

УДК 681.62.066.1-026.615:520.224

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-502-509

Для цитирования: Грачева Е. А., Синьковский Ф. К. Метод контроля усилия натяжения металлотрико-тажного сетеполотна на крупногабаритных рефлекторах антенн // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 502–509. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-502-509.

For citation: Gracheva E. A., Sin'kovskiy F. K. [Research of a method based on the local deformation of the metall mesh by the force of air drawn through its surface, for measuring and controlling the tension force of the metall mesh cavity on radio-reflecting reflectors]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 502–509. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-502-509.

Метод контроля усилия натяжения металлотрико-тажного сетеполотна на крупногабаритных рефлекторах антенн

Е. А. Грачева, Ф. К. Синьковский

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «РЕШЕТНЁВ») Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: grachevaea@iss-reshetnev.ru

Приведены некоторые основные параметры сетеполотна, влияющие на радиоотражающие свойства рефлектора, и технология достижения этих параметров с помощью контроля усилия натяжения сетеполотна на различных этапах изготовления радиоотражающей поверхности рефлектора. Сделан краткий обзор существующих и применяемых на предприятии АО «РЕШЕТНЁВ» методов измерения и контроля усилия натяжения сетеполотна рефлекторов космических аппаратов и представлен анализ недостатков в результате их отработки. Предложен новый метод контроля усилия натяжения, основанный на локальном деформировании сетеполотна силой давления втягиваемого воздуха через его поверхность. Представлены результаты разработки и испытаний метода и прототипа устройства для контроля усилия натяжения сетеполотна. Целью исследования являлось определение работоспособности устройства и возможности его дальнейшего применения для контроля натяжения сетеполотна на рабочих рефлекторах.

Разработанный метод и прототип устройства, его реализующего, позволяют оперативно проводить контроль усилия натяжения сетеполотна при любом его пространственном положении.

Предложены и проанализированы перспективы возможного использования метода в ракетно-космической промышленности при изготовлении радиоотражающих поверхностей антенн космических аппаратов. По результатам проведенного исследования установлена зависимость усилия натяжения сетеполотна от силы давления втягиваемого воздуха через сетеполотно. Выявлена необходимость в дальнейшей доработке разработанного устройства для повышения точности получения данных измерений.

При успешном испытании доработанного устройства контроля усилия натяжения сетеполотна в лабораторных условиях, будут проведены дальнейшие испытания на стадии раскрытия сетеполотна и на сетеполотне в составе рефлектора.

Ключевые слова: рефлектор, радиоотражающая поверхность, металлическое сетеполотно, усилие натяжения сетеполотна, коэффициент отражения.

Research of a method based on the local deformation of the metall mesh by the force of air drawn through its surface, for measuring and controlling the tension force of the metall mesh cavity on radio-reflecting reflectors

E. A. Gracheva, F. K. Sin'kovskiy

JSC Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems" (RESHETNEV JSC)
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: grachevaea@iss-reshetnev.ru

This article presents some of the main parameters of the netfold that affect the radio-reflective properties of the reflector and the technology for achieving these parameters by controlling the tension force of the netfold at various stages of manufacturing the radio-reflective surface of the reflector. The article also includes a brief overview of the existing and applied methods of measuring and controlling the tension force of the reticular reflectors of spacecraft at the RESHETNEV JSC enterprise and an analysis of their shortcomings as a result of their development is presented. A new method for monitoring and measuring the tension force is proposed, based on the local deformation of the mesh by the force of the pressure of the drawn air through its surface. The results of the development and testing of the method and prototype of a device for monitoring the tension force of the net are presented. The purpose of the study was to determine the operability of the device and the possibility of its further use to control the tension of the grid on working reflectors.

The developed method and the prototype of the device that implements it, allow you to quickly monitor the tension force of the net pole at any of its spatial position.

The prospects of possible use of the method in the rocket and space industry in the manufacture of radio-reflecting surfaces of spacecraft antennas are proposed and analyzed. According to the results of the conducted research, the dependence of the tension force of the mesh on the force of the pressure of the drawn air through the mesh is established. The need for further refinement of the developed device to improve the accuracy of obtaining measurement data has been identified.

Upon successful testing of the modified device for measuring and controlling the tension force of the net in the laboratory, further tests will be carried out at the stage of cutting the net and on the net in the reflector.

