

УДК 539.3  
EDN JFGFKG (<https://elibrary.ru/jfgfkq>)  
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.02.08



## ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТЧАТОГО КОМПОЗИТНОГО АДАПТЕРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ПЕРВУЮ СОБСТВЕННУЮ ЧАСТОТУ КОЛЕБАНИЙ

Еременко А.А.<sup>1</sup>, Азаров А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время сетчатые композитные конструкции широко применяются в ракетно-космической технике в качестве переходных отсеков, стержневых элементов космических аппаратов, корпусов спутников, адаптеров полезной нагрузки и пр. Для всех перечисленных конструкций критически важным параметром, наравне с жесткостными и прочностными характеристиками, является минимальная собственная частота колебаний. В процессе выведения полезного груза на орбиту на ракету-носитель и полезный груз действуют динамические нагрузки, вследствие чего система испытывает колебания, при совпадении частоты которых с собственной частотой конструкции (системы) наблюдается явление резонанса, резко повышающее вероятность разрушения конструкции.

Применение унифицированных базовых конструкций (платформ космических аппаратов) позволяет значительно сократить сроки разработки нового изделия, увеличить надежность (применяется уже отработанная на предыдущих изделиях платформа) и уменьшить стоимость доставки груза на орбиту.

В работе исследовано влияние основных конструктивных параметров адаптера (высоты адаптера, высоты сечений ребер и угол наклона спиральных ребер) на первую собственную частоту. Значения собственных частот были получены с использованием метода конечных элементов, реализованного в коммерческом ПО «FEMAP with NX Nastran». Построена математическая модель, прогнозирующая способность которой была подтверждена расчетом методом конечных элементов. Используя полученную модель, можно определить оптимальные конструктивные параметры адаптера для достижения максимальной собственной частоты, а также спрогнозировать первую собственную частоту при любых параметрах адаптера из расчетной области.

Представлена методика поиска оптимальных параметров для платформ космических аппаратов (силовой корпус и адаптер), позволяющая удовлетворить заданные требования к собственной частоте платформы.

**Ключевые слова:** сетчатые композитные конструкции; адаптер; композитный адаптер полезной нагрузки; корпус космического аппарата; собственные частоты; резонанс

## INFLUENCE OF THE MAIN DESIGN PARAMETERS OF THE SPACECRAFT COMPOSITE GRID ADAPTER ON THE FIRST NATURAL FREQUENCY OF VIBRATIONS

Eremenko A.A.<sup>1</sup>, Azarov A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*State Research Institute of graphite-based structural materials «NIIgraphite»,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia*

## ABSTRACT

Nowadays grid composite structures are widely used in rocket and space engineering as transition compartments, rod elements of spacecraft, satellite bodies, payload adapters and so on. For all of these structures, a critical parameter, along with stiffness and strength characteristics, is the minimum natural frequency of vibration. In the process of launching payloads into orbit, the launch vehicle and payload are subjected to dynamic loads, as a result of which the system experiences vibrations, when the frequency of which coincides with the natural frequency of the structure (system), the phenomenon of resonance is observed, sharply increasing the probability of structural failure.

The use of unified basic structures (spacecraft platforms) makes it possible to significantly reduce the development time of a new product, increase reliability (the platform already proven on previous products is used) and reduce the cost of cargo delivery to orbit.

In this paper, the influence of the main design parameters of the adapter (adapter height, height of the rib sections and the angle of inclination of the spiral ribs) on the first natural frequency is investigated. The values of natural frequencies were obtained using the finite element method implemented in the commercial software “FEMAP with NX Nastran”. A mathematical model was constructed, the predictive ability of which was confirmed by finite element calculation. Using the obtained model, it is possible to determine the optimal design parameters of the adapter to achieve the maximum natural frequency, as well as to predict the first natural frequency at any parameters of the adapter from the design domain.

A methodology for finding the optimal parameters for spacecraft platforms (power body and adapter) to satisfy the given requirements for the natural frequency of the platform is presented.

**Keywords:** grid composite structures; adapter; composite payload adapter; spacecraft body; natural frequencies; resonance

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

СКК – силовая конструкция корпуса

КА – космический аппарат

ПН – полезная нагрузка

ПФЭ – полнофакторный эксперимент

РН – ракета-носитель

СК – сетчатая конструкция;

ТПЭ – теория планирования эксперимента;

ЦКП – центральный композитный план.

## ВВЕДЕНИЕ

Доставка грузов на орбиту является дорогостоящим процессом, поскольку масса полезной нагрузки (ПН) на 1-2 порядка меньше стартовой массы ракеты-носителя (РН). Так, при доставке полезной нагрузки с помощью РН «Протон-М» на геостационарную орбиту (ГСО) стартовая масса РН составляет 705 т. при массе

ПН 3,3 т., т.е. полезная масса составляет менее 0,5% от стартовой. При этом в массу полезной нагрузки помимо массы целевой аппаратуры входит масса вспомогательных элементов – силовой конструкции корпуса, адаптера, системы разделения и пр. В связи с этим важной задачей, стоящей перед конструкторами, является повышение весовой эффективности силовых элементов космических аппаратов (КА) (рис.1а,б).

Современные космические аппараты строятся на базе единых космических платформ, центральным несущим элементом в которых является силовая конструкция корпуса (СКК), представляющая собой цилиндрическую оболочку (рис.1б), воспринимающую все нагрузки, возникающие при выведении аппарата на орбиту. Крепление КА к РН осуществляется при помощи конического адаптера (рис.1а).

Для создания СКК и адаптеров широко применяются сетчатые композитные конструкции [1-5]. Такие конструкции позволяют снизить массу по сравнению с классическими оболочками, ввиду того что сетчатая конструкция имеет большую удельную жесткость и прочность, а также ввиду большей надежности и устойчивости к повреждениям сетчатой структуры (при разрушении одного ребра нагрузка перераспределяется на остальные, а зона повреждения обшивки не распространяется на соседние ребра) [6,7].



Рис.1. Сетчатый композитный адаптер (а) и силовая конструкция корпуса (б).

Расчет сетчатых конструкций делится на четыре этапа: расчет на статическую прочность [1], расчет на общую устойчивость [1,5,8], расчет на местную устойчивость [1,5] (устойчивость элементов ребер, находящихся между пересечениями с другими ребрами), анализ собственных форм и частот собственных колебаний [8-12].

