

Исследование потенциала применимости сэндвич-панелей для пассивного демпфирования колебаний в конструкции космических аппаратов

© К.Н. Миланко, Н.А. Пласкеев, А. Туфан, В.Ю. Ермаков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

Рассмотрено применение сэндвич-панелей на основе пеноалюминия и уплотнителей, изготовленных из вакуумной резины, в различных конфигурациях (без дополнительного демпфирующего устройства, с демпфирующим кронштейном и с демпфирующими стойками) для снижения влияния динамических нагрузок на конструкции космических аппаратов. Экспериментально проведены математические исследования по определению амплитудно-частотной характеристики приборного отсека космического аппарата типа «Искра-5» при использовании предложенной системы демпфирования в разных температурных режимах. На основе полученных данных выбраны рациональные проектно-конструкторские решения для предложенной системы демпфирования, которые также зависят от направления воздействия динамических нагрузок.

Ключевые слова: пассивное демпфирование, сэндвич-панель из пеноалюминия, многослойная конструкция космического аппарата, динамические нагрузки, вакуумная резина

Введение. В процессе эксплуатации объектов ракетно-космической техники, включая ракеты-носители, разгонные блоки и космические аппараты (КА), возникают технические проблемы, связанные со статическими (силовыми, тепловыми и др.) и динамическими (вибрационно-акустическими, ударными и др.) нагрузками. Динамические нагрузки возникают из-за вибрационных возмущений при относительном движении подвижных масс приводных устройств, таких как вентиляторы систем терморегулирования, приводы ориентации панелей солнечных батарей и антенных устройств, исполнительные органы систем ориентации и стабилизации, которые преимущественно работают в диапазоне частот от 20,0 до 90,0 с⁻¹. Такие нагрузки оказывают существенное влияние на пространственную устойчивость и управляемость этих объектов, а также на качество выполнения технологических операций на борту [1].

В связи с этим эффективное снижение воздействия вибрационных возмущений на борту КА является актуальной научной задачей, которую можно решить, используя как пассивные, так и активные системы демпфирования. Напряжения и деформации, вызванные смещениями из-за динамических нагрузок, могут быть уменьшены с помощью механического демпфирования, основанного на пассивных

и активных методах. Физический эффект пассивных систем демпфирования основан на рассеянии энергии механических колебаний в результате применения материалов с высокой степенью демпфирования, таких как сплавы с памятью формы, полимерно-композиционные, магнитореологические, электрореологические и др. Активные системы демпфирования содержат усилительные и исполнительные устройства (электромеханические, электромагнитные, пьезоэлектрические и др.), имеющие собственные источники электроэнергии для создания управляющего воздействия [2].

Сэндвич-панели являются одним из основных элементов пассивного демпфирования колебаний конструкции КА. Их многослойная структура позволяет эффективно решать несколько задач одновременно: обеспечивать звукоизоляцию, защищать от тепловых и ударных нагрузок, гасить при этом колебания конструкции. Благодаря уникальным характеристикам, сэндвич-панели успешно воспринимают и распределяют динамические нагрузки, действующие на элементы подконструкции КА, что является рациональным решением для виброизоляции [3].

Цель работы — проведение экспериментально-математических исследований по снижению воздействия динамических нагрузок на приборный отсек КА типа «Искра-5» с использованием сэндвич-панелей в различных конфигурациях: без дополнительного демпфирующего устройства, с демпфирующим кронштейном и с демпфирующими стойками.

Постановка задачи и метод исследования. Конструкции КА с малой жесткостью, такие как панели солнечных батарей, антенные устройства, приборные отсеки и др., подвергаются воздействию динамических нагрузок. Для снижения этих нагрузок предлагается использовать демпфирующее устройство в виде сэндвич-панелей из пеноалюминия с вакуумным резиновым уплотнителем, которое является основным объектом исследования.

Выбор пеноалюминия в качестве наполнителя для сэндвич-панелей объясняется тем, что он обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с сотовой алюминиевой конструкцией. К основным преимуществам пеноалюминия относятся: высокая вибростойкость и удельная жесткость; простота обработки специальным оборудованием и профессиональным ручным инструментом; хорошая изотропность свойств материала; меньшая дискретность и упрощенная технология производства; способность значительно увеличивать коэффициент демпфирования при вынужденных колебаниях; низкая стоимость [4].

