



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317

УДК 629.783

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛИКА РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

А.Д. Новиков, П.В. Просунцов, С.В. Резник

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

В данной статье описаны поисковые исследования оптимальных конструкторско-технологических решений сверхлегкого рефлектора зеркальной космической антенны из углепластика. Исследования включали в себя конечно-элементное моделирование температурного и напряженно-деформированного состояния рефлектора на геостационарной орбите. В результате сравнения результатов моделирования для ряда вариантов рефлектора выбрана конструкция, с минимальными значениями температурных перемещений и погонной плотности.

**Ключевые слова:** рефлектор зеркальной космической антенны, конечно-элементное моделирование, конструктивно-компоновочная схема, композиционный материал

Рефлекторы зеркальных космических антенн (РЗКА) диаметром до 3 м представляют собой параболические оболочки открытого профиля, основным конструкционным материалом которых служит углепластик. Современные тенденции в области развития систем космической связи указывают на необходимость снижения погонной плотности конструкции РЗКА до значений, не превышающих  $2 \text{ кг/м}^2$ , и увеличения рабочей частоты антенн, что, в свою очередь, повышает требования к размеростабильности. Так, для бортовой антенны межспутниковой связи, работающей на частоте 60 ГГц, соответствующие предельные отклонения профиля не должны превышать 0,1 мм.

Различные варианты РЗКА можно отнести к следующим конструктивно-компоновочным схемам: трехслойная с сотовым наполнителем, с кольцевым ободом, с реберным подкреплением, комбинированная.

Отличительная особенность трехслойных схем — наличие сотового наполнителя из алюминия или композиционных материалов (КМ) между оболочками из КМ, чаще всего из углепластика (рис. 1).

Данная схема обеспечивает высокую жесткость конструкции, но отличается сравнительно высокой погонной плотностью ( $2,29 \text{ кг/м}^2$  для РЗКА диаметром 1,2 м) [1].

В схеме с кольцевым ободом постоянной или переменной ширины одна из накрывающих обод сплошных или сетчатых поверхностей используется для отражения радиоволн (рис. 2).

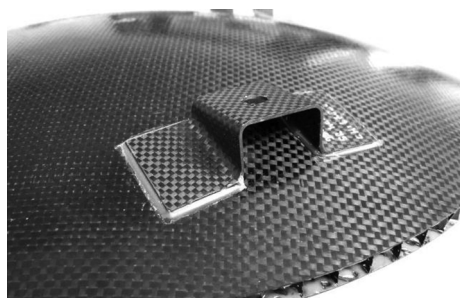
Созданные по этой схеме в HPS GmbH опытные модели РЗКА имеют диаметр 1,2 м. Антенна работает в Ku-/Ka-диапазонах. Масса конструкции составляет 4,3 кг, таким образом, погонная плотность превышает  $3,5 \text{ кг/м}^2$  [2], что больше значения конструкций с сотовым заполнителем.

Для повышения размеростабильности и снижения погонной плотности перспективным может быть использование конструкций с реберным подкреплением. Пример такого подхода — рефлектор, созданный в ЗАО «Пластик» (рис. 3) [3].

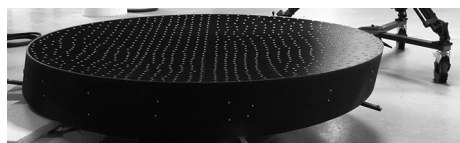
В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводились работы по проектированию, изготовлению и испытанию рефлекторов с реберным подкреплением [4], результатом которых стал РЗКА с погонной плотностью  $2,5 \text{ кг/м}^2$  (рис. 4) [5–14].

Для снижения погонной плотности конструкции с реберным подкреплением необходимо оптимизировать геометрию расположения ребер, а также толщину элементов. Как было показано в работах [15; 16], схемы с подкреплением «пятиконечная звезда» и «шестиугольная звезда» (рис. 5) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкции РЗКА. Однако не были определены оптимальные значения геометрических характеристик: высоты ребер, толщины ребер, толщины оболочки.

