

Научная статья
УДК 51-74
DOI: [10.34759/trd-2023-130-02](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-02)

МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОЙ РЕТРОРЕФЛЕКТОРНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Акентьев Александр Сергеевич¹, Фокина Анна Александровна^{2✉},
Макаров Дмитрий Константинович³,

^{1,2,3}АО Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

¹akentev.alexander@gmail.com

²anna.fokina.mai@gmail.com✉

³dosiaich@yandex.ru

Аннотация. Представлены варианты конструкций оптической ретрорефлекторной антенной системы (ОРАС-ВКК) для космического аппарата высокоорбитального космического комплекса системы ГЛОНАСС. Проанализированы варианты конструкции с различным расположением отверстий, количества оптических уголковых отражателей и других составных частей. Определена конструкция оптической ретрорефлекторной антенной системы, удовлетворяющая требованиям успешного выведения в составе космического аппарата (КА) и функционирования на высоте орбиты 36000 км. Проведен механический анализ выбранной

конструкции. Анализ собственных частот конструкции подтвердил отсутствие резонанса между составными частями КА и ОПАС-ВКК. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкции показало, что наибольшее расчетное напряжение в конструкции меньше допустимого, что обеспечивает ОПАС-ВКК запас прочности, достаточный для успешного выведения системы в составе КА на рабочую орбиту. Так как в конструкции отсутствуют собственные частоты менее 100 Гц, уровень амплитуды синусоидального воздействия равен уровню амплитуды квазистатического воздействия. Подтверждена стойкость ОПАС-ВКК к воздействию механических нагрузок на участке выведения космического аппарата ракетоносителем.

Ключевые слова: космический аппарат «Глонасс», оптическая ретрорефлекторная антенная система, собственные частоты, прочностной расчет

Для цитирования: Акентьев А.С., Фокина А.А., Макаров Д.К. Механический анализ оптической ретрорефлекторной антенной системы для высокоорбитального космического аппарата // Труды МАИ. № 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-02](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-02)

Original article

MECHANICAL ANALYSIS FOR OPTICAL RETROREFLECTOR ANTENNA SYSTEM FOR HIGH-ORBIT SEGMENT OF GLONASS NAVIGATION SYSTEM

Alexander S. Akentyev¹, Anna A. Fokina^{2✉}, Dmitriy K. Makarov³

^{1,2,3}Joint Stock Company «Precision Instruments Systems», Moscow, Russia

¹akentev.alexander@gmail.com

²anna.fokina.mai@gmail.com✉

³dosiaich@yandex.ru

Abstract. The article presents options of construction of the optical retroreflector antenna system (ORAS) for the spacecraft of the high-orbit space complex of the GLONASS system. The options of the construction with various arrangement of orifices, the number of cube corner retroreflectors and other constituent parts were analyzed. The construction requirements for successful leading out as a part of the spacecraft and functioning at the orbit of the 36000 km altitude were considered. Mechanical analysis of the selected ORAS construction was performed. Simulation of the eigenfrequencies impact on the construction parts confirmed the absence of resonance between the constituent parts of the spacecraft and ORAS. Analysis of the stressed-deformed state of the selected ORAS construction revealed that the largest calculated stress in the construction was much less than maximum permissible value, which ensures that the ORAS safety factor is enough for successful leading out of ORAS as a part of the spacecraft on the chosen orbit. Since there are no eigenfrequencies less than 100 Hz in the construction, the level of the sinusoidal impact amplitude is equal to the level of the amplitude of the quasi-static impact. All simulations proved that calculated safety factor is enough for ORAS to be successfully launched out on chosen orbit as a part of GLONASS spacecraft by launch vehicle.

Keywords: spacecraft GLONASS, optical retroreflector antenna system, eigenfrequencies, mechanical analysis

For citation: Akentyev A.S., Fokina A.A., Makarov D.K. Mechanical analysis for optical retroreflector antenna system for high-orbit segment of GLONASS navigation system. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-02](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-02)

Введение

В настоящее время АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева разрабатывает новый высокоорбитальный космический аппарат (КА) «Глонасс-ВКК» космического комплекса системы ГЛОНАСС, который будет функционировать на орбите со средней высотой 36000 км и наклоном 64,8 градусов. Введение в состав космического комплекса шести высокоорбитальных КА «Глонасс-ВКК» повысит точность определения местоположения потребителя на 25% [1].

Для калибровки радиотехнических средств все существующие навигационные КА «Глонасс» оснащают ретрорефлекторными панелями, состоящими из оптических деталей – уголкового отражателя [2-5]. Назначение таких систем состоит в отражении луча наземной квантово-оптической станции (КОС) в направлении на приемный телескоп КОС.

На сегодняшний день коллектив АО «НПК «СПП» разрабатывает оптическую ретрорефлекторную антенную систему для высокоорбитального КА «Глонасс-ВКК» (ОРАС-ВКК). Одним из основных критериев разработки ОРАС-ВКК является устойчивость конструкции к механическим воздействиям, действующим на ОРАС-ВКК на участке выведения космического аппарата на орбиту.

Целью настоящей работы является проведение механического анализа оптической ретрорефлекторной антенной системы для высокоорбитального космического аппарата космического комплекса системы ГЛОНАСС и подтверждение правильности разработки конструктивных решений ОРАС-ВКК.

Варианты конструкций оптической ретрорефлекторной антенной системы

Исходными данными при разработке конструкции ОРАС-ВКК являлись:

1. В составе ОРАС-ВКК должно быть не меньше 950 уголкового отражателей для выполнения требований по достижению необходимых энергетических характеристик отраженного от ОРАС-ВКК излучения.
2. Масса ОРАС-ВКК должна быть меньше 7 кг.
3. Габаритные размеры ОРАС-ВКК определяются зоной размещения на КА «Глонасс-ВКК».
4. Составные части ОРАС-ВКК и ОРАС-ВКК в сборке не должны иметь собственных частот меньше 150 Гц.
5. Материалы ОРАС-ВКК должны обладать радиационной стойкостью для выполнения требований по сроку активного существования изделия (не меньше 10 лет) [6].
6. Конструкция ОРАС-ВКК должна быть устойчива к механическим нагрузкам, действующим на изделие при выводе КА «Глонасс-ВКК» на орбиту.