Keywords: reflector, radio-reflective surface, metal-mesh, metal-mesh tension force, reflection coefficient.

Введение

Создание принципиально новых трансформируемых антенн для космических аппаратов потребовало разработки сетеполотна с тактико-техническими показателями, обеспечивающими наибольший коэффициент отражения СВЧ-излучения при минимальном усилии растяжения, минимальной удельной массе и максимальной изотропности механических и радиотехнических свойств [1–3].

К отражательной поверхности антенн космических систем предъявляются специфические эксплуатационные требования, одним из которых является максимальная радиоотражающая способность при минимальных усилиях силового каркаса [4].

Проблема создания отражательной поверхности решена за счет разработки новых металло-трикотажных сетеполотен из гальванически золоченой проволоки, которые наиболее полно отвечают заявленным требованиям по коэффициенту отражения $\geq 98\%$.

Необходимый коэффициент отражения антенны зависит, в том числе, от величины и равномерности натяжения сетеполотна по всему диаметру апертуры рефлектора в рабочем положении.

В данной статье рассматриваются применяемые на предприятии АО «РЕШЕТНЁВ» методы для измерения и контроля величины натяжения сетеполотна крупногабаритных трансформируемых рефлекторов антенн, а также предложен новый метод контроля.

Формирование и контроль профиля поверхности радиоотражающих рефлекторов

Для формирования радиоотражающей поверхности крупногабаритных рефлекторов используется вольфрамовое и молибденовое сетеполотно с золотым покрытием.

Для обеспечения заданного коэффициента радиоотражения при раскрытии антенны необходимо обеспечение определенного профиля радиоотражающей поверхности [5; 6].

При создании профиля для исключения провисания сетеполотна между силовыми спицами, сетеполотно должно иметь натяжение, которое выбрано после проведения в АО «РЕШЕТНЁВ» комплекса испытаний в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

**Требуемая величина рабочего усилия натяжения сетеполотна
для различных марок сетеполотен**

Марка сетеполотна	Рабочее усилие натяжения, г/см
СМет-3лВ15х2(А+А)	5 ± 1
СМет-3лВ15х2(Т+С)	11 ± 1
СМет-3лМо20х1(А+А)	2 ± 1

Конструкторской документацией на трансформируемые рефлекторы и сетеполотно предусмотрен контроль усилия натяжения сетеполотна [7; 8]:

- на стадии раскроя сетеполотна;
- на объемном шаблоне при разметке сетеполотна;
- в составе рефлектора на различных этапах изготовления.

Количество точек контроля зависит от диаметра антенны и составляет от нескольких десятков до нескольких сотен.

Анализ методов измерения и контроля усилия натяжения для обеспечения радиоотражающих параметров рефлектора

На сегодняшний день в АО «РЕШЕТНЁВ» отработаны и применяются в производстве следующие методы измерения и контроля натяжения:

- метод контроля усилия натяжения по плотности петель в сетеполотне, основанный на подсчете петель по цифровым фотографиям на всех стадиях работы с сетеполотном [9–12];
- метод контроля усилия натяжения путем измерения глубины прогиба сетеполотна при воздействии физической силой на поверхность сетеполотна [13–15].

Так же был предложен и исследован метод резонанса. Метод основан на влиянии воздействия звуковых волн разной частоты на сетеполотно до момента, пока частота волны от внешнего источника не совпадет с собственной частотой свободных колебаний сетеполотна, что приведет к возникновению резонанса. Так, в зависимости от силы натяжения сетеполотна меняется и собственная частота свободных колебаний, что также изменяет и резонансные пики, возникающие при совпадении с частотой звуковых волн от внешнего источника. Моменты возникновения резонансных пиков фиксировались датчиками, расположенными на сетеполотне, а значения с датчиков выводились на мультиметр в милливольты и были пропорциональны усилию натяжения, приложенному к сетеполотну [16].

Анализ результатов исследования указанных методов показал, что устройство для измерения глубины прогиба сетеполотна позволяет проводить контроль только на столе для раскроя сетеполотна и не приспособлено для контроля сетеполотна в составе рефлектора.