Одним из существенных требований, предъявляемых к силовым конструкциям космических платформ, является требование к минимальным частотам собственных колебаний. Частота собственных колебаний конструкции определяется ее геометрическими размерами и жесткостными характеристиками, которые в свою очередь зависят от параметров сетчатой структуры.

На данный момент не существует системного подхода к подбору оптимальных параметров конструкции для максимизации первой собственной частоты колебаний платформы КА. В данной работе представлена методика, позволяющая получить зависимости частоты собственных колебаний конструкции от ее основных параметров и определить значения параметров, обеспечивающие максимальную собственную частоту.

## МЕТОДЫ И ДОПУЩЕНИЯ

При проведении исследования были использованы методы теории планирования эксперимента (ТПЭ) [13]. Данный подход позволяет построить математическую модель, основываясь исключительно на априорных знаниях об исследуемом объекте, что позволяет получать эмпирические модели при отсутствии каких-либо теорий или глубокого понимания объекта исследования. Исследуемый объект представляется в виде «черного ящика». Входные переменные называются факторами, а выходная – откликом. Если откликов больше одного, строится несколько независимых моделей для каждого отклика.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Общепринятой практикой в теории планирования эксперимента является создание кодированных переменных, что является более удобным вариантом с вычислительной точки зрения. Значение кодированной переменной определяется следующим образом

$$x_i = \frac{X_i - X_{icp}}{X_{icp} - X_{imin}}, \quad (1)$$
$$X_{icp} = \frac{X_{imax} + X_{imin}}{2},$$

где  $X_i$  – абсолютное значение фактора.

Функция отклика имеет вид

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – факторы;  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  – некоторые коэффициенты;  $\varepsilon$  – погрешность.

С использованием методов ТПЭ был составлен центральный композитный план (ЦКП) численного эксперимента.

Количество расчетных точек, требуемое для проведения двухуровневого  $n$ -факторного численного эксперимента при использовании центрального композитного плана (ЦКП), составляет

$$N = 2^k + 2k + 1,$$

где  $k$  – количество факторов (варьируемых параметров). ЦКП в данном случае представляет из себя совокупность  $2^3 = 8$  расчетных точек, составляющих полнофакторный численный эксперимент (ПФЭ), набора из  $2 \cdot 3 = 6$  расчетов в «звездных точках» и одного численного эксперимента в центральной точке.

Расчеты были проведены методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе Femap with NX Nastran. Ребра сетчатой структуры и шпангоуты моделировали балочными элементами СВЕАМ, участки ребер между узлами из пересечения разбивали на четыре элемента. Стык между адаптером и корпусом обычно является разделяемым. Типичным способом крепления является крепление пирозамками. В реальной конструкции шпангоуты на стыке СКК и адаптера находятся в непосредственном контакте друг с другом, нагрузка между ними передается только в сжатой зоне и через пирозамки. При динамических нагрузках, действующих на систему, расположение и размеры этой сжатой зоны являются переменными, в связи с чем при расчете был рассмотрен худший случай, при котором шпангоут СКК не опирается

на шпангоут адаптера по контуру, а прикреплен к нему только в отдельных зонах, соответствующих местам установки пирозамков [14]. Для реализации этой расчетной схемы в модели между шпангоутами был предусмотрен зазор, а замки, соединяющие шпангоуты были смоделированы жесткими элементами «RBE2».

Был проведен ряд конечно-элементных расчетов в точках, определенных в ЦКП и на основе их результатов построена регрессионная модель, позволяющая определить первую собственную частоту колебаний системы в зависимости от основных геометрических параметров адаптера. Для проверки точности полученной модели при помощи того же программного комплекса были проведены конечно-элементные расчеты первой собственной частоты конструкции в точках, отличных от использованных при построении модели, и сделано сравнение данных результатов со значениями, полученными при помощи модели.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрена компоновка платформы «Экспресс-1000» [17], которая состоит из композитного сетчатого адаптера и установленной на нем композитной сетчатой СКК космического аппарата. «Экспресс» – это серия современных спутниковых платформ негерметичной конструкции российской компании АО «Решетнев», на которой базируются перспективные спутники связи этого предприятия [15-18]. Параметры СКК, использованные в данной работе, приведены ниже.

### **Силовая конструкция корпуса:**

- диаметр – 1192 мм;
- длина – 2500 мм.

### *Спиральные ребра:*

- размеры сечения ребра (Ш×В) – 5×16 мм;
- число пар – 48;
- угол наклона – 15°.

### *Кольцевые ребра:*

- размеры сечения ребра (Ш×В) – 3×16 мм.

Полезная нагрузка имитировалась сосредоточенной массой 2000 кг, расположенной на расстоянии 0,55 м от верхнего шпангоута СКК на оси симметрии.

Наибольшее влияние на собственные частоты колебаний платформы оказывают геометрические и жесткостные параметры адаптера. В связи с этим в качестве исследуемых факторов были выбраны три основных параметра адаптера: высота адаптера ( $h$ ), высоты сечений ребер ( $b$ ) и угол наклона спиральных ребер на нижнем торце адаптера ( $\theta$ ).

Были приняты следующие диапазоны варьирования параметров:

- $h = [200; 1000]$  мм;
- $b = [15; 32]$  мм;
- $\theta = [10; 24]^\circ$ .

Параметры адаптера представлены ниже. Высота ребер  $b$  была принята одинаковой для спиральных и кольцевых ребер.

**Адаптер:**

- Диаметр верхний – 1200 мм;
- Диаметр нижний – 2050 мм;
- Высота –  $h$  мм.

**Спиральные ребра:**

- Размер сечения ребра (Ш×В) –  $6 \times b$  мм;
- Число пар – 48;
- Угол наклона спиральных ребер на нижнем торце –  $\theta$ .

**Кольцевые ребра:**

- Размер сечения ребра (Ш×В) –  $3 \times b$  мм.

Формы и частоты собственных колебаний зависят не только от геометрии и механических характеристик сетчатой структуры, но и от способа крепления СКК к адаптеру, в частности – количества пирозамков и размеров стыковочных шпангоутов. Исследование влияния этих факторов на частоты колебаний системы рассмотрено в работе [14]. В настоящей работе количество пирозамков было принято равным восьми, а шпангоуты (верхний и нижний шпангоуты СКК и адаптера), выполненные из алюминиевого сплава В95, имели прямоугольное сечение размерами  $20 \times 30$  мм для СКК и  $30 \times 30$  мм для адаптера.