При разработке ретрорефлекторных систем особое внимание следует уделить креплению уголковых отражателей (УО) к металлическому основанию. Способ крепления УО к основанию определяется габаритами и массой УО [7, 8, 9, 10]. В ОПАС-ВКК применяются уголковые отражатели со световым диаметром 14 мм. (см. рис. 1). Габаритный диаметр УО равен 16 мм. Основание ОПАС-ВКК выполнено из алюминиевого сплава, который обеспечивает необходимую жесткость конструкции изделия и выполнение требования по ограничению массы. Для установки УО в основание ОПАС-ВКК выполнены углубления диаметром 16 мм. В целях компенсации термических напряжений, возникающих между УО и основанием при облучении ОПАС-ВКК Солнцем, каждый УО ОПАС-ВКК клеивается в кольцо из титана эпоксидным клеем, которое в свою очередь клеивается в основание ОПАС-ВКК.

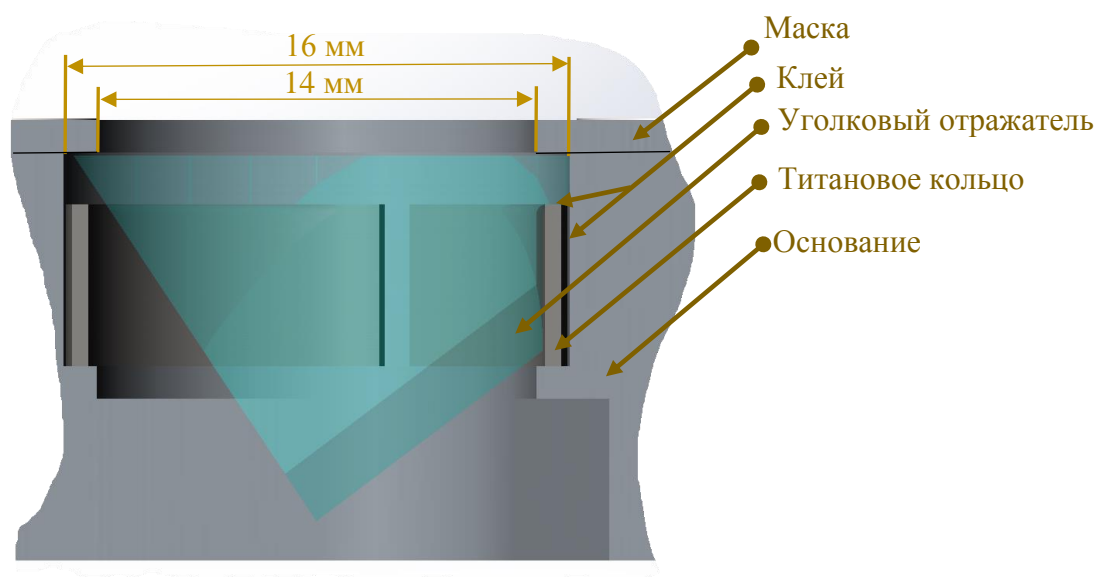
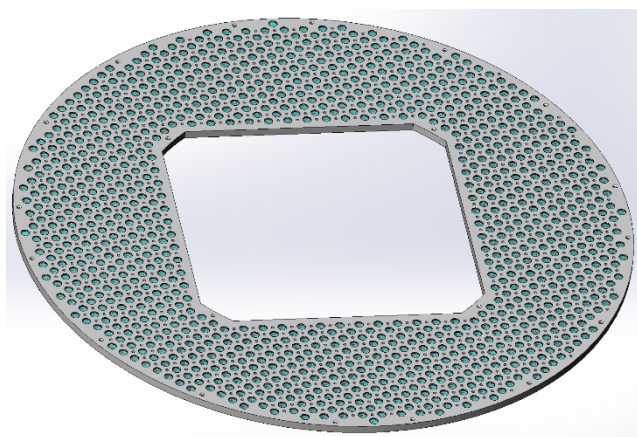
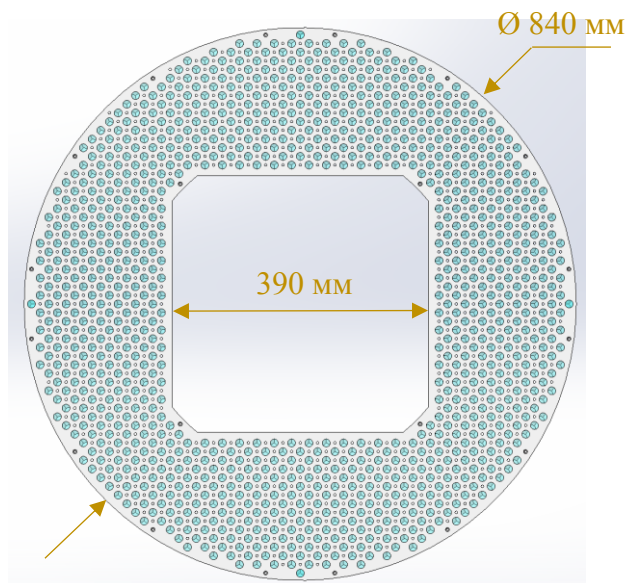


Рисунок 1 – Крепление уголкового отражателя к основанию ОПАС-ВКК

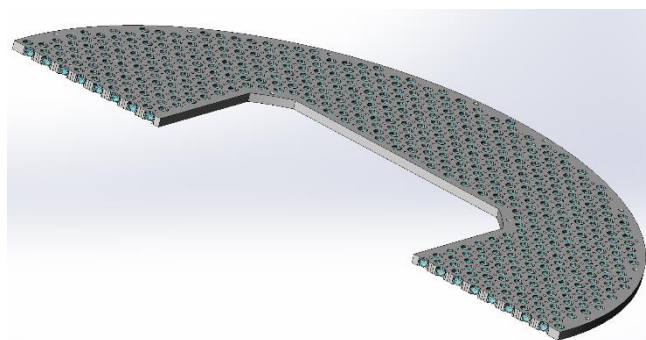
Первый вариант конструкции ОРАС-ВКК состоит из цельного основания диаметром 840 мм (рис. 2). В центральной области основания выполнено прямоугольное отверстие 390 х 390 мм для установки радиоантенн КА «Глонасс-ВКК». Масса ОРАС-ВКК в таком варианте исполнения равна 8,2 кг. Количество уголковых отражателей – 970 штук.