Основные свойства демпфирующих материалов, которые могут быть использованы [5], представлены в таблице.

Основные свойства демпфирующих материалов

Характеристика	Марка материала			
	14P-23	9024	51-2062	ИРП-2044
Номинальная прочность при растяжении, Н/м ²	2,15·10 ⁶	9,8·10 ⁶	1,67·10 ⁷	7,8·10 ⁶
Способность материала разрываться при удлинении, %	125	340	530	305
Удлинение после разрыва, %	1	16	15	11
Диапазон рабочих температур, град	-75...205	-45...105	-50...80	0...155

В результате анализа данных таблицы было установлено, что в качестве демпфирующего материала наиболее рационально использовать вакуумную резину марки 14P-23, поскольку ее остаточное удлинение после разрыва ниже при относительно высокой термостойкости по сравнению с другими марками. Это связано с сохранением физико-механических свойств материала после продолжительного воздействия динамических нагрузок, что является основным требованием для обеспечения заданной вибрационной обстановки на борту КА с длительным сроком активного существования.

Система демпфирования, представленная на рис. 1, состоит из следующих основных элементов: обечайки базовой конструкции, обернутой углепластиком и армированной углеродным волокном [6]; двух панелей на основе пеноалюминия и двух уплотнителей, изготовленных из вакуумной резины марки 14P-23 [4].

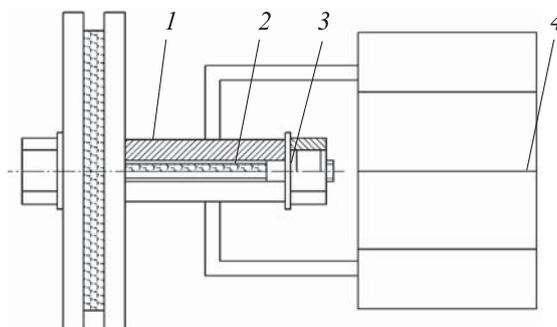


Рис. 1. Принципиальная схема демпфирующего устройства:

1 — обечайка базовой конструкции; 2 — пеноалюминий; 3 — демпфирующий материал (вакуумная резина марки 14P-23); 4 — приборный отсек космического аппарата «Искра-5»

Принцип работы предлагаемой системы демпфирования основан на комбинированном действии различных механизмов гашения колебаний. Пеноалюминиевые панели, обладающие высокой демпфирующей способностью благодаря их пористой структуре, при деформации создают внутреннее трение между твердыми частицами алюминия [7].

Это способствует рациональному распределению колебательной энергии и обеспечивает прочные связи между элементами подконструкции КА, подверженными вибрациям. Уплотнители из вакуумной резины выполняют двойную функцию: не только дополнительно гасят колебания за счет своих упругих свойств, но и регулируют процесс передачи колебательной энергии в пеноалюминиевые панели, что способствует эффективному виброгашению.

Демпфирующие характеристики конструкции на основе пеноалюминия можно рассчитать с помощью таких соотношений, как удельная энергия поглощения удара S (Дж/кг) и эффективная энергия поглощения удара Q (Дж) [8–10]:

$$S = \int_0^{\delta_{\max}} \theta d\delta; \quad Q = \int_0^{\delta_{\max}} \frac{\theta}{\theta_{\max} \delta_{\max}} d\delta, \quad (1)$$

где θ — напряжение, Н/м²; δ — деформация, м; θ_{\max} — максимальное напряжение на промежутке $[0; \delta_{\max}]$, Н/м², δ_{\max} — максимальная деформация, м.

При этом коэффициент полноты поглощения удара конструкции на основе пеноалюминия можно рассчитать по формуле [11–13]

$$K = \int_0^{Y_{\max}} \frac{N}{N_{\max} Y_{\max}} dY, \quad (2)$$

где N_{\max} — максимальная сила, Н; Y_{\max} — максимальное перемещение, м.