В качестве материала, из которого выполнены ребра сетчатой структуры СКК и адаптера, рассматривался однонаправленный углепластик на основе волокон Umatex UMT-430 и эпоксидного связующего ЭХД-МД. Физико-механические характеристики материалов, использованные в расчете, приведены ниже.

**Физико-механические характеристики материала ребер:**

- модуль упругости вдоль ребра  $E_1 = 160$  ГПа;
- модуль упругости поперек ребра  $E_2 = 6,5$  ГПа;
- модуль сдвига  $G_{12} = 3$  ГПа;
- модуль сдвига  $G_{23} = 2$  ГПа;
- Коэффициент Пуассона  $\mu_{12} = 0,19$ ;
- Прочность при сжатии вдоль ребра  $\sigma_{-1} = 480$  МПа;
- Прочность при растяжении вдоль ребра  $\sigma_1 = 800$  МПа.

**Физико-механические характеристики алюминиевого сплава В95:**

- модуль упругости вдоль ребра  $E = 71$  ГПа;
- Коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ;
- Предел прочности  $[\sigma] = 423,8$  МПа.

*Примечание.* В прочности сплава В95 учтено 20%-ное снижение характеристик материала в результате термообработки корпуса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Для построения модели были использованы результаты, полученные при расчете методом конечных элементов в программном комплексе Femap. Формулировка конечно-элементной модели была описана выше.

Для получения коэффициентов регрессионной модели и прочих статистических расчетов был использован программный комплекс «Minitab».

Значения первой собственной частоты, полученные при расчете методом

конечных элементов, а также с использованием полученной математической модели представлены в Таблице 1, где  $m_{\text{адап}}$  – масса адаптера;  $\eta$  – отклик (полученная модель);  $\Delta\eta$  – абсолютная погрешность модели (по сравнению с расчетом МКЭ).

Таблица 1.  
Результаты расчетов первой собственной частоты для различных комбинаций параметров конструкции адаптера.

N	$h$ , мм	$b$ , мм	$\theta$ , °	$m_{\text{адап}}$ , кг	Расчет МКЭ, Гц	$\eta$ , Гц	$\Delta\eta$ , Гц
1	362,16	18,45	12,84	38,8	5,05	5,01	0,04
2	837,84	18,45	12,84	47,5	6,61	6,68	-0,07
3	362,16	28,55	12,84	45,6	5,43	5,37	0,06
4	837,84	28,55	12,84	59,0	6,96	7,05	-0,09
5	362,16	18,45	21,16	40,8	5,59	5,48	0,11
6	837,84	18,45	21,16	51,1	6,69	6,74	-0,05
7	362,16	28,55	21,16	48,7	5,94	5,85	0,09
8	837,84	28,55	21,16	64,6	7,08	7,10	-0,02
9	200,00	23,50	17,00	40,4	4,18	4,35	-0,17
10	1000,00	23,50	17,00	59,8	6,96	6,82	0,14
11	600,00	15,00	17,00	40,6	6,24	6,27	-0,03
12	600,00	32,00	17,00	56,8	6,84	6,88	-0,04
13	600,00	23,50	10,00	46,4	6,21	6,17	0,04
14	600,00	23,50	24,00	52,4	6,54	6,61	-0,07
15	600,00	23,50	17,00	48,7	6,61	6,57	0,04

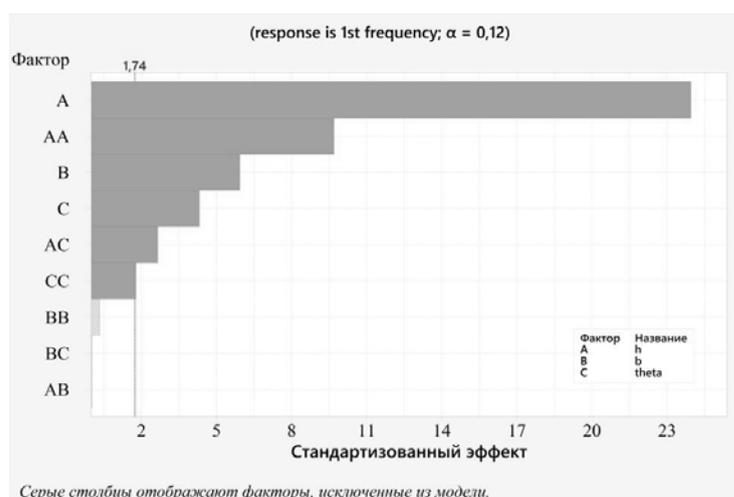


Рис.2. Диаграмма стандартизованных эффектов факторов.

На рис.2 показана диаграмма стандартизованных эффектов каждого фактора. Под стандартизованным эффектом понимается модуль  $t$ -статистики.

Диаграмма показывает влияние каждого фактора на модель. Красной вертикальной чертой отмечена квантиль уровня значимости  $\alpha = 12\%$ . Факторы, стандартизованный эффект которых ниже данного уровня, были исключены из модели.

В Таблице 2 приведены значения кодированных коэффициентов модели.

Таблица 2.

Таблица кодированных коэффициентов.

Фактор	Коэффициент	SE коэфф.	t-статистика	p-значение
constant	6,5715	0,062	106,29	0,000
$h$	0,7326	0,031	23,95	0,000
$b$	0,1815	0,031	5,93	0,000
$\theta$	0,1322	0,031	4,32	0,003
$h \cdot h$	-0,3489	0,036	-9,69	0,000
$\theta \cdot \theta$	-0,0643	0,036	-1,79	0,112
$h \cdot \theta$	-0,1062	0,040	-2,66	0,029

SE коэфф. – стандартная ошибка коэффициента, которая оценивает изменчивость между оценками коэффициентов, которые получатся, если брать выборки из одной и той же совокупности снова и снова. Данная величина используется для измерения точности оценки коэффициента (чем меньше стандартная ошибка, тем точнее оценка). Путем деления коэффициента на его стандартную ошибку можно вычислить  $t$ -статистику. Если  $p$ -значение, связанное с этой  $t$ -статистикой (Таблица 2), меньше уровня значимости  $\alpha$ , то можно заключить, что коэффициент статистически значим.