а)



б)



г)

Рисунок 2 – Первый вариант конструкции ОРАС-ВКК:

а – общий вид, б – вид сверху, в – вид в разрезе

Второй вариант конструкции ОРАС-ВКК (рис. 3) состоит из четырех одинаковых сегментов, которые в сборке на посадочной плоскости КА «Глонасс-ВКК» образуют восьмиугольник с описанной окружностью диаметром 810 мм. В центре ОРАС-ВКК располагается прямоугольное отверстие размером 292 x 292 мм. Масса изделия равна 7,8 кг. Количество уголкового отражателя – 1000 штук.

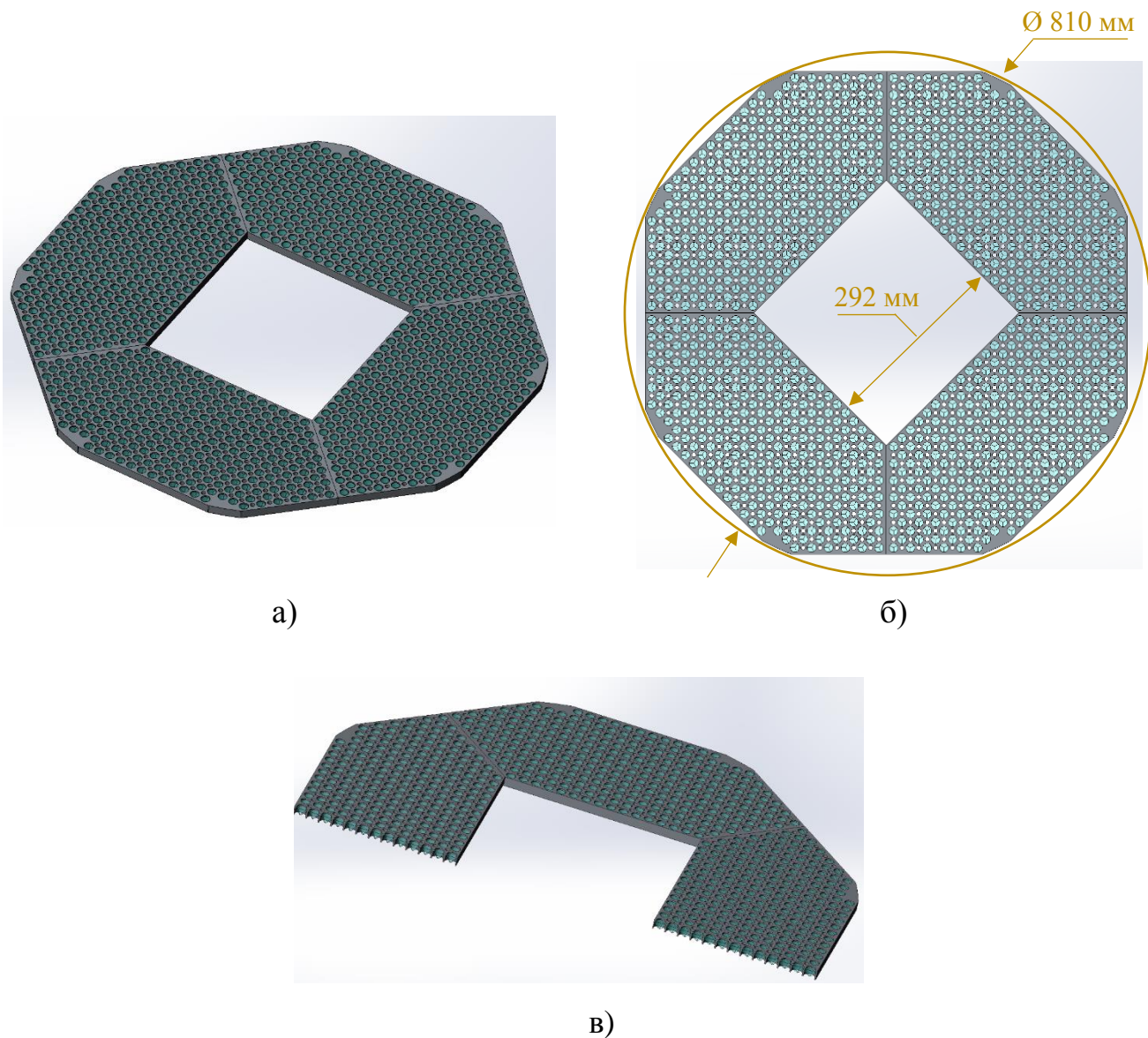
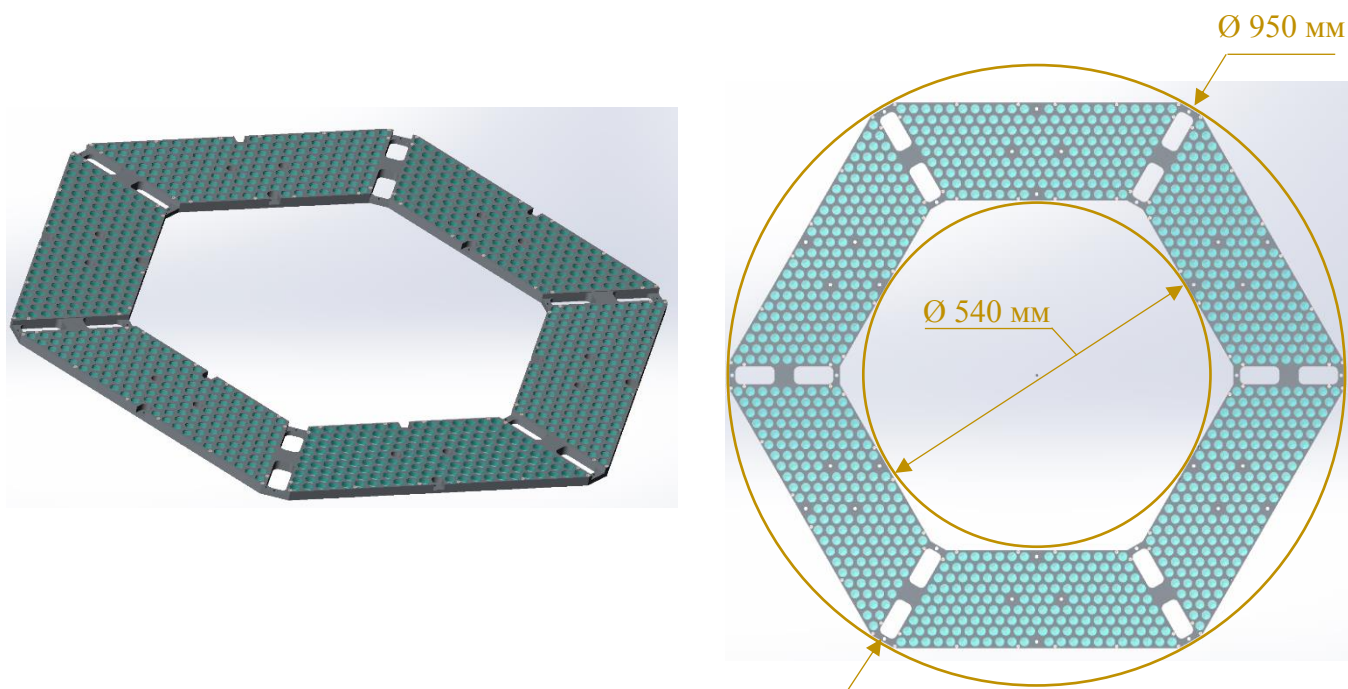


