

УДК 534.83

## ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ РОСТЕ ИХ АКУСТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2024 г. П. А. Попов<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», Земеца ул. 18, Самара, 443009 Россия

<sup>b</sup>Самарский университет, Московское шоссе 34, Самара, 443086 Россия

\*e-mail: banduir@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.02.2024 г.

После доработки 31.07.2024 г.

Принята к публикации 05.09.2024 г.

Представлены результаты анализа экспериментальных данных, позволяющие выявить поведение параметров колебания конструкции при изменении амплитуды акустического давления с помощью введенного в рассмотрение понятия проводимости акустической вибрации. Подтверждается нелинейное поведение вибрационного отклика конструкции разных отсеков ракеты и сегмента панели при нагружении их полем акустического давления. Обнаружены общие закономерности нелинейности, в частности, показано, что проводимость имеет тенденцию к понижению при росте акустической нагрузки, близкую в основном к степенной функции.

*Ключевые слова:* панели и отсеки ракет, акустическое поле, проводимость акустической вибрации, акустическое давление, нелинейность

**DOI:** 10.31857/S0320791924050088, **EDN:** XBHMFP

### ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом проектирования летательных аппаратов является проведение расчетно-экспериментальных работ по оценке акустической вибрации конструкции. При этом имеет значение фактор изменения спектра вибрационного отклика на изменение акустической нагрузки. Это обстоятельство приобретает особенную значимость в тех случаях, когда параметры внешнего акустического нагружения столь высоки, что решение задачи в рамках линейной постановки приводит к недопустимым погрешностям с завышенными значениями прогнозируемого вибрационного нагружения. Примером могут служить высокоинтенсивные аэроакустические воздействия современных боевых самолетов, при котором амплитудные уровни нагрузок достигают 173 дБ [1], стартовые и выведенческие случаи нагружения внешней части конструкции сборочно-защитных блоков ракет-носителей и их отсеков, при которых суммарные среднеквадратические уровни акустического давления могут достигать величины свыше 150 дБ и 160 дБ соответственно [2]. Анализ открытых источников показал, что оценки вибрации конструкций летательных аппаратов на широкополосные

случайные акустические воздействия проводились в рамках работ [3, 4], где была представлена связанная упруго-акустическая модель колебания оболочки в акустической среде, в которой учитывалось взаимодействие упругих мод оболочки как с внешним полем нагрузки, так и с акустическими модами воздушного объема внутри отсека с учетом степени согласованности внешнего акустического поля с упругими формами колебания. Был предложен вероятностный подход для оценки акустического излучения пластин, возбуждаемых пристеночными турбулентными пульсациями давления. В работе [5] приводятся результаты исследования взаимодействия волн Лэмба с неоднородностями в пластинах из композитного материала. В статье [6] были исследованы параметры упругих шаров из стали, стекла и нейлона при рассеянии на них акустического пучка. В инструкциях [7-10] представлены конечно-элементные математические модели, позволяющие решать широкий класс виброакустических задач с учетом оценки эффективных масс различных элементов конструкции, характеристик звукопоглощения, импедансных (или адмитансных) свойств материалов с учетом их частотных свойств. Однако, представленные модели не

позволяли проводить оценку колебания оболочек, учитывающих их нелинейное поведение при повышении акустического нагружения. В статье [11] были исследованы продольные волны деформации в физически нелинейных соосных цилиндрических упругих оболочках, содержащих вязкую несжимаемую жидкость как между ними, так и внутри. В тоже время, как показывают результаты испытаний ракет-носителей (РН), на сухих цилиндрических отсеках наблюдается также существенная нелинейность и между параметрами акустических нагрузок и *радиальным* виброускорением, по-видимому, данная нелинейность обусловлена присоединением к полю волн акустического давления пульсационной псевдоакустической составляющей, не вызывающей столь сильного радиального виброотклика по сравнению с акустической компонентой. В данной работе сделана попытка решения задачи по оценке нелинейности между параметрами акустического давления и радиального виброускорения при помощи введения понятия проводимости акустической вибрации (ПАВ), оцениваемой по формуле:

$$N = \frac{a}{p_1 - p_2}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  — изменяющиеся со временем спектры нормального к поверхности виброускорения, внешнего (падающего, отраженного и излученного) и внутреннего акустического давления.