На рис.3 изображены погрешности модели относительно расчетов в программном комплексе «Femар» в 15 расчетных точках. Красными линиями отображены границы интервала  $(-\sigma; +\sigma)$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение погрешности модели.

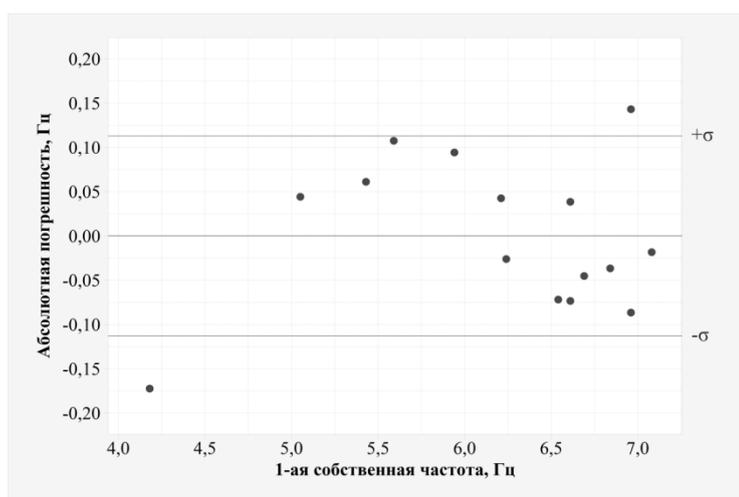


Рис.3. Точечная диаграмма погрешностей модели в соответствии с расчетной величиной (МКЭ).

На рис.4 изображена гистограмма ошибок, а также график плотности

вероятности распределения Гаусса с параметрами  $N(0,000; 0,0852)$ . Их визуальное соответствие позволяет предположить соответствие этих распределений. Далее этот вопрос рассмотрен подробнее.

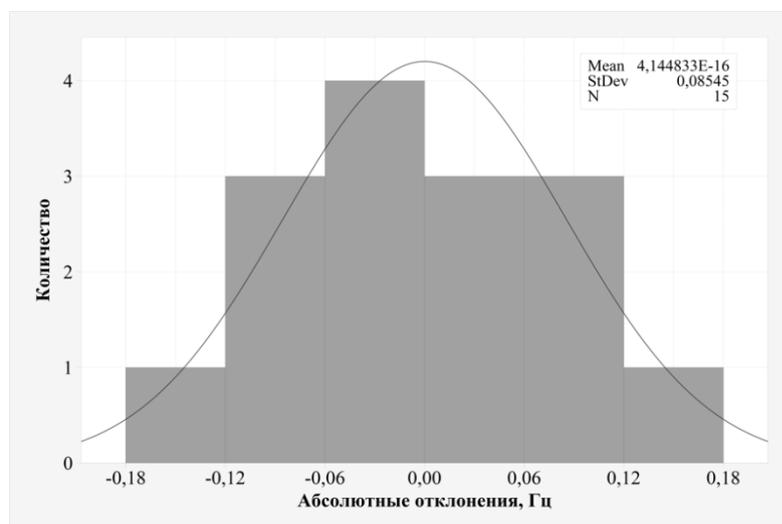


Рис.4. Гистограмма погрешностей модели в соответствии с расчетной величиной (МКЭ).

Нормальный вероятностный график (рис.5) показывает соответствие распределения погрешностей модели Гауссовому распределению  $N(\mu; \sigma_2)$ . Визуальная оценка расстояния точек до прямой линии, отображающей нормальное распределение с параметрами  $N(0,000; 0,0852)$ , а также величин  $p$ -значения = 0,785 позволяют сделать вывод о том, что распределение погрешностей близко к нормальному. Это показывает отсутствие систематических погрешностей модели  $\eta$ .

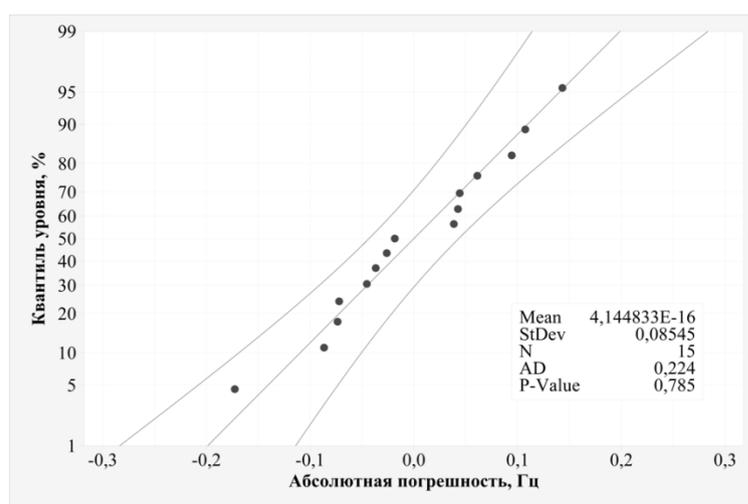


Рис.5. Нормальный вероятностный график погрешностей модели.

В Таблице 3 приведены величины, характеризующие точность модели.

Таблица 3.

Основные характеристики модели.

$\sigma$	$R^2$	$R^2_{adj}$	$R^2_{pred}$
0,113042	98,92%	98,11%	94,92%

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) – это доля суммы квадратов, объясненных регрессией, в общей сумме квадратов, подлежащих объяснению, которая показывает, насколько большой разброс в данных может быть объяснен данной моделью линейной регрессии. Этот коэффициент является одним из критериев качества модели и вычисляется следующим образом

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (3)$$

где  $SSE$  – сумма квадратов невязок,  $SST$  – общая сумма квадратов (см. рис.6).

Используется также скорректированный коэффициент детерминации  $R^2_{adj}$ , который учитывает количество факторов модели, что удобно для сравнения моделей с различным количеством факторов

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} \frac{SSE}{SST}, \quad (4)$$

Здесь  $n$  – количество наблюдений,  $p$  – количество коэффициентов регрессии.