Рисунок 3 – Второй вариант конструкции ОПАС-ВКК:

а – общий вид, б – вид сверху, в – вид в разрезе

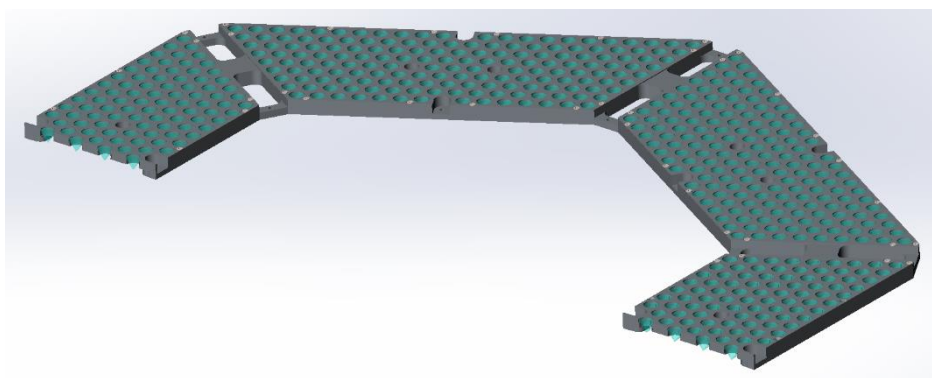
Третий вариант конструкции ОПАС-ВКК состоит из шести одинаковых трапециевидных сегментов из 167 УО (рис. 4), которые установлены в шестиугольном цельном основании. Общее количество УО в изделии – 1002 штуки. Габаритные размеры ОПАС-ВКК ограничены описанной окружностью радиусом 490 мм и вписанной окружностью радиусом 250 мм. Масса изделия равна 6,5 кг. Для исключения значительного нагрева Солнцем поверхности основания ОПАС-ВКК и

уменьшения термических напряжений между УО, титановым кольцом и основанием на каждый сегмент ОРАС-ВКК установлена маска из алюминиевого сплава, на поверхность которой нанесена эмаль с высоким коэффициентом диффузного отражения.



а)

б)



в)

Рисунок 4 – Третий вариант конструкции ОРАС-ВКК:

а – общий вид, б – вид сверху, в – вид в разрезе

В результате анализа можно сделать вывод, что в третьем варианте конструкции ОПАС-ВКК использовано максимальное количество уголковых отражателей с минимальной площадью поверхности, которое занимает алюминиевое основание ОПАС-ВКК. Это обеспечивается геометрией каждого из шести трапецевидных сегментов ОПАС-ВКК у которых угол при вершинах равен 60° или 120° . Расположение УО в таких сегментах позволяет на заданную посадочную плоскость ОПАС-ВКК установить максимально возможное количество уголковых отражателей и, тем самым, улучшить энергетические характеристики изделия при минимальной массе.

Наиболее предпочтительным вариантом конструкции ОПАС-ВКК, который обладает меньшей массой и большим количеством уголковых отражателей является третий вариант. Далее механический анализ представлен для третьего варианта исполнения ОПАС-ВКК.

Механический анализ ОПАС-ВКК

Определим собственные частоты критичных элементов конструкции ОПАС-ВКК. Задачей проведения анализа собственных частот является подтверждение отсутствия собственной частоты менее 150 Гц. Определим собственные частоты элементов ОПАС-ВКК, которые соединены друг с другом винтовым соединением или крепятся к посадочной плоскости КА «Глонасс-ВКК». Таким элементом ОПАС-ВКК является маска, которая крепится винтами к каждому

сегменту основания отражателей ОРАС-ВКК. Точки крепления маски показаны на рисунке 4.