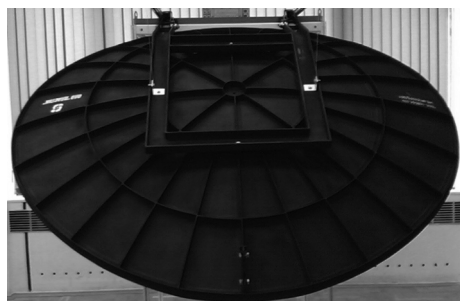
Геометрические характеристики (табл. 1), использовались для проведения конечно-элементного моделирования температурного и напряженно-деформированного состояния конструкции рефлектора при функционировании на геостационарной орбите. Моделирование проводилось в программном пакете Siemens NX PLM Software с помощью решателей NX Nastran и Space System Analysis. Вариантам были присвоены условные обозначения (табл. 1).



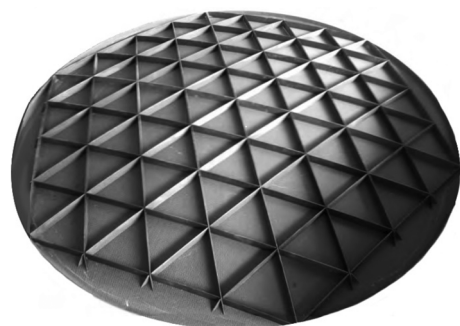
**Рис. 1.** РЗКА трехслойной схемы с сотовым заполнителем из углепластика, HPS GmbH (Германия)



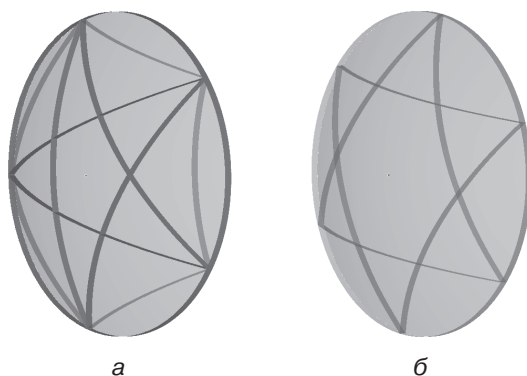
**Рис. 2.** Рефлектор с кольцевым ободом HPS GmbH (Германия)



**Рис. 3.** Экспериментальный РЗКА с радиальными и кольцевыми ребрами, ЗАО «Пластик» (Россия)



**Рис. 4.** Экспериментальный РЗКА с изогридной системой ребер, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия)



**Рис. 5.** Рефлекторы с реберным подкреплением по схеме: *а* — «пятиконечная звезда»; *б* — «шестиконечная звезда»

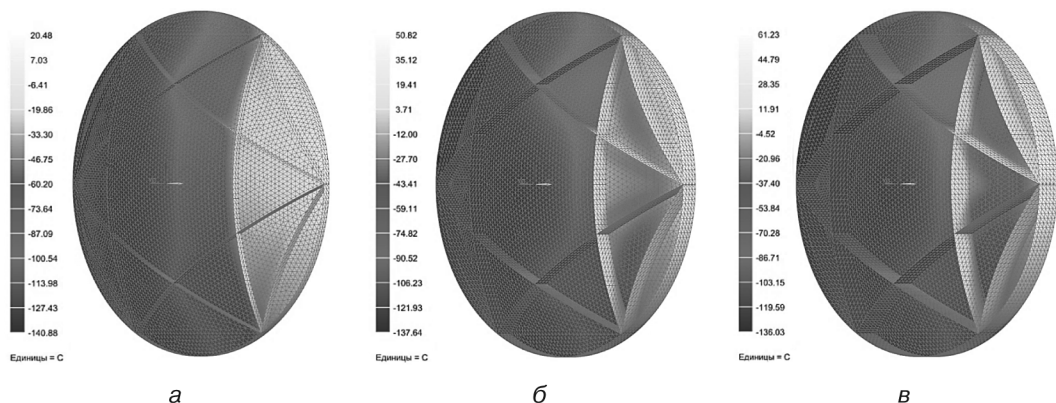
Таблица 1

**Вариации геометрических характеристик РЗКА**

Условное обозначение	Схема	Высота ребер, мм	Толщина ребер, мм	Толщина оболочки, мм
МР-6	Шестиконечная звезда	25	1,2	0,6
СР-6	Шестиконечная звезда	60	0,6	0,6
БР-6	Шестиконечная звезда	90	0,6	0,4
БР-5	Пятиконечная звезда	90	0,6	0,4
СР-5	Пятиконечная звезда	53	0,6	0,6