Для проведения экспериментально-математических исследований был создан испытательный стенд (рис. 2). Базовая конструкция (пластина), выполненная из стали марки 01Ю5Т для имитации низкочастотных горизонтальных колебаний, с одного конца была закреплена жесткой заделкой параллельно плоскости испытательного стенда, с другого — удерживалась грузом массой 0,2 кг. Для измерения использовались пьезоэлектрические акселерометры типа 3030В4 [14, 15].



Рис. 2. Базовая конструкция на испытательном стенде

Анализ результатов экспериментального моделирования показал, что исследуемый образец обладал логарифмическим декрементом затухания колебаний, равным 0,07, в низкочастотной области. Данная характеристика не представляет интереса для виброизоляции конструкции приборного отсека КА типа «Искра-5».

Было также проведено экспериментально-математическое моделирование базовой конструкции по трем взаимно-перпендикулярным осям X , Y , Z в диапазоне температур 4,0...32,0 °С при различных конфигурациях: без демпфирующего устройства; с демпфирующим кронштейном (рис. 3); с демпфирующими стойками (рис. 4). Выбор указанного диапазона температур обусловлен тем, что он отражает наиболее критические условия функционирования прецизионных приборов и аппаратуры КА [16].

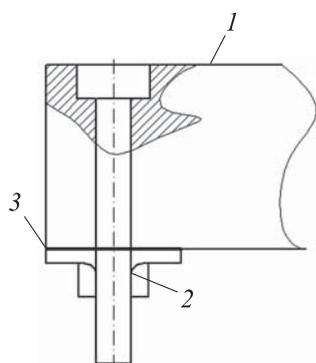


Рис. 3. Демпфирующий кронштейн:
1 — сэндвич-панель; 2 — панельный кронштейн; 3 — демпфирующий материал (вакуумная резина марки 14Р-23)

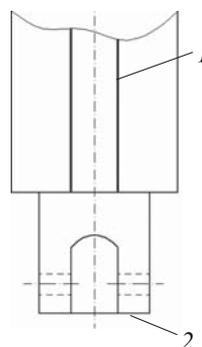


Рис. 4. Демпфирующая стойка:
1 — демпфирующий материал (вакуумная резина марки 14Р-23); 2 — стойка

Проведены испытания конструкции на основе пеноалюминия, разрез которого представлен на рис. 5, а блок-схема экспериментальной установки — на рис. 6.



Рис. 5. Конструкция на основе пеноалюминия в разрезе

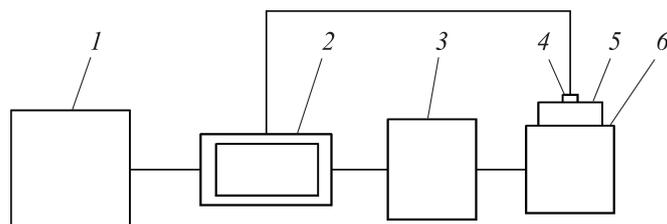


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки:

1 — компьютерная система; 2 — система управления; 3 — усилитель;
4 — акселерометры; 5 — объект испытаний; 6 — вибростенд

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов: вибростенда модели TS-2000-4Н, который подключен к усилителю типа ВС-391, обеспечивающему подачу заданной мощности; объекта испытаний — приборного отсека КА типа «Искра-5»; акселерометров типа 3030В4, установленных на столе вибростенда и в определенных местах на корпусе объекта испытаний; системы управления; электронно-вычислительной машины со специальным программным обеспечением, которое позволяет задавать параметры, управлять процессом испытаний и фиксировать результаты. Испытательный стенд с установленной полезной нагрузкой и демпфирующим устройством на основе пеноалюминия для КА типа «Искра-5» представлен на рис. 7.



Рис. 7. Вибростенд с установленной полезной нагрузкой (космический аппарат типа «Искра-5»)

В результате проведенных экспериментальных исследований базовой конструкции при различных конфигурациях и аналитической обработки были получены данные, представленные на рис. 8.