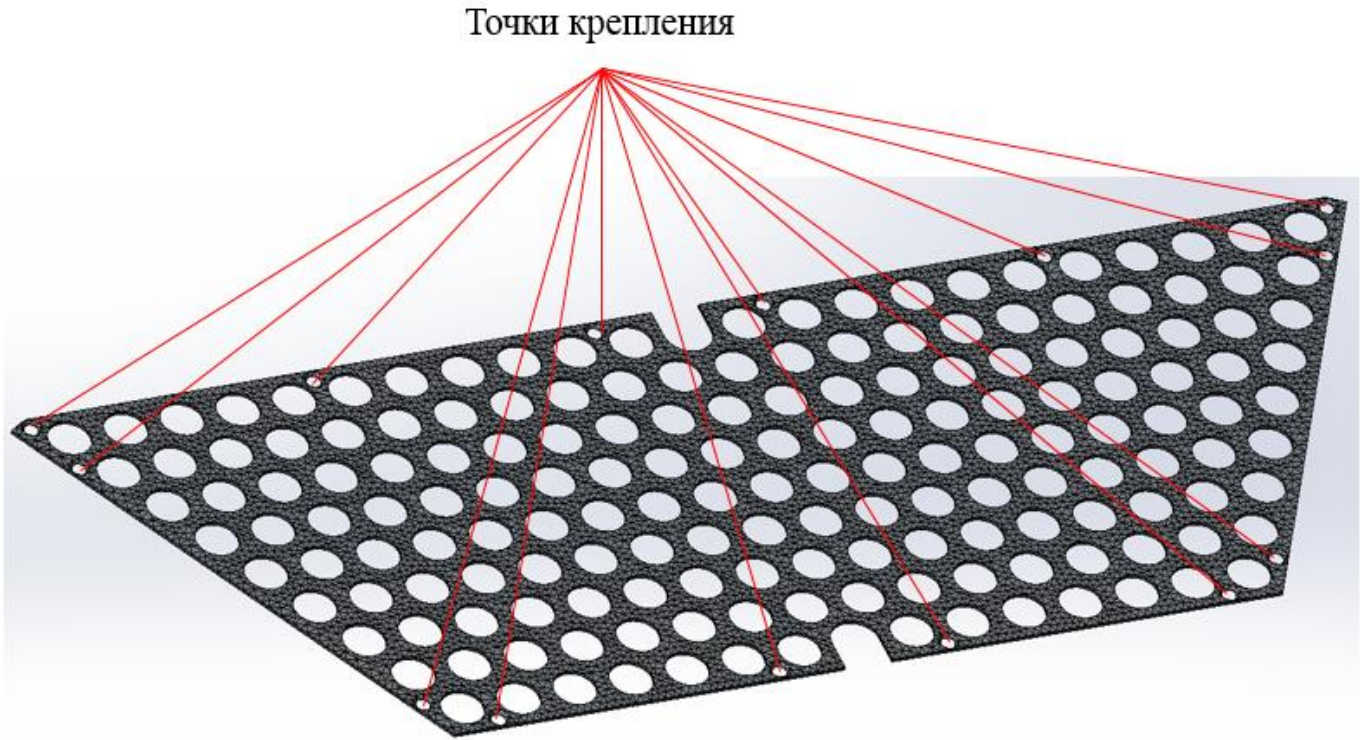


Рисунок 4 – Расположение точек крепления на маске

Результаты расчета собственных частот маски представлены на рисунке 5.

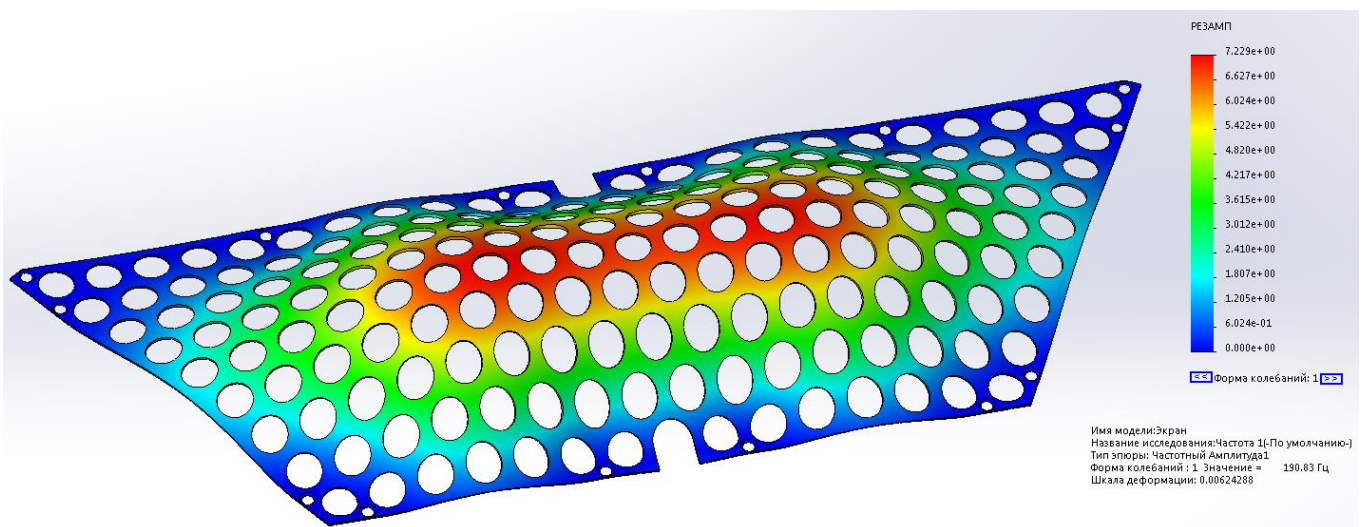


Рисунок 5 – Результаты расчета собственных частот маски

В результате расчета установлено, что собственная частота колебаний маски равна 190,3 Гц, что подтверждает отсутствие собственных частот меньше 150 Гц в детали.

ОРАС-ВКК крепится к космическому аппарату титановыми болтами. Количество и расположение точек крепления были выбраны исходя из предварительных расчетов собственных частот конструкции, которые показали, что расположение креплений в центре каждого из шести трапециевидных сегментов позволяют достичь необходимой жесткости конструкции и предупредить наличие собственных частот с величиной менее 150 Гц [11, 12]. Расположение точек крепления показано на рисунке 6.