Метод контроля усилия натяжения по плотности петель в сетеполотне не обеспечивает требуемую точность контроля. Основная причина – необходимость постоянного обеспечения перпендикулярного положения объектива фотокамеры относительно поверхности сетеполотна, что не является возможным из-за сферического расположения сетеполотна на рефлекторе. Кроме того, этот метод не обеспечивает оперативности измерения.

Метод, основанный на влиянии воздействия звуковых волн, применим только на стадиях раскроя и изготовления отдельных сегментов сетеполотна. Применение метода непосредственно на рефлекторе не выполнимо по причине нетехнологичности.

Метод, основанный на локальном деформировании сетеполотна силой давления втягиваемого воздуха через его поверхность

В связи с недостатками приведенных методов, предложен новый метод контроля усилия натяжения сетеполотна, основанный на локальном деформировании сетеполотна силой давления втягиваемого воздуха через его поверхность.

Принцип действия метода заключается в измерении силы давления втягиваемого воздуха, воздействующего на сетеполотно в момент достижения необходимого прогиба сетеполотном.

Для подтверждения работоспособности метода проведены испытания на исследование влияния усилия натяжения сетеполотна на силу давления втягиваемого воздуха через его поверхность до достижения прогиба на сетеполотне.

Для проведения исследования была собрана конструкция, имитирующая натяжение сетеполотна на каркасе рефлектора.

Схема конструкции приведена на рис. 1. В исследовании было использовано сетеполотно (1) размером 17×17 см, жестко закреплённое на прямоугольной раме с двух перпендикулярных сторон (2). На две другие стороны равномерно подвешивались грузы (3), создавая равномерную растягивающую нагрузку на сетеполотно. Для чистоты эксперимента на сетеполотне была выбрана одна исследуемая область в центре сетеполотна (4), так как в ней максимально равномерно распределено усилие натяжения.

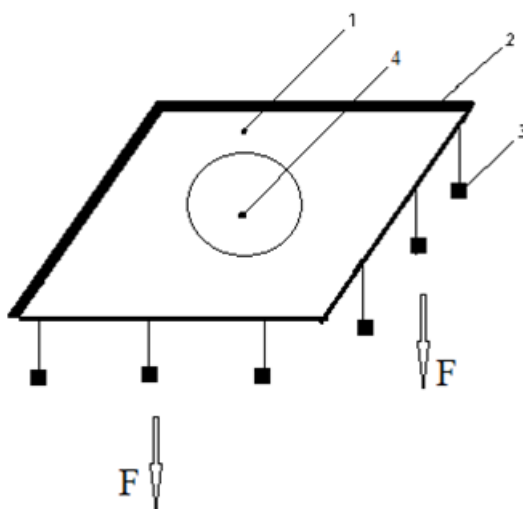


Рис. 1. Сетеполотно с равномерной распределенной нагрузкой:
1 – сетеполотно; 2 – жесткое крепление; 3 – грузы; 4 – исследуемая область

Fig. 1. Mesh with evenly distributed load:
1 – mesh; 2 – rigid fastening; 3 – loads; 4 – research area

Для проведения испытаний данного метода, был создан прототип устройства контроля усилия натяжения.

Принципиальная схема устройства показана на рис. 2.

Принцип работы устройства заключается в следующем: крыльчатка вентилятора (1), расположенная внутри впускного патрубка (3) и установленная на электропривод (2), который подключен к источнику питания (9) через блок управления вентилятором (7), создает обратный поток воздуха. Торцевой стороной впускного патрубка (3) касаются сетеполотна и с помощью ручки регулирующего потенциометра (8), расположенного на блоке управления вентилятором

(7), регулируют силу втягиваемого потока воздуха до момента возникновения на сетеполотне прогиба (11)