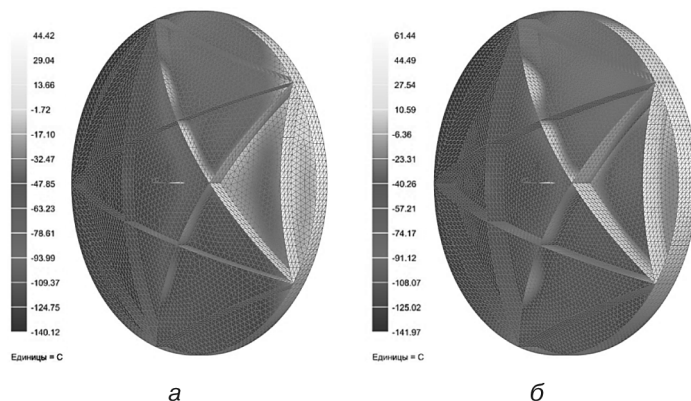
Геометрические характеристики выбирались из расчета подобной погонной массы для всех вариантов, не превосходящей  $1,7 \text{ кг/м}^2$ .

По итогам моделирования температурного состояния РЗКА при сравнительном анализе рассматривался момент, соответствующий повороту космического аппарата на  $150^\circ$  относительно оси Земля-Солнце, который характеризуется наибольшим перепадом температур при работе на геостационарной орбите. На рисунке 6 представлены распределения температур для трех вариантов геометрических характеристик схемы «шестиконечная звезда».



**Рис. 6.** Распределение температур по поверхности рефлектора с подкреплением по схеме «шестиконечная звезда» для вариантов: *а* — МР-6; *б* — СР-6; *в* — БР-6

На рисунке 7 представлены распределения температур для двух вариантов геометрических характеристик схемы «пятиконечная звезда».



**Рис. 7.** Распределение температур по поверхности рефлектора с подкреплением по схеме «шестиконечная звезда» для вариантов: а — СР-5; б — БР-5

В таблице 2 представлены результаты моделирования теплового состояния всех вариантов конструкций.

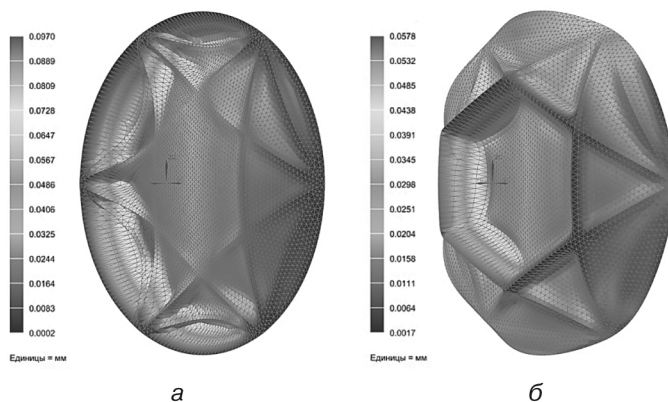
Таблица 2

**Распределение температур в схемах с оребрением «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда»**

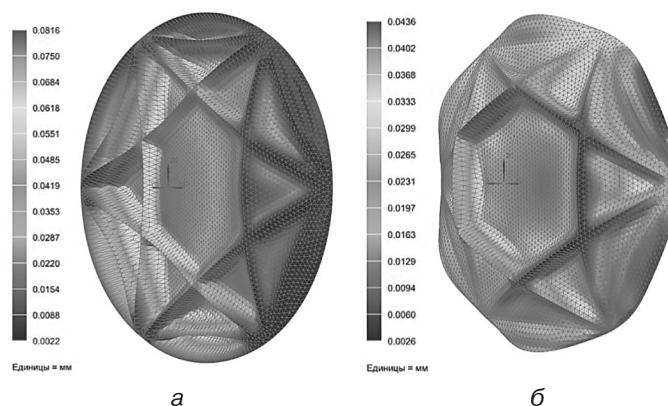
Условное обозначение варианта	Схема	Максимальная температура, °С	Минимальная температура, °С
МР-6	Шестиконечная звезда	20,48	-140,88
СР-6	Шестиконечная звезда	50,82	-137,64
БР-6	Шестиконечная звезда	61,23	-136,03
БР-5	Пятиконечная звезда	44,42	-140,12
СР-5	Пятиконечная звезда	61,44	-141,97