Прогнозный коэффициент детерминации  $R^2_{pred}$  показывает, насколько хорошо регрессионная модель предсказывает результаты новых наблюдений и рассчитывается путем систематического удаления каждого наблюдения из набора данных, оценки уравнения регрессии и определения того, насколько хорошо модель предсказывает удалённое наблюдение. Как и  $R^2_{adj}$ ,  $R^2_{pred}$  может быть отрицательным и всегда меньше  $R^2$ .

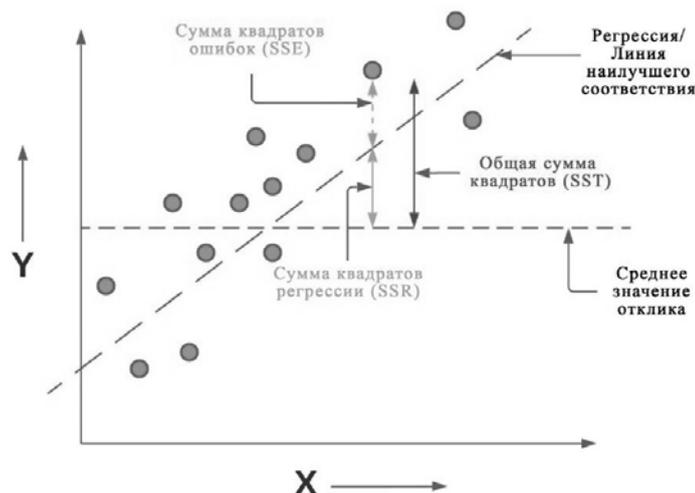


Рис.6. Условное обозначение SSE, SST на примере одномерной регрессионной модели.

На основе Таблиц 1, 2, 3, а также рис.2-5 можно сделать вывод о том, что полученная модель обладает удовлетворительными характеристиками.

Полученная модель определяется следующим уравнением регрессии

в исходных переменных

$$\eta \approx -1,0475 + 0,012306 \cdot h + 0,035917 \cdot b + 0,22226 \cdot \theta - 6,1672 \cdot 10^{-6} \cdot h^2 - 0,0037091 \cdot \theta^2 - 0,00010733 \cdot h\theta, \tag{5}$$

где высота адаптера и высота ребер  $h$  и  $b$  измеряются в миллиметрах, угол наклона ребер  $\theta$  – в градусах, а первая собственная частота колебаний  $\eta$  – в Герцах.

Исследуем влияние варьируемых параметров на частоту колебаний конструкции. На рис.7-9 изображены графики различных сечений гиперповерхности  $F(h, b, \theta, \eta) = 0$ .

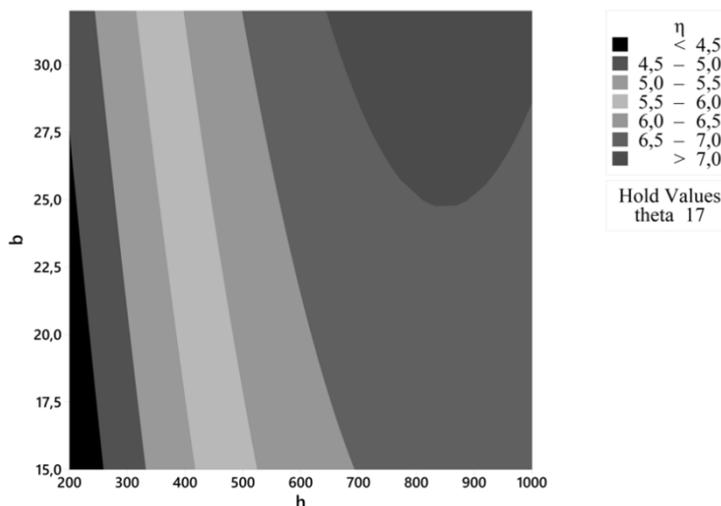


Рис.7. Контурный график зависимости  $\eta$  от  $h, b$  при  $\theta = 17$ .

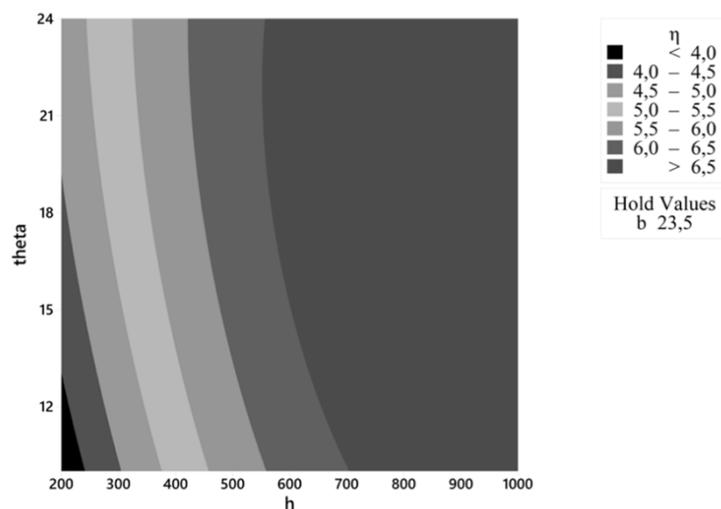


Рис.8. Контурный график зависимости  $\eta$  от  $h, \theta$  при  $b = 23,5$ .

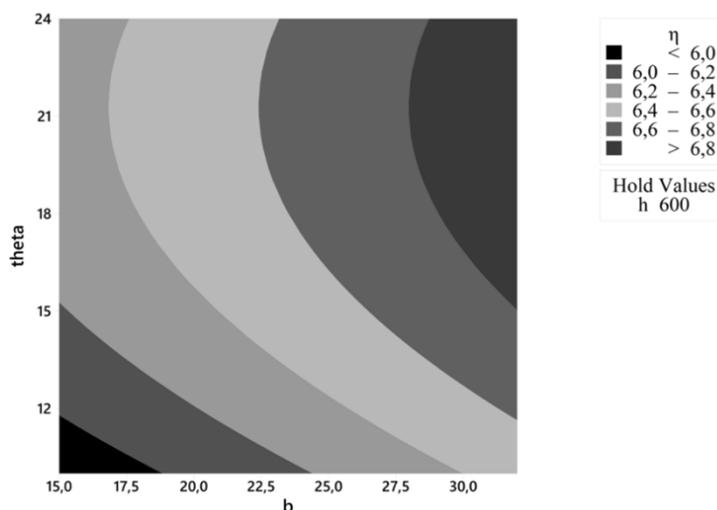


Рис.9. Контурный график зависимости  $\eta$  от  $b$ ,  $\theta$  при  $h = 600$ .