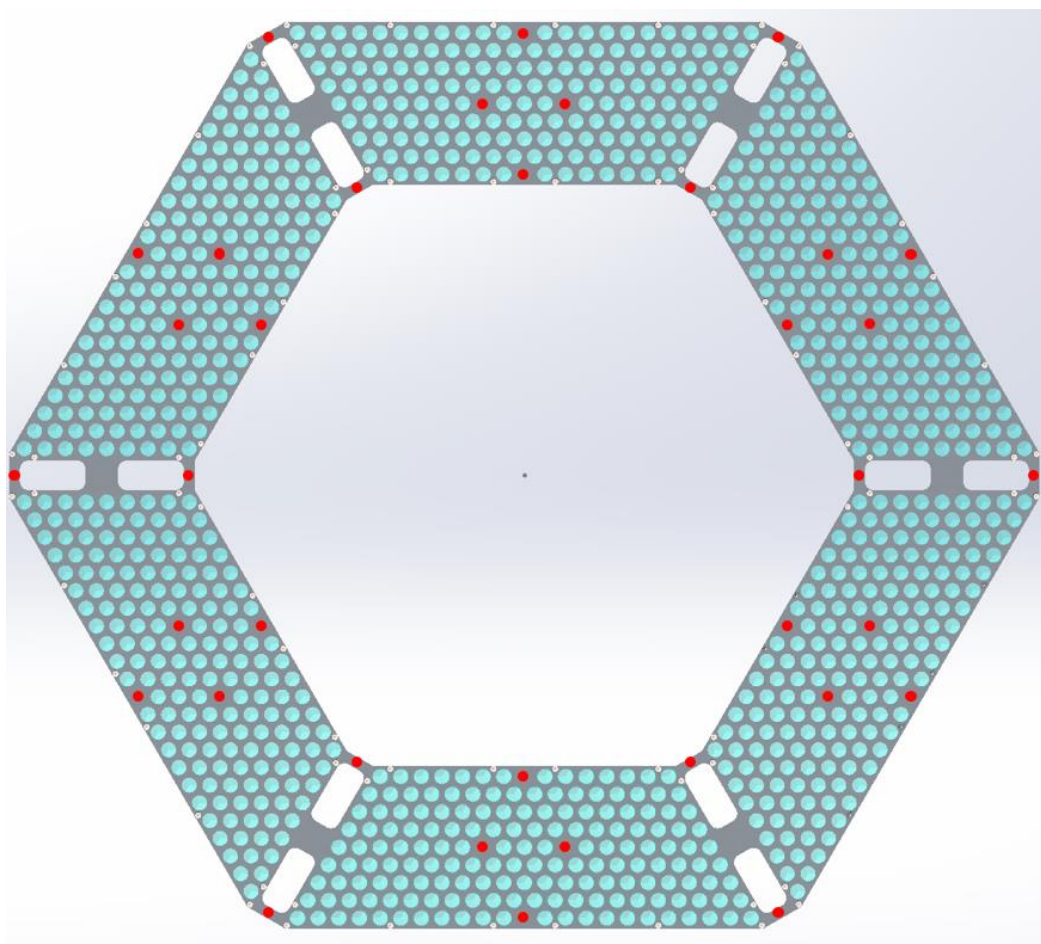


Рисунок 6 – Расположение точек крепления ОРАС-ВКК

В результате расчета собственных частот конструкции с данным расположением точек крепления было установлено, что первая собственная частота ОРАС-ВКК равна 701,84 Гц, что удовлетворяет требованиям по отсутствию частот ниже 150 Гц в изделии и его составляющих. Расчет собственных частот конструкции в сборке представлен на рисунке 7.

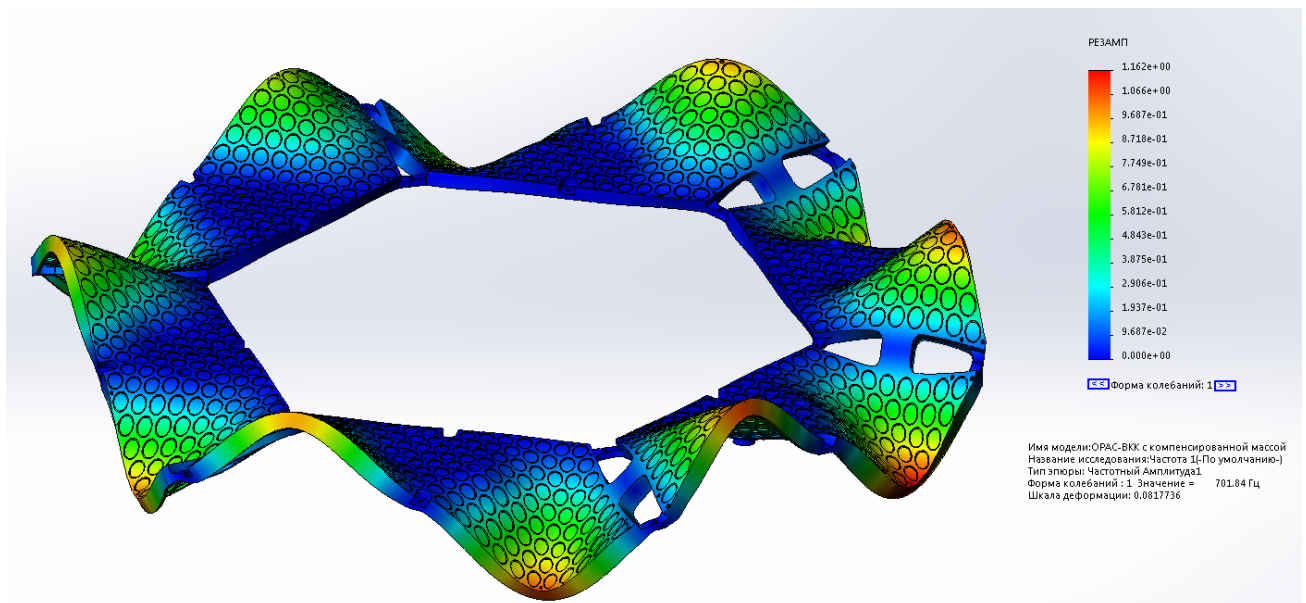


Рисунок 7 – Первая собственная частота ОРАС-ВКК

Для подтверждения стойкости ОРАС-ВКК к механическим нагрузкам, действующим на изделие при выводе КА на орбиту ракетоносителем Союз 2.1б, определим стойкость конструкции к квазистатическим нагрузкам (линейным ускорениям). Исходными данными определена максимальная величина линейного ускорения $162,2 \text{ м/с}^2$, которая действует в направлении, перпендикулярном плоскости крепления, и величина линейного ускорения $129,71 \text{ м/с}^2$, которая действует в направлении параллельно плоскости крепления. Оптическая ретрорефлекторная антенная система должна выдерживать данные нагрузки в

течение 5 минут. Результаты расчета квазистатических нагрузок представлены на рисунке 8.