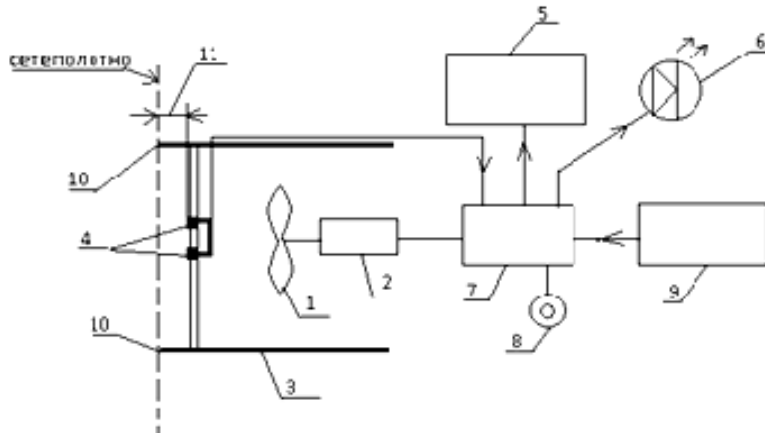


Рис. 2. Схема устройства для контроля усилия натяжения:

- 1 – крыльчатка вентилятора; 2 – электропривод вентилятора; 3 – впускной патрубок диаметром 10 мм;
- 4 – контактная группа; 5 – цифровой дисплей; 6 – контрольный светодиод; 7 – блок управления вентилятором;
- 8 – регулирующий потенциометр; 9 – источник питания; 10 – кольцевой контакт патрубка с полотном;
- 11 – величина прогиба полотна

Fig. 2. The scheme of the device for measuring and controlling the tension force:

- 1 – fan impeller; 2 – electric fan drive; 3 – inlet pipe with a diameter of 10 mm;
- 4 – contact group; 5 – digital display; 6 – control LED; 7 – fan control unit; 8 – regulating potentiometer; 9 – power supply;
- 10 – annular contact of the pipe with the web; 11 – the deflection value of the metal mesh

При достижении достаточной силы давления потока воздуха, происходит запитывание между контактной группой (4) и сетеполотном. В момент запитывания загорается контрольный светодиод (6), что служит сигналом для снятия показаний с цифрового дисплея (5), который показывает напряжение на регулирующем потенциометре (8).

Показания цифрового дисплея пропорциональны силе втягиваемого потока воздуха, воздействующего на сетеполотно.

Таким образом, было проведено 5 испытаний для нагрузок 0, 50, 100, 150 и 200 г на сторону сетеполотна. В каждом испытании для подтверждения результатов и уменьшения погрешности проводилось по 3 измерения.

Результаты зависимости силы втягиваемого потока воздуха от усилия натяжения сетеполотна приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты зависимости силы втягиваемого потока воздуха от усилия натяжения сетеполотна

№ исп.	Суммарная масса грузов на сторону (m), г	Усилие натяжения на сторону (σ), г/см	Показания цифрового индикатора, мВ			Средние значения по всем измерениям, мВ
			1 изм.	2 изм.	3 изм.	
1	0	0	459	460	465	461,3
2	50	2,9	465	465	470	466,6
3	100	5,8	470	471	473	471,3
4	150	8,8	472	476	479	475,6
5	200	11,7	475	479	481	478,3

По результатам проведенного исследования установлена зависимость усилия натяжения сетеполотна от силы втягиваемого потока воздуха через поверхность сетеполотна (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость силы втягиваемого воздуха через поверхность сетеполотна от усилия натяжения, приложенного к сетеполотну

Fig. 3. The dependence of the force of the drawn air through the metal mesh surface on the tension force applied to the metal mesh

Как видно из графика зависимости, чем больше усилие натяжения приложено к сетеполотну, тем большую силу втягиваемого воздуха необходимо приложить, чтобы запитать контакт между контактной группой и сетеполотном.

Заключение

По результатам проведенного исследования установлена зависимость усилия натяжения, приложенного к сетеполотну, от силы втягиваемого воздуха, воздействующего на его поверхность.

Необходимо отметить, что для использования данного метода необходимо провести настройку устройства перед его эксплуатацией. Для этого проводится калибровка и тарировка устройства контроля усилия натяжения на эталонном образце сетеполотна для каждой марки сетеполотна. При этом составляется градуировочная таблица с зависимостью усилия натяжения от показаний цифрового индикатора для каждого значения усилия натяжения.

Данный метод нуждается в проведении дополнительных исследований и доработке в части увеличения точности получения показаний с устройства и облегчения конструкции устройства, однако он имеет хорошие перспективы для дальнейшего внедрения в производство, так как в отличие от других методов позволяет измерять усилие натяжения сетеполотна на сферической поверхности, выдавая при этом конкретные цифровые значения.