В работе [12] рассматривались вопросы многомодового колебания пластины, однако величина акустического импеданса, по существу обратного величине (1), предполагалась инвариантной с точки зрения изменения акустического нагружения. В тоже время эксперименты при проведенных летных испытаниях ракет показали следующую зависимость:

$$N = Ap_1^\alpha, \quad (2)$$

здесь  $A$  и  $\alpha$  — случайные экспериментальные параметры степенной функции, которые можно оценить при помощи метода наименьших квадратов (МНК).

В результате проведенного научного анализа можно сделать вывод, что в настоящее время оценка динамики силовых панелей и отсеков ракет в лабораторных условиях и при натурных испытаниях должна быть уточнена с точки зрения качественного изменения параметров вибрации конструкции при воздействии на них высокоинтенсивного акустического нагружения, с учетом изменяемости характеристик вида (1).

Предлагаемый в рамках данной статьи анализ основан на определении характеристик виброакустики с помощью МНК. Были получены линии степенного тренда, которые позволяют судить о характере нелинейности задачи; с помощью введения

эквивалентных жесткостных параметров выяснены условия роста и падения величины проводимости акустической вибрации в зависимости от частоты. Сделан вывод о тенденции ПАВ к понижению при повышении значений акустического давления  $p_1$ .

### ОБЪЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальные исследования проводились при пяти пусках РН. Измерения вибрационных ускорений и акустического давления при пусках осуществлялись с использованием данных телеметрической системы измерения (СИ), установленной на РН и обеспечивающей контроль вибрационного и акустического нагружения ее ступеней.

Вибрационные датчики устанавливались на шпангоуте отсека О1, на кронштейнах отсеков О2, О3, О4, О5. Акустические датчики устанавливались в соответствующих зонах на корпусах сухих отсеков РН. Конструкции О4 и О5 — являлись стрингерными обшивками, О1, О2, О3 — гладкими.

Для анализа результатов экспериментов были выбраны параметры гладких оболочек, эквивалентных по жесткости стрингерным обшивкам. При этом использовалось следующее правило для проведения расчетов эквивалентной цилиндрической  $D_e$  и мембранной жесткости  $B_e$  [13]. С одной стороны  $D_e$  ( $B_e$ ) является суммой удельной изгибной (удельной продольной) жесткости силового элемента и цилиндрической (мембранной) жесткости обечайки без силовых элементов:

$$D_e = \frac{E_1 J}{l} + \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (3)$$

$$B_e = \frac{E_1 F}{l} + \frac{E_2 h}{1 - \nu^2},$$

где  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $\nu$  — 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.

С другой стороны, их можно представить в виде цилиндрической и мембранной жесткости в эквивалентных параметрах:

$$D_e = \frac{E_e h_e^3}{12(1 - \nu_e^2)}, \quad (4)$$

$$B_e = \frac{E_e h_e}{1 - \nu_e^2},$$

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

$$\nu = \nu_e.$$

Из (4) с учетом (3) получим следующие соотношения для эквивалентной толщины  $h_e$ , модуля упругости  $E_e$  и плотности  $\rho_e$ :

$$\begin{aligned} h_e &= \sqrt{12 \frac{D_e}{B_e}}, \\ E_e &= \frac{B_e(1 - \nu^2)}{h_e}, \\ \rho_e &= \frac{M}{Sh_e}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $M$  — масса обечайки,  $S$  — площадь ее поверхности.

Конструкции О1, О2, О3 были выполнены из алюминиевых сплавов, при анализе считались гладкими (без силового набора). Используемые при анализе характеристики гладких и стрингерных конструкций отсеков, вычисленных по формулам (5), приведены в табл. 1.

В табл. 1 также представлены частоты кольца обечайки без стрингеров и критические частоты волнового совпадения с учетом стрингеров, на которых предположительно возникают скачки ПАВ, соответственно вычисленные по формулам [12, 14, 15]:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s(1 - \nu^2)}}, \\ f_2 &= \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_e}{D_e}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $r$ ,  $\nu$ ,  $c_0$  — радиус, коэффициент Пуассона, скорость звука в воздухе,  $E_s$ ,  $\rho_s$ ,  $m_s$  — модуль Юнга, плотность, поверхностная масса отсеков без стрингеров или гладких отсеков,  $m_e$  — поверхностная масса стрингерной обечайки.

Из табл. 1 видно, что исследуемые стрингерные отсеки имеют достаточно высокую поверхностную

массу за счет вклада силового набора, тогда как поверхностные массы обшивок составляют 25%, 28%.

### ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ. ТРЕНДЫ ПРОВОДИМОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ

Телеметрическая информация по быстроменяющимся параметрам (БМП) принималась и регистрировалась приемными станциями космодрома. Информация по БМП передавалась в виде массивов. Каждый передаваемый массив содержал 512 последовательных измерений одного датчика БМП. Обработка телеметрической информации (ТМИ) по быстроменяющимся параметрам вибрационного ускорения и акустического давления проведена в два этапа. На первом этапе исходная оцифрованная ТМИ («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 осредненные характеристики всех физических величин в рамках данных диапазонов через 1 Гц. Например, для осредненного значения акустического давления через 1 Гц можно написать:

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

где  $p_{1/3}$  — суммарное акустическое давление в рамках 1/3-октавного диапазона с шириной  $\Delta_{1/3}$  Гц.

Исходя из полученных результатов, для построения линий тренда, выражающих нелинейность

**Таблица 1.** Характеристики обшивки испытуемых образцов.

Параметры образца	О1	О2	О3	О4	О5	
					Продольное направление	Меридиональное направление
$m_s$ , кг/м <sup>2</sup>	14.1	9.2	9.5	3.705	2.78	
$m_e$ , кг/м <sup>2</sup>	—	—	—	15.0	10.0	
$E_e$ , Па	—	—	—	$5.0 \times 10^9$	$7.5 \times 10^9$	$5.3 \times 10^9$
$h_e$ , мм	—	—	—	46.7	28.7	21.9
$D_e$ , Н м	$9.8 \times 10^2$	$2.8 \times 10^2$	$3.0 \times 10^2$	$4.7 \times 10^4$	$1.6 \times 10^4$	$5.2 \times 10^3$
$B_e$ , Н/м	$4.1 \times 10^8$	$2.7 \times 10^8$	$2.8 \times 10^8$	$2.6 \times 10^8$	$2.4 \times 10^8$	$1.3 \times 10^8$
$f_1$ , Гц	649	842	842	696	829	
$f_2$ , Гц	2243.3	3326.3	3421.3	334.6	461.1	818.1

ПАВ, выражение (2) было прологарифмировано и приведено к линейной форме:

$$R = \alpha L + \bar{A}, \quad (7)$$

где  $R = \lg N$ ,  $L = \lg p_1$ ,  $\bar{A} = \lg A$ ,

$$\alpha = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j l_j - (\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j)(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j)}{(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j^2) - (\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j)^2},$$

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j - \alpha \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j,$$

где  $r_j$  — временная реализация изменения логарифма от ПАВ;  $l_j$  — временная реализация логарифма внешнего акустического давления,  $n$  — количество реализаций.

После нахождения уравнения тренда (7) производилась процедура его потенцирования для получения уравнения вида (2).

Осредненные в рамках 1/3-октавных диапазонов характеристики ПАВ по пяти пускам, вычисляемой по формуле (1) с соответствующими линиями тренда, показаны на рис. 1–5.

Изображенные на рис. 1–4 величины ПАВ убывают с ростом акустической нагрузки. В тоже время при изменении частоты от меньшей к большей

они в основном возрастают до определенного предела, при этом толстыми сплошными линиями представлены предельные их значения. На высших частотах (здесь не показаны) наблюдается снижение этой величины, это говорит о реализации максимальной энергии колебаний при прохождении через кольцевую оболочечную частоту (6), являющуюся асимптотической точкой сгущения собственных частот замкнутой круговой оболочки [14]. Например, для шпангоута О1, неподкрепленного стрингерами, максимум ПАВ имеется в полосе частот с центральными частотами 625–800 Гц (расчетная кольцевая частота 649 Гц), для эквивалентной гладкой оболочечной стрингерного О4 с параметрами, представленными в табл. 1 и вычисленными по формулам (5), имеется, как это показано на рис. 2б, некоторый рост величины

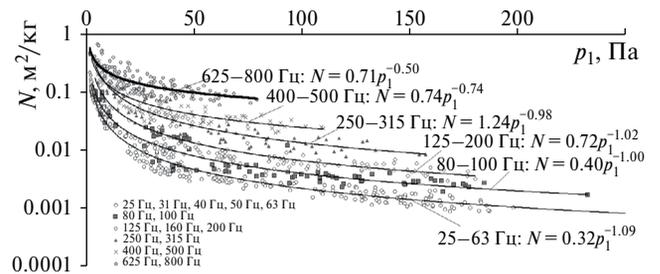


Рис. 1. Тенденция ПАВ в различных частотных диапазонах и соответствующие тренды для О1.