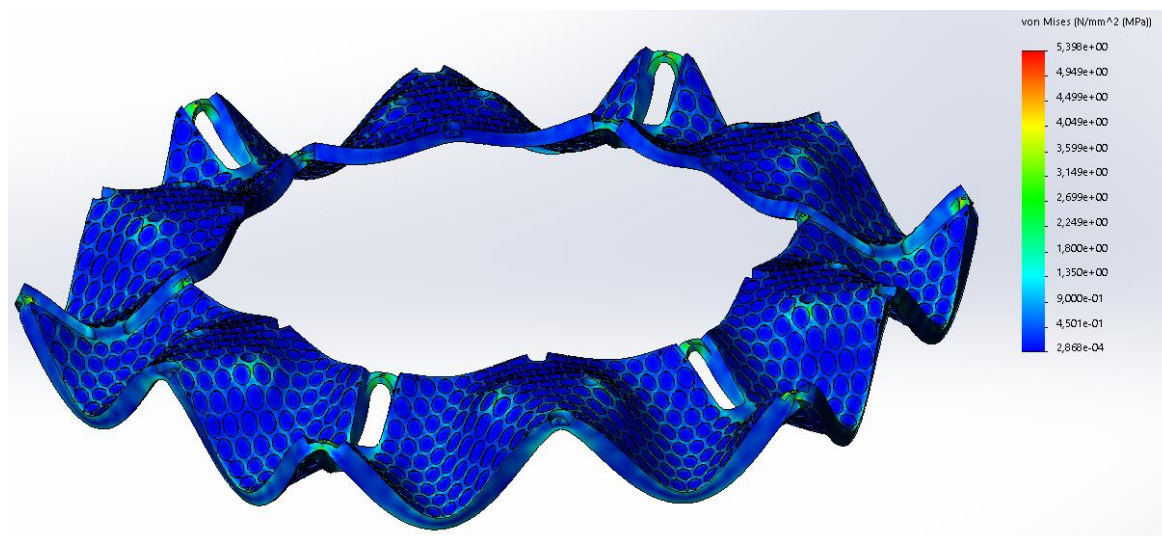


Рисунок 8 – Распределение напряжений в конструкции ОРАС-ВКК при воздействии квазистатических нагрузок

Анализ воздействия линейных ускорений показал, что наибольшее механическое напряжение возникает в местах крепления ОРАС-ВКК к КА и вблизи угловых отражателей.

Коэффициенты запаса прочности и расчетные напряжения в элементах конструкции ОРАС-ВКК представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент запаса прочности элементов конструкции ОРАС-ВКК

Наименование детали	Материал	Допустимое напряжение	Расчетное напряжение	Коэффициент запаса прочности
Основание (ложемент)	АМГ6	130 МПа	5,4 МПа	29
Опорное кольцо	ВТ1-0	140 МПа	10,0 МПа	14,0
Маска	АМГ6	130 МПа	15,5 МПа	10

В результате анализа воздействия линейных ускорений установлено, что ОРАС-ВКК и входящие в ее состав элементы имеют значительный запас прочности к внешнему воздействию [13, 14, 15].

Воздействие синусоидальной вибрации, действующей при выводе КА на орбиту ракетоносителем Союз 2.1б, определена частотным диапазоном от 5 до 100 Гц. Так как у элементов конструкции отсутствуют собственные частоты ниже 150 Гц, уровень синусоидального воздействия равен уровню квазистатического воздействия [16, 17, 18]. Таким образом, можно утверждать, что запас прочности ОРАС-ВКК достаточен для сохранения целостности конструкции в процессе выведения на орбиту и эксплуатации [19].

Результаты механического анализа предварительно подтвердили стойкость конструкции ОРАС-ВКК к воздействию механических нагрузок и целесообразность конструктивных решений. На последующем этапе создания ОРАС-ВКК планируется проведение наземной экспериментальной отработки изделия, которая включает испытания ОРАС-ВКК на стойкость к механическим воздействиям.

Заключение

1. В результате анализа разных вариантов исполнения ОРАС-ВКК определена наиболее подходящая конструкция, в которой располагаются максимальное количество уголковых отражателей при наименьшей массе изделия.

2. Расчет собственных частот маски и основания ОРАС-ВКК подтвердил отсутствие резонансных частот изделия на частоте меньше 150 Гц и возможность установки ОРАС-ВКК на КА «Глонасс-ВКК».

3. В результате прочностного расчета подтверждена резистентность конструкции ОРАС-ВКК к внешним механическим воздействиям, соответствующим нагрузкам, действующим на КА при его запуске ракетопосителем Союз 2.1б [2].

4. Теоретические исследования стойкости ОРАС-ВКК к механическим нагрузкам будут подтверждены испытаниями на следующем этапе создания изделия.