Точка максимума отклика  $\eta(h, b, \theta)$ , соответствующая наибольшей частоте собственных колебаний, была определена в программном комплексе «Minitab». Результат поиска:  $\eta(846; 32; 17,78) = 7,26$  Гц (см. рис.10).

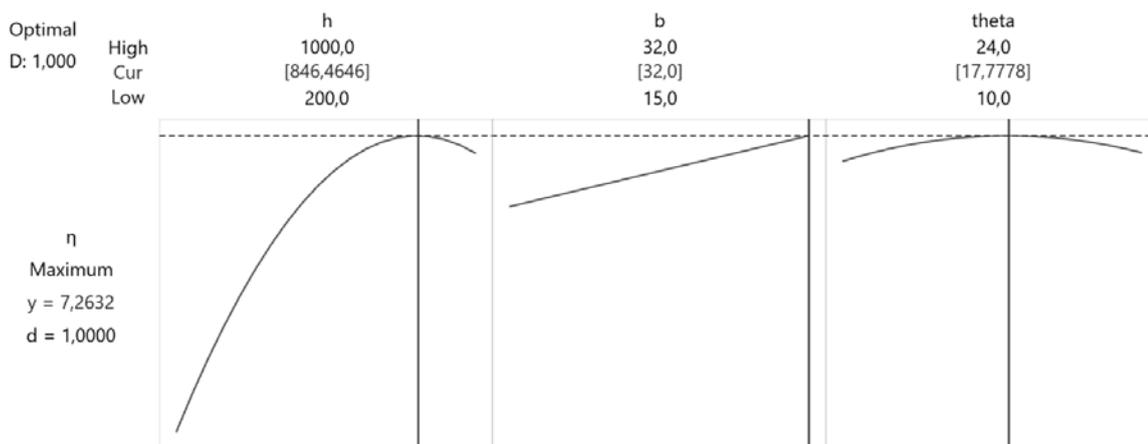


Рис.10. Точка максимума поверхности отклика  $\eta(h, b, \theta)$ .

Для проверки был произведен расчет конструкции с параметрами, соответствующими найденной точке, методом конечных элементов. Расчет показал первую собственную частоту равной 7,25 Гц (рис.11), что хорошо согласуется с данными, прогнозируемыми моделью (Таблица 4).

Таблица 4.

Проверка предсказательной точности модели  $\eta(h, b, \theta)$ .

$\eta$ , Гц	Расчет МКЭ, Гц	$\Delta\eta$ , Гц	$\delta_\eta$ , %
7,26	7,25	0,01	0,14

*Примечание.* Здесь  $\Delta\eta$  – абсолютная погрешность модели относительно расчета МКЭ;  $\delta_\eta$  – относительная погрешность модели относительно расчета МКЭ.

Первая собственная форма конструкции СКК + адаптер, соответствующая частоте  $\eta$ , является изгибной для всех конструкций из исследуемого диапазона варьирования параметров (рис.11).

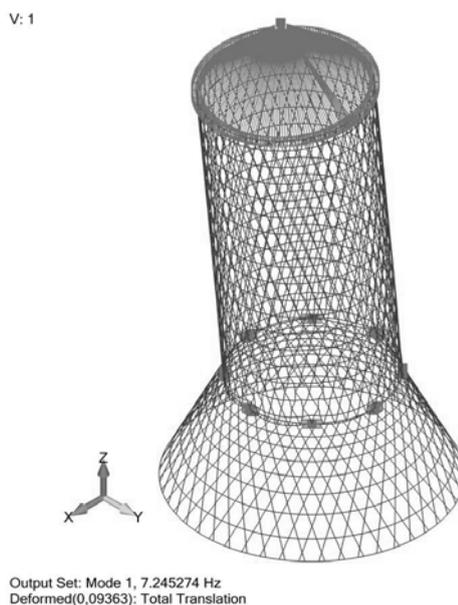


Рис.11. Первая собственная форма конструкции с характеристиками адаптера:  $h = 846$ ,  $b = 32$ ,  $\theta = 17,78$ .

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученная в предыдущем разделе точка оптимума находится не на границе диапазонов варьирования переменных  $h$  и  $\theta$ , но на границе диапазона переменной  $b$ . Рассмотрим поведение функции отклика в окрестности точки максимума.

**Высота адаптера  $h$ .** С ростом высоты  $h$  первая собственная частота  $\eta$  сначала растет, а затем уменьшается (рис.10). Это является следствием того, что при малой высоте адаптера (рис.12а) он вырождается в пластину или мембрану и жесткость системы определяется изгибной жесткостью стенки адаптера. При большой высоте адаптера (рис.12б) жесткость системы определяется изгибной жесткостью сечения оболочки и оказывается значительно выше. Также необходимо отметить, что с увеличением высоты адаптера увеличивается и расстояние от закрепленного сечения адаптера до сосредоточенной массы, что снижает собственную частоту колебаний система.

При увеличении высоты адаптера масса меняется незначительно. Так, например, для конструкции с параметрами  $b = 23,5$  мм,  $\theta = 17^\circ$  при увеличении высоты с  $h = 200$  мм до  $h = 1000$  мм (в 5 раз) масса увеличивается в 1,48 раза.

**Высота сечения ребра  $b$ .** С ростом  $b$  увеличивается как изгибная, так и осевая жесткости ребер адаптера, то есть возрастает и изгибная жесткость стенки и изгибная жесткость оболочки. Это приводит к монотонному росту первой собственной частоты, однако в реальных конструкциях величина этого параметра ограничена как конструктивно, так и технологически.

Помимо этого, с увеличением  $b$  достаточно существенно растет масса

конструкции. Так, при характеристиках адаптера  $h = 600$ ,  $b = 15$ ,  $\theta = 17$  масса адаптера составила  $m_{\text{адап}} = 40,6$  кг, а частота – 6,24 Гц, а при  $h = 600$ ,  $b = 32$ ,  $\theta = 17$  масса адаптера составила  $m_{\text{адап}} = 56,8$  кг, а частота – 6,84 Гц (Таблица 1). Таким образом, при увеличении  $b$  более чем в 2 раза (с 15 мм до 32 мм) масса конструкции увеличилась на 16,2 кг (на 39,9%), а частота лишь на 0,6 Гц (на 9,6%).