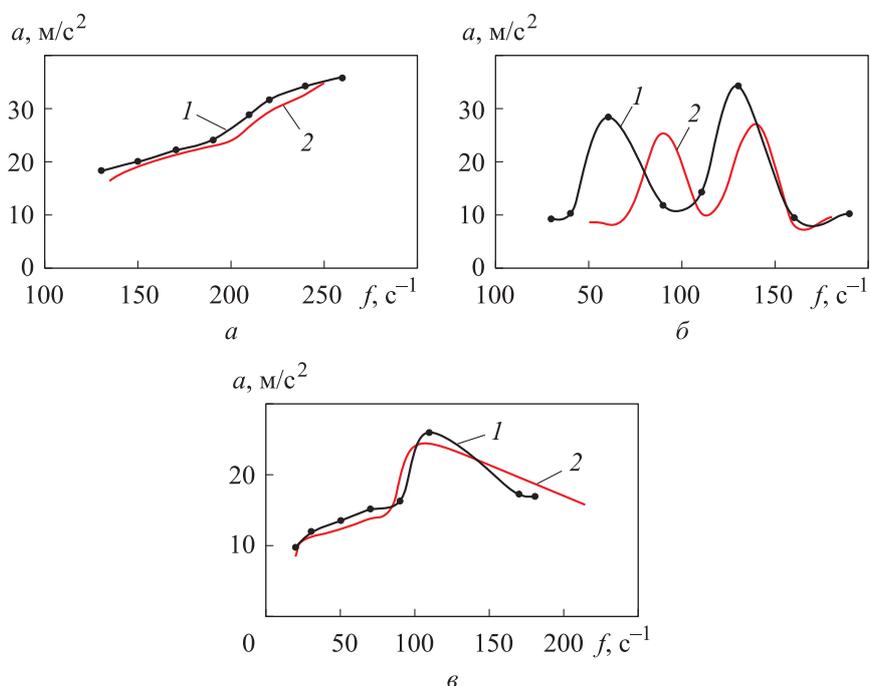


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика базовой конструкции без демпфирующего устройства (*а*), с демпфирующим кронштейном (*б*), с демпфирующими стойками (*в*):

1 — экспериментальные данные; 2 — аналитические данные

В результате анализа экспериментально-математического моделирования было выявлено, что отклонение экспериментальных данных от аналитических составляет 5...8%. При этом локальных пиков колебаний не обнаружено, а математическая модель достаточно точно учитывает динамические нагрузки, представленные в форме виброускорения a . На рис. 8, *в* расхождение составляет 4%, а пик колебаний зафиксирован при частоте, равной примерно 100 c^{-1} .

Результаты экспериментальных исследований при различных конфигурациях системы демпфирования и температурных условиях представлены на рис. 9. Анализ данных, представленных на рис. 9, *а-в*, показал, что максимальные отклонения коэффициента усиления виброускорения k_a происходят в случае использования демпфирующего кронштейна при температуре $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $21,0 \text{ }^\circ\text{C}$. По достижению температуры $32,0 \text{ }^\circ\text{C}$ характер колебаний становится более предсказуемым и стабильным, что обусловлено снижением влияния температурных деформаций на функционирование системы демпфирования.