Библиографические ссылки

1. Клишев О. П., Халиманович В. И. Анализ упругих деформаций космического аппарата на искажение формы отражающих поверхностей крупногабаритных элементов конструкции // Вестник СибГАУ. 2008. № 1 (18). С. 115–118.
2. Использование нелинейной теории упругости и метода подобия для оценки деформационных свойств металлотрикотажных сетеполотен / В. И. Халиманович, Л. А. Кудрявин, О. Ф. Беляев, В. А. Заваруев // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 49. С. 105–113.
3. PIM characteristics of The Large Deployable Reflector Antenna Mesh / V. Lubrano, R. Mizzone, F. Silvestrucci, D. Raboso // 4th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware, 2003 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.estec.esa.nl/conferences/03C26/>.

4. Жуков А. П. Реакция отражающей поверхности крупногабаритного рефлектора на действие возмущающего импульса // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2011. № 4 (12). С. 101–109.
5. Программа определения формы раскроя сетеполотна осесимметричного рефлектора № 2019619521 / М. С. Бухтяк, С. А. Пономарев; заявл. 31.07.2019, опубл. 07.08.2019. Нац. ис-след. Томский гос. ун-т.
6. Лаврушев В. Н., Гилязов И. И. Повышение точности при измерении коэффициента отражения сетеполотна // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. 2018. С. 75–77.
7. Романов А. Г., Седельников Ю. Е. Измерение коэффициента отражения сетчатых мате-риалов // Вестник Казанского гос. техн. ун-та им. А. Н. Туполева. 2013. № 1. С. 81–85.
8. Пат. № 2350518 С1 Российская Федерация МПК В64G 1/22, H01Q 15/16. Способ изготов-ления развертываемого крупногабаритного рефлектора космического аппарата / Н. А. Тестое-дов, В. И. Халиманович, Г. В. Шипилов и др. ; заявитель и патентообладатель АО «ИСС» им. ак. М. Ф. Решетнева» – № 2007122181/11 ; заявл. 13.06.2007 ; опубл. 27.03.2009.
9. Соффера В. А. Методы компьютерной обработки изображений. М. : Физматлит, 2001. 784 с.
10. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Методы и модели цифровой обработки изображе-ний. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 190 с.
11. Сухарев Е. Н., Коловский Ю. В. Метод определения натяжения сетеполотна антенн на основе распознавания образов // Вестник СиБГАУ. 2006. № 1–8. С. 96–100.
12. Сухарев Е. Н., Коловский Ю. В. Программа обработки изображений антенного сетеполотна для определения его натяжения. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2005612186. М., 2005.
13. Пат. № 216.012.7AC2 Способ определения равномерного натяжения мембраны из изо-тропного материала. Жуков А. П., Павлов М. С., Подшивалов С. Ф., Пономарев С. В., Халима-нович В. И. ; заявитель и патентообладатель Нац. иссл. Томск. гос. ун-т ; заявл. 18.01.2012 ; опубл. 27.20. 2013.
14. Пат. RU 2427948 С1 Зонтичная антенна космического аппарата / Н. А. Тестоедов, В. И. Халиманович, А. И. Величко и др. ; заявитель и патентообладатель АО «ИСС» им. ак. М. Ф. Решетнева» – № 2008135179/09 ; заявл. 28.08.2008 ; опубл. 20.10.2009.
15. Вдавливание индентора в поверхность натянутого сетеполотна / А. П. Жуков, М. С. Пав-лов, С. Ф. Подшивалов и др. // Вестник Томского гос. ун-та. 2010. № 4(12). С. 96–101.
16. Исследование метода, основанного на влиянии воздействия звуковых волн на сетеполот-но, для измерения усилия натяжения сетеполотна на крупногабаритных рефлекторах / Е. А. Грачева, Ф. К. Синьковский, Д. В. Снытко, Д. А. Замятин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 558–567.

