

УДК 629.7.062

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-451-460

Для цитирования: Проектирование узла крепления оттяжек на силовой спице рефлектора / В. В. Кольга, А. И. Лыкум, М. Е. Марчук, Г. Ю. Филипсон // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3. С. 451–460. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-451-460.

For citation: Kolga V. V., Lykum A. I., Marchuk M. E., Filipson G. U. [Design of the fastening assembly of the guys on the power spokes reflector]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 451–460. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-451-460.

Проектирование узла крепления оттяжек на силовой спице рефлектора

В. В. Кольга¹, А. И. Лыкум², М. Е. Марчук², Г. Ю. Филипсон²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: kolgavv@yandex.ru

В настоящее время глобальные системы связи развиваются в сторону освоения высоких диапазонов частот для организации высокоскоростных каналов передачи информации, для чего необходимы крупногабаритные антенные системы с рефлекторами до 50 м. Большинство используемых технических решений для сборки крупногабаритных рефлекторов базируются на технологических объемных шаблонах, геометрически полностью имитирующих необходимую отражающую поверхность рефлектора. Масса таких шаблонов увеличивается в кубической зависимости относительно увеличения диаметра рефлектора, из-за чего использовать их при сборке крупногабаритных антенн становится всё более трудоемко из-за увеличения габаритов и массы шаблонов.

Целью исследования является проектирование узла крепления оттяжек на силовой спице рефлектора для «бесшаблонной» сборки. Спица представляет собой композитную изогридную структуру, на которой закреплены кронштейны для крепления силовых узлов. Узел крепления представляет собой сборочную единицу, состоящую из скобы и зажимов и позволяющую точно регулировать необходимую силу натяжения оттяжки для фиксации шнура в рабочем положении без использования неразъемных способов скрепления.

В качестве методов исследования были приняты аналитический подход и конечно-элементный анализ. С помощью аналитического расчёта была определена максимальная сила натяжения оттяжек в спроектированном узле, тем самым задана максимальная нагрузка для его эксплуатации. Коэффициент трения между шнуром и зажимом в каждом отдельном случае определяется экспериментально. После упрощения расчетно-конструктивной схемы скобы аналитический расчет проводился для пространственной стержневой рамы.

Для подтверждения результатов расчёта была построена конечно-элементная модель скобы и проведен её статический анализ. Для разработанной модели скобы определены максимальные напряжения и проведен их сравнительный анализ с результатами, полученными аналитически.

С помощью твердотельного моделирования определены массовые и габаритные характеристики узла крепления оттяжек. Были определены предельные диапазоны сил натяжения и материалы, используемые в узле, а также его прочностные характеристики.

В заключении сделан вывод, что данный узел может применяться в «бесшаблонном» методе сборки рефлектора для широкого спектра крупногабаритных антенн, он обладает высокой технологичностью и универсальностью.

Ключевые слова: узел крепления, антенна, оттяжки, шнур, крупногабаритный рефлектор.

Design of the fastening assembly of the guys on the power spokes reflector

V. V. Kolga¹, A. I. Lykum², M. E. Marchuk², G. U. Filipson²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
²JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: kolgavv@yandex.ru

Currently, global communication systems are developing towards mastering high frequency bands for organizing high-speed information transmission channels, which requires large-sized antenna systems with reflectors up to 50 meters. Most of the technical solutions used for assembling large-sized reflectors are based on technological volumetric templates that geometrically completely imitate the necessary reflective surface of the reflector. The mass of such templates increases in cubic dependence on the increase in the diameter of the reflector, which is why it becomes more and more laborious to use them when assembling large-sized antennas due to the increase in the dimensions and weight of the templates.

The purpose of the study is to design the attachment point for guy wires on the power spoke of the reflector for a "templateless" assembly. The spoke is a composite isogrid structure on which brackets are fixed for attaching power units. The fastening unit is an assembly unit consisting of a bracket and clips and allows you to precisely adjust the necessary pull tension force to fix the cord in the working position without the use of one-piece fastening methods.

The analytical approach and finite element analysis were adopted as research methods. Using an analytical calculation, the maximum tensile force of the guys in the designed unit was determined, thereby setting the maximum load for its operation. The coefficient of friction between the cord and the clamp in each individual case is determined experimentally. After simplifying the design and construction scheme of the bracket, the analytical calculation was carried out for a three-dimensional rod frame.

To confirm the results of the calculation, a finite element model of the bracket was built and its static analysis was carried out. For the developed model of the bracket, the maximum stresses were determined and their comparative analysis was carried out with the results obtained analytically.

The results of the design of the bracing attachment point. With the help of solid modeling, the mass and overall characteristics of the braces fastening unit are determined. The limiting ranges of tension forces and the materials used in the knot, as well as its strength characteristics, were determined.

Conclusion. This node can be used in the "templateless" method of assembling a reflector for a wide range of large antennas, it has high manufacturability and versatility.

Keywords: attachment unit, antenna, guy ropes, cord, large-sized reflector.