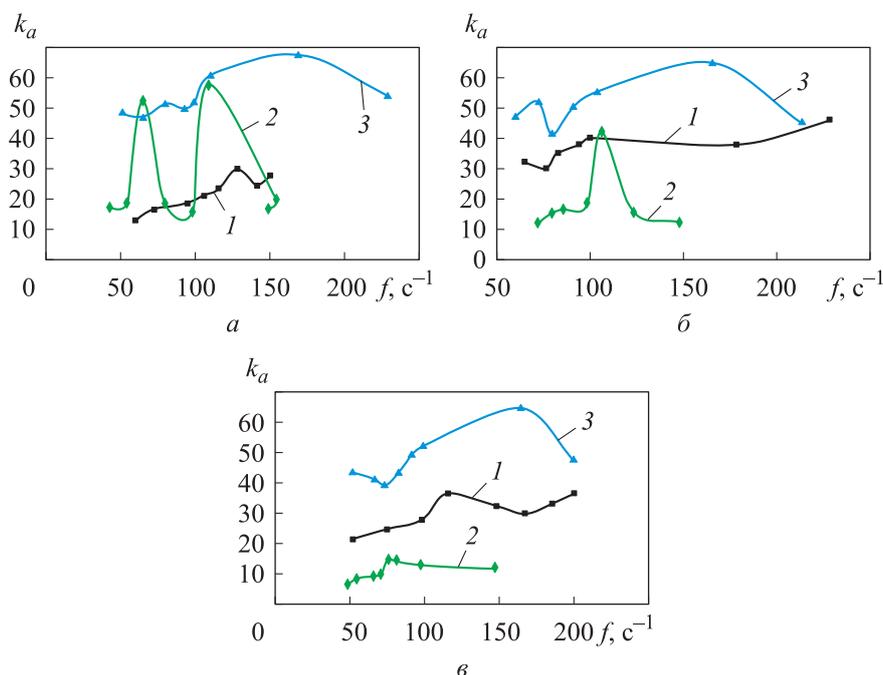


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика базовой конструкции при температуре 4 °С (а), 21 °С (б), 32 °С (в):

1 — без демпфирующего устройства; 2 — с демпфирующим кронштейном; 3 — с демпфирующими стойками

Заклучение. В результате проведенного экспериментально-математического моделирования были получены данные о динамических характеристиках базовой конструкции и ее модификаций, в которых использовались различные демпфирующие устройства. Выявлено, что расхождение в амплитудах колебаний для базовой конструкции без дополнительного демпфирующего устройства составляет 5 %, это указывает на относительно высокую подверженность конструкции внешним воздействиям. Введение демпфирующих кронштейнов увеличивает это расхождение до 8 %, что свидетельствует о необходимости дальнейшего улучшения данной схемы. В то же время применение демпфирующих стоек продемонстрировало более положительный результат — расхождение снижено до 4 %. Это подчеркивает эффективность их применения для гашения колебаний не только при боковой, но и при вертикальной нагрузке, тем самым расширяя функциональные возможности конструкции предложенной системы демпфирования.

Следует отметить, что дальнейшая стабилизация всплесков колебаний наблюдается при повышении температуры до 32 °С, а это создает новые перспективы для использования конструктивных решений при разных температурных условиях. Учитывая полученные

данные, можно заключить, что демпфирующие кронштейны, несмотря на ряд ограничений, могут быть эффективно применены в специфических условиях, когда требуется высокая устойчивость к боковым нагрузкам.

На основе полученных результатов было разработано и предложено демпфирующее устройство с использованием пеноалюминия для гашения колебаний приборного отсека космического аппарата типа «Искра-5». Пеноалюминий как материал с отличными демпфирующими характеристиками обеспечивает необходимую гибкость и прочность конструкции, что делает эту разработку весьма актуальной для дальнейших исследований и внедрения в производственные процессы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по базовой части государственного задания (проект FSFF-2025-0001)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ермаков В.Ю., Пласкеев Н.А., Туфан А., Миланко К.Н. Комплексный метод проектирования системы виброзащиты космических аппаратов. *Вестник УГАТУ*, 2024, т. 28, № 2 (104), с. 34–41. DOI: 10.54708/19926502_2024_28210434.
- [2] Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Ролдугин Д.С., Карпенко С.О. Исследование быстродействия алгоритма активного магнитного демпфирования. *Космические исследования*, 2012, т. 50, № 2, с. 176–183.
- [3] Михасев Г.И., Ботогова М.Г., Михиевич А.П. Анализ свободных колебаний сэндвич-панели с электрореологическим слоем на основе двух моделей слоистых оболочек. *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*, 2020, № 3, с. 51–59. DOI: 10.33581/2520-6508-2020-3-51-59.
- [4] Геча В.Я., Кирякин А.А., Позднякова В.Д., Пилюгин С.О. Возможность использования пеноалюминия для изготовления элементов конструкций малых космических аппаратов. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2018, № 2, с. 98–108.
- [5] Наумец П.Ю. Вакуумная резина. Классификация, назначение, свойства, область применения. *Новые материалы и технологии их обработки: сборник научных работ XXII Республиканской студенческой научно-технической конференции, 21–22 апреля 2021 года*. А.П. Бежок, И.А. Иванов, сост. Минск, БНТУ, 2022, с. 54–55.
- [6] Герасимчук В.В., Телепнев П.П. Снижение уровня виброактивности применением демпфирующего покрытия с подкрепляющим слоем. *Труды МАИ*, 2021, № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159787>
- [7] Безмозгий И.М., Софьинский А.Н., Чернягин А.Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники. *Космическая техника и технологии*, 2014, № 3 (6), с. 71–80. EDN TEMDRT
- [8] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщилов А.Н. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 1 (74), с. 58–66.