**Угол наклона спиральных ребер  $\theta$ .** При малых углах наклона спиральных ребер существенное влияние на первую собственную частоту оказывает сдвиговая жесткость стенки адаптера. В этом случае она является достаточно низкой и общую податливость конструкции определяет сдвиговая составляющая. С увеличением угла наклона ребер сдвиговая жесткость стенки растет, что приводит к росту общей поперечной жесткости конструкции, а значит и частоты собственных колебаний. После достижения некоторого угла наклона ребер критичным становится снижение осевой мембранной жесткости стенки оболочки, определяющей общую изгибную жесткость конструкции. Изгибная жесткость конструкции начинает снижаться столь существенно, что именно изгиб вносит наибольший вклад в общую податливость конструкции, и собственная частота с ростом общей податливости падает.

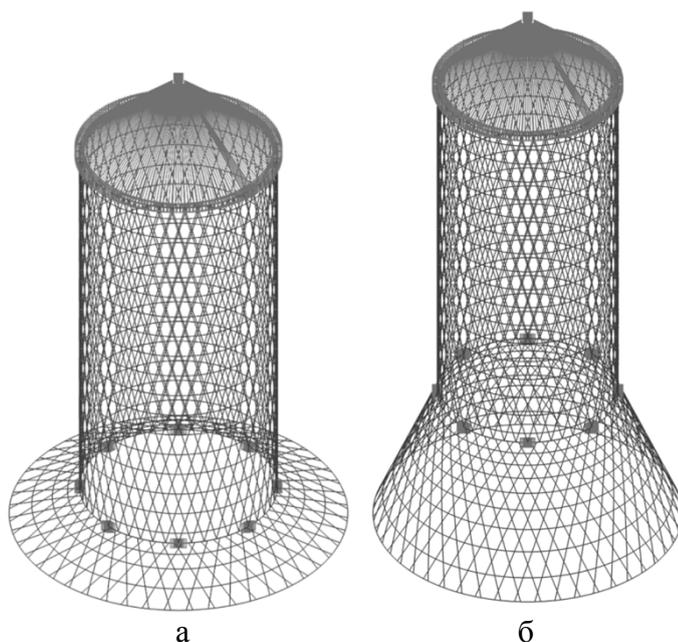


Рис.12. Платформы с характеристиками адаптера: а)  $h = 200$ ,  $b = 23,5$ ,  $\theta = 17$ ; б)  $h = 1000$ ,  $b = 23,5$ ,  $\theta = 17$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выведения полезного груза на орбиту на ракету-носитель и полезный груз действуют динамические нагрузки, вследствие чего система испытывает колебания, при совпадении частоты которых с собственной частотой системы наблюдается явление резонанса, резко повышающее вероятность разрушения конструкции. Поэтому для силовых конструкций космических аппаратов критически важным параметром, наравне с жесткостными и прочностными характеристиками, является первая собственная частота

колебаний.

По итогам исследования влияния основных конструктивных параметров адаптера на первую собственную частоту получены следующие результаты:

- 1) С ростом высоты адаптера  $h$  первая собственная частота  $\eta$  сначала растет, а затем уменьшается.
- 2) С ростом угла наклона спиральных ребер  $\theta$  первая собственная частота  $\eta$  сначала растет, а затем уменьшается.
- 3) Исходя из изложенного в п. 1 и 2, существуют оптимальные значения параметров  $h$  и  $\theta$ , при которых первая собственная частота максимальна.
- 4) Для высоты сечения ребра  $b$  оптимального значения в расчетной области не наблюдается, поскольку первая частота практически линейно зависит от  $b$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В.В. и др. *Анизотридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике* // Композиты и наноструктуры. – 2009. – №3. – С.38-50.
2. Азаров А.В. *Проблема проектирования аэрокосмических сетчатых композитных конструкций* // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2018. – №4. – С.85-93.
3. Giusto G. et al. *Composite grid structure technology for space applications* // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol.34. – Pp.332-340.
4. Farhadi Nia M. et al. *Analysis investigation of composite lattice conical shell as satellite carrier adapter for aerospace applications* // International Journal of Advances in Applied Mathematics and Mechanics. – 2014. – Vol.1. – No.4. – Pp.40-51.
5. Wang D., Abdalla M.M., Zhang W. *Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures* // Composite Structures. – 2017. – Vol.159. – Pp.656-666.
6. Азиков Н.С. и др. *Эффективность применения анизотридных композитных элементов в силовых конструкциях крыла самолета* // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2021. – №3. – С.91-101.
7. Di Palma M., Gandhi F. *Stress Redistribution in Cellular Lattice Structures with Cell Wall Damage* / «AIAA/ASCE/AHS/ASC» Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. – 2018. – Pp.733.
8. Хахленкова А.А. *Сетчатая цилиндрическая оболочка с круглым поперечным сечением и переменной жесткостью* // Сибирский журнал науки и технологий. – 2016. – Т.17. – №4. – С.1028-1036.
9. Хахленкова А.А., Лопатин А.В. *Обзор конструкций адаптеров современных космических аппаратов* // Космические аппараты и технологии. – 2018. – №3(25). – С.134-146.
10. *Soyuz User's Manual*. Iss.3, Revision 0, April 2001. URL: [http://www.starsem.com/services/images/soyuz\\_users\\_manual\\_190401.pdf](http://www.starsem.com/services/images/soyuz_users_manual_190401.pdf) (дата обращения: 12.12.2022).
11. *Soyuz User's Manual*. Iss.2, Revision 0, March 2012. URL: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/09/Soyuz-Users-Manual-March-2012.pdf> (дата обращения: 12.12.2022).

