe shosse, Samara,  
443086, Russian Federation  
al.vl.kuznetsov@mail.ru

*At design of the space-rocket equipment the prediction problem of acoustic action on elements of the launch vehicle design and payload. The sources of such impact are the engines operating at the start and the incoming air flow acting on the launch vehicle at the start and on the active part of the flight in the earth's atmosphere. However, the solution of the problem, complications of the impossibility of testing in bench conditions. Check the adequacy of the selection process only when the launch vehicle. Therefore, it is important to develop a methodology for calculating the minimum sound insulation based on the physical parameters of the material and the geometric parameters of the structures. The calculation of these parameters was carried out on models of structures, in connection with which the proposed approach was called model. The simulation is carried out by the finite element method while simplifying the initial structure to a similar rigidity. The results were compared with experimental data.*

**Key words:** *Nose block launch vehicle; insulating lining; acoustic action; finite-element method*

**References**

- [1] Nosatenko, P.Ya., Bobrov, A.V., Baranov, M.L., Shlyapnikov, A.N. (2010), “Eksperimental'noe opredelenie akusticheskikh nagruzok pri puskah RN “Strela” i raschyotnoe opredelenie rezhimov ehksperimental'noj otrabotki vyvodimyykh kosmicheskikh apparatov” [Experimental determination of acoustic loads daunches of strela LV and calculation of test modes for a spacecraft to be delivered by it to space], *Vestnik SGAU*, no. 2, pp. 112-123.
- [2] Popov, P.A., Belov A.S., Kryuchkov, A.N. (2012), “Matematicheskaya model' issledovaniya normal'nykh akusticheskikh mod otsekov rakety-nositelya” [Mathematical model of investigating normal acoustic modes of launch vehicle modules], *Vestnik SGAU*, no. 4, pp. 176-183.
- [3] Popov, P.A., Sindyukov, A.A., Osipov, A.S. (2014), “Raschyot zvukoizolyacii mnogoslojnoj konstrukcii na osnove metoda “obratnoj matricy” [Calculating sound insulation of a sandwich structure on the basis of the “inverse matrix” method], *Vestnik SGAU*, no. 3, pp. 53-60.
- [4] Roibás, E., Chimenó, M., López-Díez, J., Simón, F. (2013), “A mode count procedure for mid-frequency analysis of complex vibro-acoustic systems”, *Aerospace Science and Technology*, no. 29, pp. 165-174.
- [5] Shenderov, E.L. (1972), *Volnovye zadachi gidroakustiki* [Wave problems of hydroacoustics], Sudostroyeniye, Leningrad, Russia, 352 p.
- [6] Munin, A.G. (1986), “Aviatsionnaya akustika. Shum v salonakh passazhirskikh samoletov” [Aircraft Acoustics. Noise in passenger airliners], *Mashinostroyeniye*, Moscow, Russia, vol. 2, 264 p.
- [7] “Eksperimental'noye opredeleniye zvukoizolyatsii mezhbakovogo otseka bloka III stupeni RN “Soyuz” [Experimental determination of insulating lining of the inter-tank compartment of the III stage of the Soyuz LV], NTO, Scientific and Technical Report, Inventory no. 5535, TsAGI, 1999, 38 p.
- [8] Bogolepov, I.I. (1986), “Promishlennaya zvukoizolyatsiya” [Industrial sound insulation], Sudostroyeniye, Leningrad, Russia, 367 p.
- [9] Zverev, A.Ya. (2017), “Opredeleniye sravnitel'noy effektivnosti zvukopogloshchayushchikh materialov v laboratornykh usloviyakh i na samolote” [Determination of the comparative effectiveness of sound-absorbing materials in laboratory conditions and on an airplane], TsAGI, Moscow, Russia, pp. 209-210.
- [10] “Opredeleniye vibroakusticheskikh kharakteristik fragmentov konstruktsii golovnogo obtekatelya RN “Soyuz” [Determination of vibroacoustic characteristics of fragments of nose block launch vehicle design of the Soyuz LV], NTO, Scientific and Technical Report, Inventory no. 5527, TsAGI, 1999, 34 p.