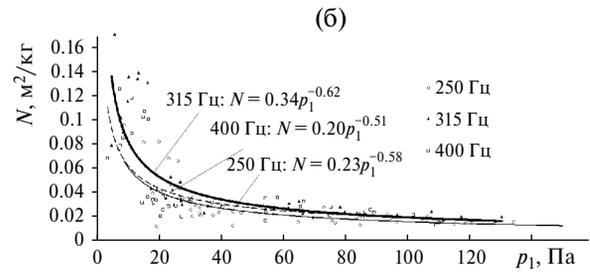
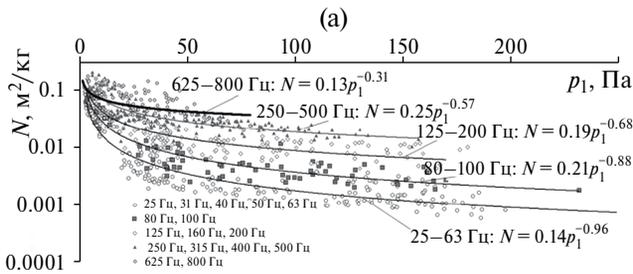


Рис. 2. Тенденция ПАВ в различных частотных диапазонах и соответствующие тренды для О4: (а) — тенденция для полосы частот от 25 до 800 Гц; (б) — в диапазонах с центральными частотами 250, 315, 400 Гц.

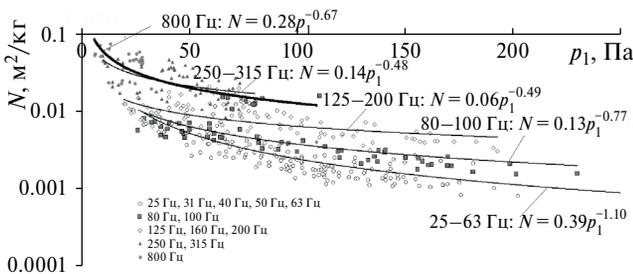


Рис. 3. Тенденция ПАВ в различных частотных диапазонах и соответствующие тренды для О3.

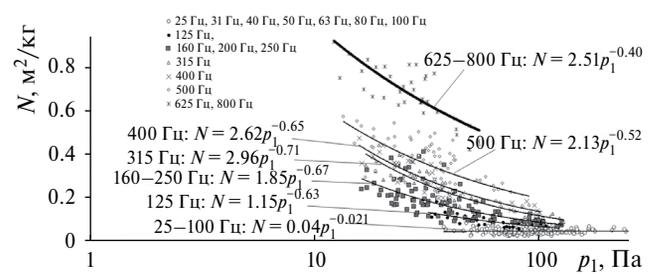
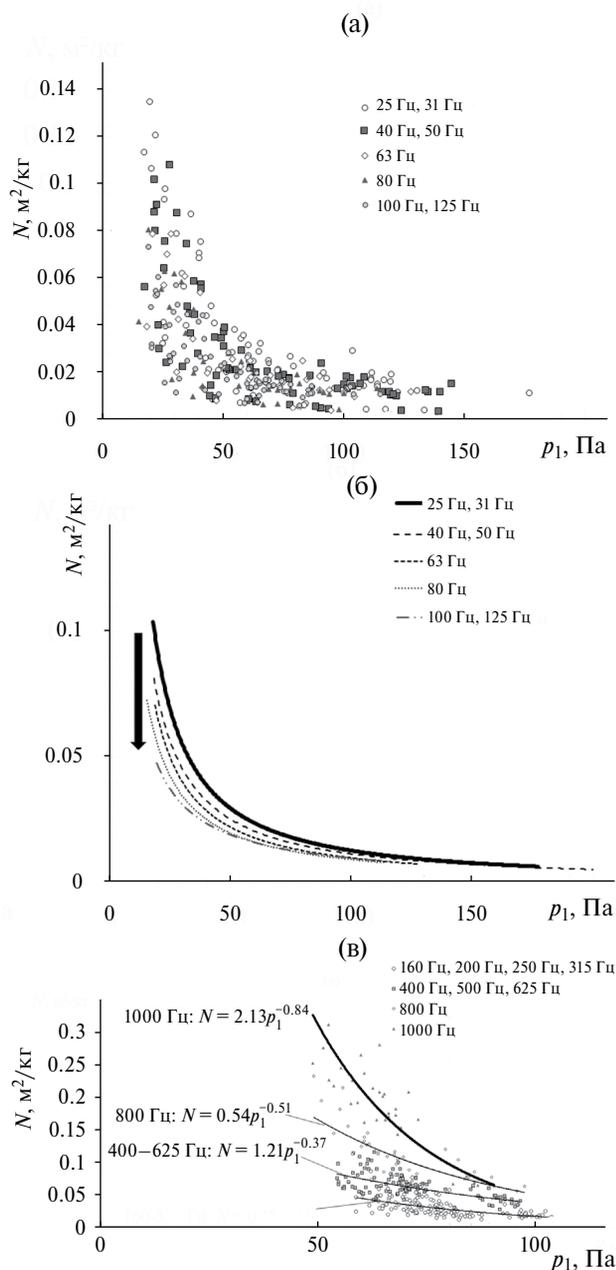
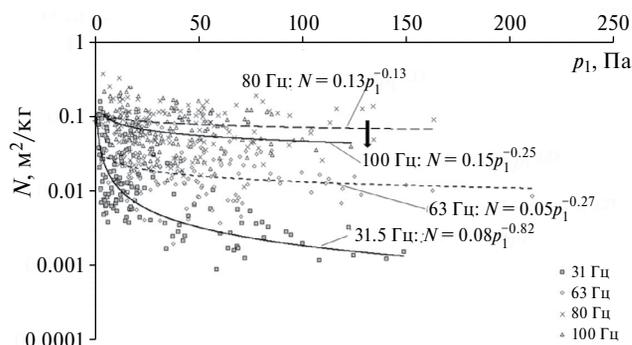