Данные теплового моделирования использовались как начальные условия для определения перемещений конструкций, вызванных нагревом поверхности. Для проведения моделирования напряженно-деформированного состояния необходимо определить метод закрепления РЗКА на борту космического аппарата. Установлено, что добиться наименьших перемещений конструкции возможно при закреплении рефлектора за внешний обод (круговое закрепление) и за внутренний многоугольник (центр).

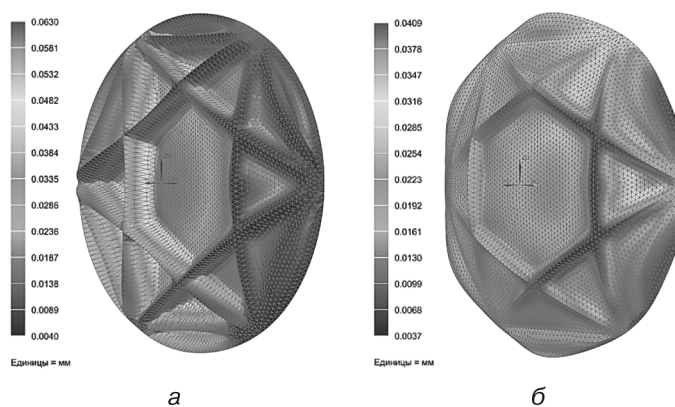
Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рефлектора для схем «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда» представлены на рисунках 8–12.



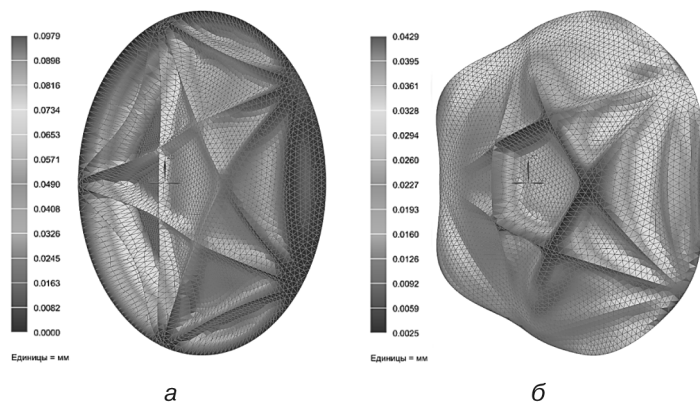
**Рис. 8.** Температурные перемещения варианта МР-6 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



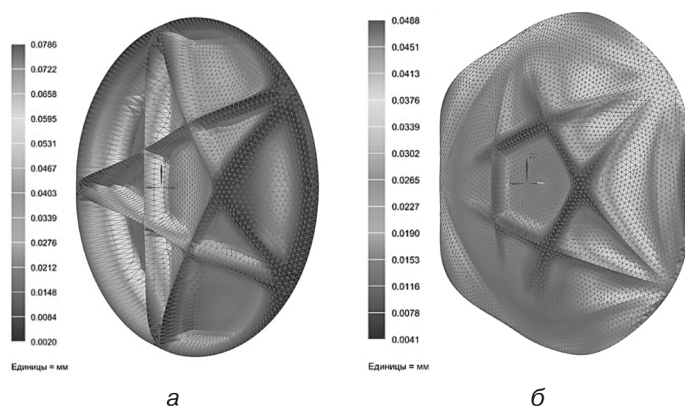
**Рис. 9.** Температурные перемещения варианта СР-6 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



**Рис. 10.** Температурные перемещения варианта БР-6 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



**Рис. 11.** Температурные перемещения варианта СР-5 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



**Рис. 12.** Температурные перемещения варианта БР-5 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)

В таблице 3 представлены данные по температурным перемещениям всех вариантов схем «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда».