- [9] Сионоя С. *Пористый алюминий и его применение*. Пер. с япон. 74/11416-В. Москва, ГПНТБ, 1973, 11 с.
- [10] Clough R.W., Penzien J. *Dynamics of Structures*. New York, McGraw-Hill Book Company, 2003, 752 p.
- [11] Болотин В.В. ред. *Вибрации в технике. Справочник в 6 т. Т. 1. Колебания линейных систем*. Москва, Машиностроение, 1978. 352 с.
- [12] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. Москва, Наука, 1966, 686 с.
- [13] *ASTM E756-05. Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*. ASTM International, USA, 2017, 14 p.
- [14] Иванов Е.А., Иконникова А.А., Клешнина И.А., Наговицин В.Н., Похабов А.Ю. Применение конструкций сотовых панелей в космических аппаратах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5 (125). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-5-2177
- [15] Бабайцев А.В., Лопатин С.С. Особенности испытания пластин по методу свободных затухающих колебаний. *СТИН*, 2023, № 10, с. 15–17.
- [16] Babaytsev A.V., Lopatin S.S., Nasonov F.A. Study of dynamic characteristics of hybrid titanium-polymer composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, no. 1, pp. 109–115. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-109-115

Статья поступила в редакцию 07.05.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Миланко К.Н., Пласкеев Н.А., Туфан А., Ермаков В.Ю. Исследование потенциала применимости сэндвич-панелей для пассивного демпфирования колебаний в конструкции космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 12. EDN GHSELU

Миланко Кирилл Николаевич — аспирант кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: milanko@bk.ru

Пласкеев Никита Александрович — аспирант кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: plaskeevna@laspace.ru

Туфан Ант — ассистент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: anttufan@gmail.com

Ермаков Владимир Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Potential applicability of sandwich panels for passive vibration damping in spacecraft structures

© K.N. Milanko, N.A. Plaskeev, A. Tufan, V.Yu. Ermakov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation

The paper explores the potential application of sandwich panels made of foam aluminum and sealants manufactured from vacuum rubber in various configurations (without additional damping devices, with damping brackets, and with damping supports) to reduce the impact of dynamic loads on the structures of spacecraft. Experimental-and-mathematical studies were conducted to determine the amplitude-frequency characteristics of the instrument compartment of the "Iskra-5" type spacecraft using the proposed damping system under various temperature conditions typical. Based on the obtained data, rational design solutions for the proposed damping system were determined, which also depend on the direction of the impact of dynamic loads.

Keywords: passive damping, aluminium foam sandwich panel, multilayer spacecraft structure, dynamic loads, vacuum rubber

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the project under the basic part of the state assignment (project FSFF-2025-0001)

REFERENCES

- [1] Ermakov V.Yu., Plaskeev N.A., Tufan A., Milanko K.N. Kompleksnyy metod proektirovaniya sistemy vibrozashchity kosmicheskikh apparatov [An integrated method to design a spacecraft vibration protection system]. *Vestnik UGATU*, 2024, vol. 28, no. 2 (104), pp. 34–41.
DOI: 10.54708/19926502_2024_28210434
- [2] Ovchinnikov M.Yu., Penkov V.I., Roldugin D.S., Karpenko S.O. Issledovanie bystrodejstviya algoritma aktivnogo magnitnogo dempfirovaniya.[Investigation of the effectiveness of an algorithm of active magnetic damping]. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2012, vol. 50, no 2, pp. 176–183.
DOI: 10.1134/S0010952512010078
- [3] Mikhasev G.I., Botogova M.G., Mikhievich A.P. Analiz svobodnyh kolebanij sendvich-paneli s elektorreologicheskim sloem na osnove dvuh modelej sloistyh obolochek [Analysis of free vibrations of sandwich panel with electrorheological layer based on two models of laminated shells]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika — Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*, 2020, no. 3, pp. 51–59.
<https://doi.org/10.33581/2520-6508-2020-3-51-59>
- [4] Gecha V.Ya., Kiryakin A.A., Pozdnyakova V.D., Pilyugin S.O. Vozmozhnost ispolzovaniya penoalyumina dlya izgotovleniya elementov konstruksiy malykh kosmicheskikh apparatov [Possibility of using aluminum foam for constructing of the case of small spacecraft]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2018, no. 2, pp. 98–108.
- [5] Naumec P.Yu. Vakuumnaya rezina. Klassifikaciya, naznachenie, svoystva, oblast' primeneniya [Vacuum rubber. Classification, purpose, properties, scope