Рис. 4. Тенденция ПАВ в различных частотных диапазонах и соответствующие тренды для О5.



**Рис. 5.** Тенденция ПАВ в различных частотных диапазонах и соответствующие тренды для О2: (а) — ПАВ в диапазонах частот от 25 до 125 Гц, (б) — тренды для соответствующих частот, (в) — ПАВ в диапазонах частот от 160 до 1000 Гц.

ПАВ в полосе 315 Гц вследствие эффекта волнового совпадения на расчетной частоте 334.6 Гц [14, 15]; максимум в полосе 625 Гц и 800 Гц обусловлен податливостью конструкции О4 на кольцевой частоте, расчетная величина которой для этого отсека равна 696 Гц. Для неподкрепленных стрингеров О3 и подкрепленного О5 вследствие уменьшения их диаметров по сравнению с отсеками О1 и О4 частота кольца смещается в высокочастотную область



**Рис. 6.** Оценка ПАВ при испытаниях конструкции сегмента сборочно-защитного блока в акустической камере.

и составляет 842 и 829 Гц соответственно, поэтому максимальные значения ПАВ для них попадают в диапазон с центральной частотой 800 Гц. Вместе с тем для О5 имеет место повышенная податливость в полосе частот 500 Гц, объясняемая критической частотой волнового совпадения на частоте 461.1 Гц. На рис. 5 представлены параметры ПАВ для О2.

На рис. 5а представлено изменение величин ПАВ для О2, отличающихся от прежних вариантов тем, что для данного отсека характерно снижение величины ПАВ в диапазоне от 25 до 125 Гц, это подтверждается поведением соответствующих трендов, представленных на рис. 5б. Далее, как это показано на рис. 5в, наблюдается рост этой величины до частоты 1000 Гц, объясняющийся прохождением через частоту кольца, далее наблюдался спад ПАВ.

Представленные рисунки в целом свидетельствуют об общих закономерностях изменения ПАВ для «гладких» и стрингерных отсеков, выражающей меру податливости конструкций на акустические воздействия. Подобное физическое явление также наблюдалось, в том числе, при проведении экспериментальных работ по определению звукоизоляции сегментов конструкции сборочно-защитного блока, описанному в статье [16]. Некоторые результаты этих испытаний в части оценки величины ПАВ представлены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что, как и при натурных испытаниях, особенно на низких частотах, наблюдалась тенденция ПАВ к понижению при росте внешнего акустического нагружения по степенному закону, что подтверждает объективность изучаемого явления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы:

1) Получены параметры проводимости акустической вибрации конструкций отсеков РН,

замечена тенденция этой величины к снижению при росте акустического нагружения. Возможно, это объясняется добавлением к звуковому давлению, действующему на акустические микрофоны, псевдозвуковых пульсаций, которые не сказываются на вибрации.

2) Установлено, что максимальная ПАВ достигается в резонансной области частоты кольца или на критической частоте волнового совпадения оболочки и снижается при удалении от резонансных частот.