Таблица 3

**Температурные перемещения различных схем и вариантов**

Условное обозначение варианта	Закрепление	Перемещения, мм
БР-6	Круговое закрепление	0,063
	Центр	0,041
СР-6	Круговое закрепление	0,082
	Центр	0,044
МР-6	Круговое закрепление	0,097
	Центр	0,058
БР-5	Круговое закрепление	0,079
	Центр	0,049
СР-5	Круговое закрепление	0,098
	Центр	0,043

Как видно из таблицы 3, наименьшие значения деформаций показывает схема оребрения «шестиконечная звезда» с высотой ребер 90 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Reflector Antennas [Электронный ресурс] // HPS GmbH. [сайт]. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/>
- [2] *Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M.* A new concept for dual gridded reflector // Proceed. 4-th European Conf. on Antenna and Microwave Propagation (EuCAP) (12—16 April 2010, Barcelona, Spain). 5 p.
- [3] *Биткина Е.В., Денисов А.В., Биткин В.Е.* Конструктивно-технологические методы создания размеростабильных космических композитных конструкций интегрального типа // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-2. С. 555—560.
- [4] *Вечтомов В.А., Зимин В.Н., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А.* Бортовая многолучевая антенна Ка-диапазона для зонированного обслуживания территории РФ спутниковой связью с высокоскоростным доступом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», Спец. выпуск № 7 «Радиооптические технологии в приборостроении». 2012. № 7. С. 70—81.
- [5] *Резник С.В.* Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2013. (Труды МГТУ. № 606. С. 295—311).
- [6] *Резник С.В., Денисов О.В., Чуднов И.В.* Основные подходы к формированию программы термовакуумных испытаний прецизионных рефлекторов зеркальных космических антенн // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 8. С. 167—184.
- [7] *Михайловский К.В., Резник С.В.* Разработка математико-алгоритмического обеспечения для расчета внутренних напряжений в тонкостенных рефлекторах из углепластика во время технологического процесса их изготовления // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 8. С. 151—166.
- [8] *Reznik S.V.* Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas // Proc. 3-rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (May 13—16, 2013, Wrexham, Nord Wales, UK). P. 7—11.
- [9] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Проектные исследования рефлекторов зеркальных космических антенн с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Матер. 6-го Белорусского космического конгресса (28—30 октября 2014 г., Минск). Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. Т. 1. С. 223—226.
- [10] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674—680.
- [11] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний рефлектора зеркальной космической антенны // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 4. С. 945—950.
- [12] *Reznik S., Prosuntsov P., Timoshenko V., Denisov O., Minakov D., Mikhailovsky K.* Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna // Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (5—9 October 2015, Noordwijk, The Netherlands). 6 p.
- [13] *Reznik S., Prosuntsov P., Azarov A.* Design study of a lightweight reflector for the space antenna // Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (5—9 October 2015, Noordwijk, The Netherlands). 1 p.
- [14] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674—680.
- [15] *Reznik S.V., Novikov A.D.* Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors // МАТЕС Web of Conferences 01012 (2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies, 2016. 5 p.

- [16] *Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D.* Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 153. No. 1. 7 p.

© Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

Для цитирования:

**Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В. Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 3. С. 308–317. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317**

**Сведения об авторах:**

*Новиков Андрей Дмитриевич*, аспирант, ассистент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции». *Сфера научных интересов*: проектирование, производство и испытание космических конструкций из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com

*Просунцов Павел Викторович*, доктор технических наук, профессор кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: моделирование и идентификация тепловых процессов в конструкциях ракет и космических аппаратов. *Контактная информация*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

*Резник Сергей Васильевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: проектирование, производство и испытание конструкций ракетно-космической техники из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: sreznik@bmstu.ru

## **MIRROR SPACE ANTENNA REFLECTOR MADE OF COMPOSITE MATERIALS CONSTRUCTIVE APPEARANCE DETERMINATION**

**A.D. Novikov, P.V. Prosuntsov, S.V. Reznik**

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

This article describes search studies of optimal design and technological solutions for the ultralight mirror space antenna reflectors made of CFRP. The studies included finite element modeling of the reflector temperature and stress-strain state in the geostationary orbit. As a result of comparing the results of a number of reflector variants modeling, a design was chosen, with minimal values of temperature displacements and linear density.