- of application]. In: *Novyye materialy i tekhnologii ikh obrabotki: sbornik nauch-nauchnykh rabot XXII Respublikanskoj studencheskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 21–22 aprelya 2021 goda*. A.P. Bezhok, I.A. Ivanov, sost. [New materials and technologies for their processing: collection of scientific papers of the XXII Republican Student Scientific and Technical Conference, April 21–22, 2021. A.P. Bezhok, I.A. Ivanov, comp.]. Minsk, BNTU, 2022, pp. 54–55.
- [6] Gerasimchuk V.V., Telepnev P.P. Snizhenie urovnya vibroaktivnosti primeneniem dempfiruyushchego pokrytiya s podkreplyayushchim sloem [Reducing the level of vibration activity by using a damping coating with a reinforcing layer]. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. Available at: <https://mai.ru/publications/index.php?ID=159787>
- [7] Bezmozgiy I.M., Sofinskiy A.N., Chernyagin A.G. Modelirovanie v zadachah vibroprochnosti konstrukciy raketno-kosmicheskoy tekhniki [The simulation in problems of vibration strength of rocket and space hardware]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Spacecrafts & Technologies*, 2014, no. 3 (6), pp. 71–80. EDN TEMDRT
- [8] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshchikov A.N. Mekhanicheskie i amortiziruyushchie svoystva vysokoporistogo yacheistogo alyuminiya [Mechanical and shock-absorbing properties of highly-porous cellular aluminum]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2009, no. 1 (74), pp. 58–66.
- [9] Sionoya S. *Poristyj alyuminij i ego primeneniye* [Porous aluminum and its application]. Transl. from Japanese.74/11416-V. Moscow, GPNTB, 1973, 11 p. (In Russ.).
- [10] Clough R.W., Penzien J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill Book Company, New York, 2003, pp. 490–495.
- [11] Bolotin V.V. red. *Vibracii v tekhnike. Spravochnik in 6 t. T. 1. Kolebaniya linejnyh sistem* [Vibrations in Engineering. Handbook in 6 vols. Vol. 1. Vibrations of Linear Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 352 p.
- [12] Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 686 p.
- [13] ASTM E756-05. *Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*, USA, ASTM International, 2017, p. 14.
- [14] Ivanov E.A., Ikonnikova A.A., Kleshnina I.A., Nagovitsin V.N., Pokhabov A.Yu. Primeneniye konstruktsiy sotovykh paneley v kosmicheskikh apparatakh [Application of honeycomb panel structures in spacecraft]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 5 (125). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-5-2177
- [15] Babaytsev A.V., Lopatin S.S. Osobennosti ispytaniya plastin po metodu svobodnyh zatuhayushchih kolebanij [Features of plate testing using the method of free damping vibrations]. *STIN*, 2023, no. 10, pp. 15–17.
- [16] Babaytsev A.V., Lopatin S.S., Nasonov F.A. Study of dynamic characteristics of hybrid titanium-polymer composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, no. 1, pp. 109–115. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20

Milanko K.N., Postgraduate student, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: milanko@bk.ru

Plaskeev N.A., Postgraduate student, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: plaskeevna@laspacespace.ru

Tufan Ant, Assistant, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: anttufan@gmail.com

Ermakov V.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: v_ermakov2003@mail.ru