3) Показано, что максимальная ПАВ для конкретной частоты соответствует минимальной величине внешней акустической нагрузки, при этом она стремится к уменьшению при росте внешнего нагружения в соответствии со степенной функцией.

4) Показано, что ПАВ стремится к постоянной величине при удалении от резонансной частоты и при увеличении внешнего акустического нагружения.

Дальнейшие исследования будут направлены на решение вопросов оценки вероятностных параметров величины проводимости акустической вибрации, ее использования в математических моделях оценки вибронгружения и звукоизоляции конструкции.

Результаты исследования получены при финансовой поддержке Российской Федерацией в лице Минобрнауки России (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития, соглашение №075-15-2024-558).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдрашитов Р.Г., Иванушкин Е.А., Логинов Г.М., Попов О.Ю., Шарунов А.В.* Расчетно-экспериментальные исследования звукоизоляции подвесных контейнеров // Тезисы докладов пятой открытой Всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике (25–29 сентября 2017 г.). С. 213–215.
2. *Карачун В.В., Мельник В.Н.* Основные причины шума ракет-носителей // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 9 (45). С. 7.
3. *Ефимцов Б.М.* Применение энергетического статистического метода для оценки акустического излучения пластин при псевдозвуковом нагружении // *Труды ЦАГИ*. 1978. Вып. 1902. С. 3–8.
4. *Ефимцов Б.М.* Критерий подобия спектров пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя // *Акуст. журн.* 1984. Т. 30. № 1. С. 58–61.
5. *Муякшин С.И., Диденкулов И.Н., Вьюгин П.Н., Чернов В.В., Денисов Д.М.* Исследование метода обнаружения и локализации неоднородностей в пластинах с использованием волн Лэмба // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 3. С. 270–274.
6. *Котельникова Л.М., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А.* Определение упругих свойств твердотельного шара по результатам рассеяния на нем акустического пучка // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 3. С. 371–386.
7. *Ansys. User's Guide. Introduction to Acoustics / Lectures 1–7.* 2016. 415 p.
8. *Actran 19. User's Guide. Installation, Operations, Theory and Utilities / Vol. 1.* 2018. 862 p.
9. *Actran 19. User's Guide. Extended DAT (EDAT) Input File Syntax / Vol. 2.* 2018. 756 p.
10. [http://storage.ansys.com/doclinks/ansys.html?code=Acoustic\\_DiffuseSoundField-ALU-K2a](http://storage.ansys.com/doclinks/ansys.html?code=Acoustic_DiffuseSoundField-ALU-K2a)
11. *Могилевич Л.И., Блинков Ю.А., Иванов С.В.* Волны деформации в нелинейных соосных оболочках, заполненных вязкой несжимаемой жидкостью // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 5. С. 467–474.
12. *Боголепов И.И.* Промышленная звукоизоляция. Л.: Судостроение, 1986. 367 с.
13. *Биргер И.А., Пановко Я.Г.* Прочность, устойчивость, колебания. Т. 2. Справочник в трех томах. М.: Машиностроение, 1968. С. 148.
14. *Мунин А.Г.* Авиационная акустика. В 2-х частях. Ч. 2. Шум в салонах пассажирских самолетов. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
15. *Иванов Н.И.* Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М.: Университетская книга, Логос, 2008. 424 с.
16. *Попов П.А., Иголкин А.А., Шахматов Е.В.* Оценка изменения звукоизоляционных характеристик силовых панелей при их высокоинтенсивном акустическом нагружении // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 2. С. 68–79.

## **Tendency of Conductivity of Acoustic Vibration of the Design of Aircraft to Lowering with the Growth of Their Acoustic Loading**

**P. A. Popov<sup>a,b,\*</sup>**

<sup>a</sup> *JSC Space-rocket Center Progress, Zemets St. 18, Samara, 443009 Russia*

<sup>b</sup> *Samara University, Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russia*

\* *e-mail: banduir@rambler.ru*

In work the results of the analysis of experimental datas allowing to reveal behavior of parameters of fluctuation of the design at change of amplitude of acoustic pressure with the concept of conductivity of acoustic vibration entered into consideration are provided. The nonlinear behavior of the vibration response of the design of different compartments of the rocket and segments of panels when loading by their field of acoustic pressure is confirmed. The general patterns of nonlinearity are found, in the particular it is shown that conductivity tends to lowering with the growth of acoustic loading close generally to the power function.

*Keywords:* panels and compartments of rockets, acoustic field, conductivity of acoustic vibration, acoustic pressure, nonlinearity