References

1. Klishev O. P., Halimanovich V. I. [Analysis of elastic deformations of the spacecraft on the distortion of the shape of the reflecting surfaces of large-sized structural elements]. *Vestnik SibGAU*. 2008, Iss. 1 (18), P. 115–118 (In Russ.).
2. Halimanovich V. I., Kudryavin L. A., Belyaev O. F., Zavaruyev V. A. [The use of the nonlinear theory of elasticity and the similarity method for assessing the deformation properties of metal-mesh netting], *Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Matematika i mekhanika*. 2017, No. 49, P. 105–113 (In Russ.).
3. Lubrano V., Mizzoni R., Silvestrucci F., Raboso D. PIM characteristics of The Large Deployable Reflector Antenna Mesh. *4th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware, 2003*. Available at: <http://www.estec.esa.nl/conferences/03C26>.
4. Zhukov A. P. [Reaction of the reflecting surface of a large-sized reflector to the action of a perturbing pulse]. *Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Matematika i mekhanika*. 2011, No.4 (12), P. 101–109 (In Russ.).

5. Bukhtyak M. S., Ponomarev S. A. *Programma opredeleniya formy raskroya setepolotna osesimmetrichnogo reflektora № 2019619521* [The program for determining the shape of the cutting of the axisymmetric reflector. No. 2019619521]. 2019.
6. Lavrushev V. N., Gilyazov I. I. [Improving the accuracy when measuring the reflection coefficient of the net]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Materials of the International Scientific and Technical Conference of Young scientists, postgraduates and students]. 2018 (In Russ.).
7. Romanov A. G., Sedelnikov Yu. E. [Measurement of the reflection coefficient of mesh materials]. *Vestnik Kazanskogo gos. tekhn. un-ta im. A. N. Tupoleva*. 2013, No. 1, P. 81–85 (In Russ.).
8. Testoedov N. A., Halimanovich V. I., Shipilov G. V. et al. [Method of manufacturing a deployable large-sized reflector of a spacecraft]. Patent RF, no. 2350518, 2009.
9. Soifera V. A. *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy* [Methods of computer image processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 784 p.
10. Grishentsev A. Yu., Korobeynikov A. G. *Metody i modeli tsifrovoy obrabotki izobrazheniy* [Methods and models of digital image processing]. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2014, 190 p.
11. Sukharev E. N., Kolovsky Yu. V. [Method for determining the tension of a mesh antenna based on found images]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 1–8, P. 96–100 (In Russ.).
12. Sukharev E. N., Kolovsky Yu. V. *Programma obrabotki izobrazheniy antenno go setepolotna dlya opredeleniya ego natyazheniya* [The program of image processing of the antenna metal-mesh for determining its tension]. 2005.
13. Zhukov A. P., Pavlov M. S., Podshivalov S. F., Ponomarev S. V., Halimanovich V. I. *Sposob opredeleniya ravnomernogo natyazheniya membrany iz izotropnogo materiala* [Method for determining the uniform tension of a membrane made of an isotropic material]. Patent RF, no. 216.012.7AS2, 2013.
14. Testoedov N. A., Halimanovich V. I., Velichko A. I., Shipilov G. V., Kolesnikov A. P., Akchurin V. P. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata* [The umbellate antenna of the spacecraft]. Patent RF, no. RU 2427948 C1, 2009.
15. Zhukov A. P., Pavlov M. S., Podshivalov S. F. [Ponomarev S. V., Halimanovich V. I. Indentation of the indenter into the surface of a stretched metal-mesh]. *Vestnik Tomskogo gos. un-ta*. 2010, No. 4 (12), P. 96–101 (In Russ.).
16. Gracheva E. A., Sin'kovskiy F. K., Snytko D. V., Zamyatin D. A. [Research of the method based on the influence of sound waves on the metal-mesh for measuring the tension force of the metal-mesh on large-sized reflectors]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 1, P. 558–567.

© Грачева Е. А., Синьковский Ф. К., 2023

Грачева Евгения Александровна – инженер, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева»; аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: grachevaea@iss-reshetnev.ru.

Синьковский Федор Константинович – заместитель директора – главный конструктор отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: sfk@iss-reshetnev.ru.

Gracheva Evgeniya Aleksandrovna – Engineer, Joint-Stock Company “Information Satellite systems named after Academician M. F. Reshetnev”; postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: grachevaea@iss-reshetnev.ru.

Sin'kovskiy Fedor Konstantinovich – Deputy Director-Chief Designer of the industry center for large-size transformable mechanical systems; Joint-Stock Company “Information Satellite systems named after Academician M. F. Reshetnev”. E-mail: sfk@iss-reshetnev.ru.