**Key words:** mirror space antenna reflector, finite element simulation, constructive layout, composite material



## REFERENCES

- [1] Reflector Antennas [Internet] // HPS GmbH. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/>
- [2] Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflector. *Proceed. 4-th European Conf. on Antenna and Microwave Propagation (EuCAP) (2010 Apr 12—16; Barcelona, Spain)*. 5 p.
- [3] Bitkina E.V., Denisov A.V., Bitkin V.E. Structural and Technological Methods for Creating Dimensional Space Composite Structures of Integral Typ. *Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 14. No. 4-2. P. 555—560. (In Russ).
- [4] Vechtomov V.A., Zimin V.N., Kuzenkov A.N., Dronov D.V., Kozlov A.A. The onboard multi-beam antenna of the K-band for zoned service of the territory of the Russian Federation by satellite communication with high-speed access. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*. 2012. No. 7. P. 70—81. (In Russ).
- [5] Reznik S.V. Actual problems of design, production and testing of rocket-space composite structures. *Engineering Journal: Science and Innovations*. 2013. No. 606. P. 295—311.
- [6] Reznik S.V., Denisov O.V., Chudnov I.V. Basic approaches to the formation of the program of thermovacuum tests of precision reflectors of mirror cosmic antennas. *Science and education: electronic scientific and technical publication*. 2013. No. 8. P. 167—184. (In Russ).
- [7] Mikhailovsky K.V., Reznik S.V. Development of mathematical and algorithmic support for the calculation of internal stresses in thin-walled reflectors from carbon plastic during the technological process of their manufacture. *Science and education: electronic scientific and technical publication*. 2013. No. 8. P. 151—166. (In Russ).
- [8] Reznik S.V. Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas. *Proc. 3-rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (2013 May 13—16; Wrexham, Nord Wales, UK)*. P. 7—11.
- [9] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Design studies of reflectors of mirror cosmic antennas with high stability of shape and small line density. *Proc. 6th Belarusian Space Congress (2014 October 28—30; Minsk, Belarus)*. 2014. Vol. 1. P. 223—226. (In Russ).
- [10] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the constructive-layout scheme of the reflector of a mirror cosmic antenna with high shape stability and low linear density. *Journal of Engineering and Physics*. 2015. Vol. 88. No. 3. P. 674—680. (In Russ).
- [11] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Modeling of the temperature and stress-strain states of the reflector of a mirror cosmic antenna. *Journal of Engineering and Physics*. 2015. Vol. 88. No. 4. P. 945—950. (In Russ).
- [12] Reznik S., Prosuntsov P., Timoshenko V., Denisov O., Minakov D., Mikhailovsky K. Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna. *Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (2015 October 5—9; Noordwijk, The Netherlands)*. 6 p.
- [13] Reznik S., Prosuntsov P., Azarov A. Design study of a lightweight reflector for the space antenna. *Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (2015 October 5—9; Noordwijk, The Netherlands)*. 1 p.
- [14] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the constructive-layout scheme of the reflector of a mirror cosmic antenna with high shape stability and low linear density. *Journal of Engineering and Physics*. 2015. Vol. 88. No. 3. P. 674—680. (In Russ).
- [15] Reznik S.V., Novikov A.D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors. *MATEC Web of Conferences 01012(2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies*. 2016. 5 p.
- [16] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D. Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 153. No. 1. 7 p.

**Article history:**

Received: August 2017

Accepted: September 2017

**For citation:**

**Novikov A.D., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. (2017) Mirror space antenna reflector made of composite materials constructive appearance determination. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 308–317. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317**

**Bio Note:**

*Novikov Andrey Dmitrievich*, post graduate student, assistant professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: design, producing and testing of space composite structures *Contact information*: e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com

*Prosuntsov Pavel Viktorovich*, Doctor of Technical Sciences, professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: modeling and identification of thermal processes in rocket and spacecraft structures. *Contact information*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

*Reznik Sergey Vasilyevich*, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: design, producing and testing of rocket and space composite structures. *Contact information*: e-mail: sreznik@bmstu.ru