12. Proton Launch System Mission Planner's Guide. Revision 7, October, 2009. URL: <https://www.ilslaunch.com/wp-content/uploads/pdf/PMPG%20Section%202.pdf> (дата обращения: 12.12.2022).
13. Сидняев Н.И. *Статистический анализ и теория планирования эксперимента*. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 198 с.
14. Еременко А.А., Азаров А.В. *Влияние конструкции разделяемого узла стыка между сетчатыми композитными адаптером и корпусом космического аппарата на собственные частоты их колебаний* // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. – №12.
15. Ермолаев В.И., Бубука В.А., Тестоедов Н.А. *Спутниковая платформа «Экспресс-1000»: Учебное пособие*. – СПб.: БГТУ, 2015. – 65 с. (С.7-8).
16. Яковлев А.В. и др. *Принципы построения перспективной космической платформы «Экспресс-500»* // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т.1. – №12. – С.142-144.
17. Тестоедов Н.А. *Сибирский центр российского спутникостроения* // Журнал Сибирского федерального университета. – 2012. – №5. – С.126-139.
18. Ишков С.А., Фадеенков П.В., Филиппов Г.А. *Проектно-баллистический анализ космического аппарата для сбора космического мусора на геостационарной орбите на базе платформы «Экспресс-2000»* / Международная конференция «Решетневские чтения». Сборник трудов. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2018. – Т.1. – С.22-24.

## REFERENCES

1. Vasil'ev V.V. i dr. *Anizogridnye kompozitnye setchatye konstruksii – razrabotka i prilozhenie k kosmicheskoy tekhnike [Anisogrid composite lattice structures – development and space applications]*. Kompozity i nanostruktury, 2009, No.3, Pp.38-50.
2. Azarov A.V. *Problema proektirovaniya aehrokosmicheskikh setchatykh kompozitnykh konstruksij [A design problem for aerospace lattice composite structures]*. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela, 2018, No.4, Pp.85-93.
3. Giusto G. et al. *Composite grid structure technology for space applications*. Materials Today: Proceedings, 2021, Vol.34, Pp.332-340.
4. Farhadi Nia M. et al. *Analysis investigation of composite lattice conical shell as satellite carrier adapter for aerospace applications*. International Journal of Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2014, Vol.1, No.4, Pp.40-51.
5. Wang D., Abdalla M.M., Zhang W. *Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures*. Composite Structures, 2017, Vol.159, Pp.656-666.
6. Azikov N.S. i dr. *Ehffektivnost' primeneniya anizogridnykh kompozitnykh ehlementov v silovykh konstruksiyakh kryla samoleta [Efficiency of application of anisogrid composite elements in strength structures of an airplane wing]*. Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii, 2021, No.3, Pp.91-101.
7. Di Palma M., Gandhi F. *Stress Redistribution in Cellular Lattice Structures with Cell Wall Damage*. «AIAA/ASCE/AHS/ASC» Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2018, Pp.733.
8. Hahlenkova A.A. *Setchataya tsilindricheskaya obolochka s kruglym poperechnym*

- secheniem i peremennoj zhestkost'yu [Lattice cylindrical shell with a round transverse profile and variable stiffness]. Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologii, 2016, Vol.17, No4, Pp.1028-1036.*
9. Hahlenkova A.A., Lopatin A.V. *Obzor konstruktsij adapterov sovremennykh kosmicheskikh apparatov [Overview of adapter designs for modern spacecrafts]. Kosmicheskie apparaty i tekhnologii, 2018, No.3(25), Pp.134-146.*
  10. *Soyuz User's Manual. Iss.3, Revision 0, April 2001. URL: [http://www.starsem.com/services/images/soyuz\\_users\\_manual\\_190401.pdf](http://www.starsem.com/services/images/soyuz_users_manual_190401.pdf) (data obrashheniya: 12.12.2022).*
  11. *Soyuz User's Manual. Iss.2, Revision 0, March 2012. URL: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/09/Soyuz-Users-Manual-March-2012.pdf>.*
  12. *Proton Launch System Mission Planner's Guide. Revision 7, October, 2009. URL: <https://www.ilslaunch.com/wp-content/uploads/pdf/PMPG%20Section%202.pdf>.*
  13. Sidnyaev N.I. *Statisticheskij analiz i teoriya planirovaniya ehksperimenta [Statistical analysis and the theory of design of experiment]. Izdatel'stvo MGTU im. N.Eh. Baumana, 2017, 198 p.*
  14. Eremenko A.A., Azarov A.V. *Vliyanie konstruktsii razdelyaemogo uzla styka mezhdu setchatymi kompozitnymi adapterom i korpusom kosmicheskogo apparata na sobstvennye chastoty ikh kolebanij [Influence of the design of a separable junction between the grid composite adapter and the spacecraft hull on their natural oscillation frequencies]. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovatsii, 2022, No.12.*
  15. Ermolaev V.I., Bubuka V.A., Testoedov N.A. *Sputnikovaya platforma «Ehkspress-1000» [Express-1000 satellite platform]. Sankt-Peterburg, BGU, 2015, 65 p. (Pp.7-8).*
  16. Yakovlev A.V. i dr. *Printsipy postroeniya perspektivnoj kosmicheskoy platformy «Ehkspress-500» [Design concept of the advanced space platform «express-500»]. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki, 2016, Vol.1, No.12, Pp.142-144.*
  17. Testoedov N.A. *Sibirskij tsentr rossijskogo sputnikostroeniya [Siberian Centre of Russian satellite designing]. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta, 2012, No.5, Pp.126-139.*
  18. Ishkov S.A., Fadeenkov P.V., Filippov G.A. *Proektno-ballisticheskij analiz kosmicheskogo apparata dlya sbora kosmicheskogo musora na geostatsionarnoj orbite na baze platformy «Ehkspress-2000» [Ballistic analysis of spacecraft for space debris disposal at geostationary orbit at base of platform «express-2000»]. Mezhdunarodnaya konferentsiya "Reshetnevskie chteniya". Sbornik trudov. Krasnoyarsk, Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii im. akad. M.F. Reshetneva, 2018, Vol.1, Pp.22-24.*

*Поступила в редакцию 19 апреля 2024 года.*

---

Сведения об авторах:

Еременко Александр Андреевич – инж., Государственный научно-исследовательский институт композиционных материалов на основе графита «НИИГрафит», г. Москва, Россия; e-mail: [eremenko.science@gmail.com](mailto:eremenko.science@gmail.com)

Азаров Андрей Валерьевич – д.т.н., доц., Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия; e-mail: [avazar@bk.ru](mailto:avazar@bk.ru)