Список источников

1. Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Анализ особенностей технической реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса системы ГЛОНАСС // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2019. № 2. С. 85-95. DOI: [10.18698/2308-6033-2019-2-1848](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1848)
2. Соколов А.Л., Мурашкин В.В., Акентьев А.С., Карасева Е.А. Угловые отражатели с интерференционным покрытием // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 9. С. 795–799.
3. Соколов А.Л., Акентьев А.С., Ненадович В.Д. Космические ретрорефлекторные системы // Светотехника. 2017. Т. 19. № 4. С. 19–23.
4. Рой Ю.А., Садовников М.А., Шаргородский В.Д. Сеть лазерной дальнометрии — основа улучшения геодезического и эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС // 6 международный симпозиум «Метрология времени и пространства» (Менделеево, 17–19 сентября 2012): тезисы докладов. – Менделеево: ВНИИ ФТРИ, 2013. С. 50–54.
5. Васильев В.П., Шаргородский В.Д. Прецизионная спутниковая дальнометрия на основе лазеров с высокой частотой повторения импульсов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 7. С. 6–10.
6. Воронина Е.А., Курятов В.Н. Радиационная оптическая устойчивость кварцевого стекла // Научное приборостроение. 2001. Т. 11. № 1. С. 40-46.
7. Малетин А.Н., Глущенко А.А., Мишина О.А. Исследование возможностей современных космических средств по мониторингу объектов в околоземном

- космическом пространстве // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170351>. DOI: 10.34759/trd-2022-127-21
8. Сгадова Н.А., Струлев И.М. Анализ формы отражающей поверхности параболической антенны деформированной под действием весовой нагрузки // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14168>
9. Соколов А.Л., Акентьев А.С., Першин А.В., Садовников М.А., Союзова Н.М., Шаргородский В.Д. Ретрорефлекторная сферическая система. Патент № 2616439 РФ, МПК G02B 5/124 (2006/01), опубл. 14.04.2017.
10. Акентьев А.С., Ненадович В.Д., Соколов А.Л., Садовников М.А., Шаргородский В.Д. Анализ точностных и энергетических характеристик кольцевой ретрорефлекторной системы // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 2. С. 37–45.
11. Герасимчук В.В., Жиряков А.В., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П. Расчётно-экспериментальный метод учёта системы обезвешивания при анализе собственных частот и форм колебаний // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168184>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-12
12. Коровайцева Е.А. Об обеспечении точности решения задач модального анализа // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96401>
13. Оконечников А.С., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Обобщенные функции в механике деформируемого твердого тела. Основы теории: Учеб. пособие. - М.: Изд-во МАИ, 2019. - 100 с.

14. Лобастов И.А., Палешкина Ю.В., Алексеева Н.Н., Палешкин А.В. Выбор проектных параметров центробежного стенда при квазистатико-колебательном нагружении испытуемого объекта // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102240>
15. Никонов К.П. Расчет в среде SolidWorks механических воздействий на датчик давления для испытательного оборудования авиационной техники // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=44466>
16. Потанин Д.В., Самохин П.А., Зелёный А.Е., Яковлев И.М., Самохина Е.А. Компьютерное моделирование ударных воздействий на консоли летательного аппарата с учетом нелинейных свойств материалов // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164180>. DOI: 10.34759/trd-2022-122-06
17. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161425>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-11
18. Вербицкий А.Б., Родионов Г.Л., Сидоренко А.С. Математическое моделирование вибродинамического состояния конструкций авиационных изделий в условиях их применения // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 1. С. 35-42.

19. Хмельницкий Я.А., Салина М.С., Катаев Ю.П. Прочностной расчет панелей солнечных батарей космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 17-24.
20. Михалёв С.М. Адаптация аэрокосмической системы к выведению спутников на высокоэнергетические орбиты // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105690>

References

1. Meshcheryakov V.M., Braginets V.F., Sukhoi Yu.G. *Inzhenernyi zhurnal: Nauka i innovatsii*, 2019, no. 2, pp. 85-95. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1848
2. Sokolov A.L., Murashkin V.V., Akent'ev A.S., Karaseva E.A. *Kvantovaya elektronika*, 2013, vol. 43, no. 9, pp. 795–799.
3. Sokolov A.L., Akent'ev A.S., Nenadovich V.D. *Svetotekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 19–23.
4. Roi Yu.A., Sadovnikov M.A., Shargorodskii V.D. *6 mezhdunarodnyi simpozium «Metrologiya vremeni i prostranstva»: tezisy dokladov*. Mendeleevo, VNII FTRI, 2013, pp. 50–54.
5. Vasil'ev V.P., Shargorodskii V.D. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2007, no. 7, pp. 6–10.
6. Voronina E.A., Kuryatov V.N. *Nauchnoe priborostroenie*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 40-46.

7. Maletin A.N., Glushchenko A.A., Mishina O.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170351>. DOI: 10.34759/trd-2022-127-21
8. Sgadova N.A., Strulev I.M. *Trudy MAI*, 2010, no. 38. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14168>
9. Sokolov A.L., Akent'ev A.S., Pershin A.V., Sadovnikov M.A., Soyuzova N.M., Shargorodskii V.D. *Patent № 2616439 RF*, MPK G02B 5/124 (2006/01), 14.04.2017.
10. Akent'ev A.S., Nenadovich V.D., Sokolov A.L., Sadovnikov M.A., Shargorodskii V.D. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 37–45.
11. Gerasimchuk V.V., Zhiryakov A.V., Kuznetsov D.A., Telepnev P.P. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168184>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-12
12. Korovaitseva E.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96401>
13. Okonechnikov A.S., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. *Obobshchennye funktsii v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela. Osnovy teorii* (Joint functions in the mechanics of the deforming solid body. Basis of the theory), Moscow, Izd-vo MAI, 2019, 100 p.
14. Lobastov I.A., Paleshkina Yu.V., Alekseeva N.N., Paleshkin A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102240>
15. Nikonov K.P. *Trudy MAI*, 2013, no. 70. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=44466>

16. Potanin D.V., Samokhin P.A., Zelenyi A.E., Yakovlev I.M., Samokhina E.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164180>. DOI: 10.34759/trd-2022-122-06
17. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161425>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-11
18. Verbitskii A.B., Rodionov G.L., Sidorenko A.S. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 35-42.
19. Khmel'nitskii Ya.A., Salina M.S., Kataev Yu.P. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 17-24.
20. Mikhalev S.M. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105690>

Статья поступила в редакцию 31.01.2023

Одобрена после рецензирования 12.05.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 31.01.2023; approved after reviewing on 12.05.2023; accepted for publication on 27.06.2023