Введение

На данный момент глобальные системы связи развиваются в сторону освоения высоких диапазонов частот для организации высокоскоростных каналов передачи информации. Для этого необходимы антенные системы с рефлекторами апертуры 10–50 м.

Крупногабаритные рефлекторы – часть антенного комплекса, отвечающая за отражение и усиление сигнала широкого спектра от излучающей установки [1–8]. Проблемы сборки крупногабаритных рефлекторов сохраняют свою актуальность до настоящего времени [9]. Большинство используемых технических решений базируются на технологических объемных шаблонах, геометрически полностью имитирующих необходимую отражающую поверхность рефлектора. Масса таких шаблонов увеличивается в кубической зависимости относительно увеличения диаметра рефлектора, из-за чего использовать их в сборке крупногабаритных антенн становится всё более трудоемко из-за увеличения их габаритов и массы.

Примером такого технологического решения является способ, описанный в [10].

Анализ существующих способов изготовления крупногабаритного рефлектора

Для изготовления крупногабаритного рефлектора космического аппарата используется растяжение металлизированного трикотажного сетчатого полотна, раскрой его на фрагменты, сшивка по радиальным сегментам для получения необходимой формы, после чего раскроенные элементы сетеполотна крепят на силовом каркасе. Далее проводится формирование реперных знаков на рабочей поверхности сетеполотна с учётом припусков в виде лент. Готовые фрагменты складывают припусками внахлест, сшивают между собой и размещают на объемном шаблоне требуемой формы, растягивая сетеполотно с требуемым рабочим усилием и выравнивая на шаблоне неровности поверхности. После получения требуемой формы и размера рабочей поверхности сетеполотно фиксируют скобами, предварительно разместив его на шаблоне и отрегулировав с использованием тангенциальных шнуров под требуемую форму поверхности.

Исходя из формулы изобретения, можно выявить следующие недостатки: трудоемкость процесса сборки; чрезмерная массовая составляющая объемного шаблона, которая возрастает в кубической зависимости от диаметра рефлектора. Данный способ изготовления предполагает изготовление отдельных шнуров (нарезку по длине) и начальный монтаж без учета упругих свойств шнуров. Из-за этого необходимо создавать систему заданных усилий натяжения на каждом этапе сборки, образуя статическую неопределенность усилий в узлах [10; 11].

Для решения этой проблемы в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС») разработано техническое решение «бесшаблонной» сборки рефлектора, позволяющее собрать рефлектор с помощью систем обезвешивания [12; 13]. В рассмотренном выше решении отсутствуют необходимые технические элементы детализации, которые необходимы для его реализации, что свойственно патентам. В частности, требуется разработка узла крепления и регулировки оттяжек, отвечающего следующим требованиям: возможности многократного фиксирования шнура; удобного крепежа на силовую спицу; возможности точно регулировать длину шнура по оси OZ; минимизации массогабаритных характеристик.

Конструкция узла крепления оттяжек

Для реализации данного решения [12] нами была предложена конструкция узла крепления, который отвечает указанным выше требованиям. Рассмотрим в качестве базового узла крупногабаритный рефлектор антенны разработки АО «ИСС» [12].

В процессе проектирования было решено применить схему зажима, схожую с навесными защелками (рис. 1).

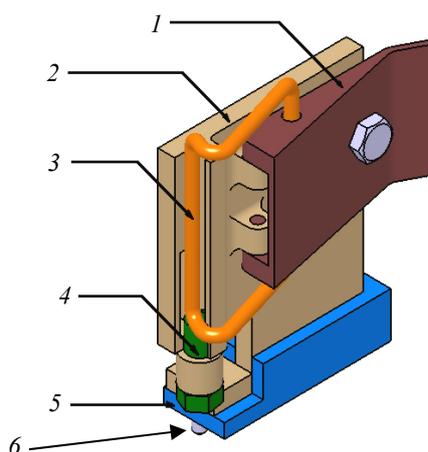


Рис. 1. Общий вид узла крепления:
 1 – язычок; 2 – база; 3 – скоба; 4 – регулировочный болт;
 5 – кронштейн для закрепления узла в общем виде; 6 – крепежный болт

Fig. 1. It is a general view of the fastening unit:
 1 – tongue; 2 – base; 3 – bracket; 4 – adjusting bolt;
 5 – bracket for fixing the unit in general; 6 – mounting bolt

Подобная схема проста в изготовлении и позволяет создавать достаточное усилие на скобе, прочно фиксируя шнур, при этом не требуя значительного прикладывания усилий за счёт правила рычага. Важным моментом для закрепления шнура является большая площадь контакта зажима со шнуром, позволяющая исключить потерю прочности шнура при натяжении из-за возможного перелома (рис. 1).

Язычок (1) для надежного закрепления своего положения может фиксироваться болтом (4).

На рис. 2 показаны элементы, обеспечивающие точную регулировку требуемой длины шнура. Это регулировочный полый болт (4) и вырез для регулировочной петли шнура в базе (2), с помощью которой можно обеспечить резервный запас длины для регулировки.

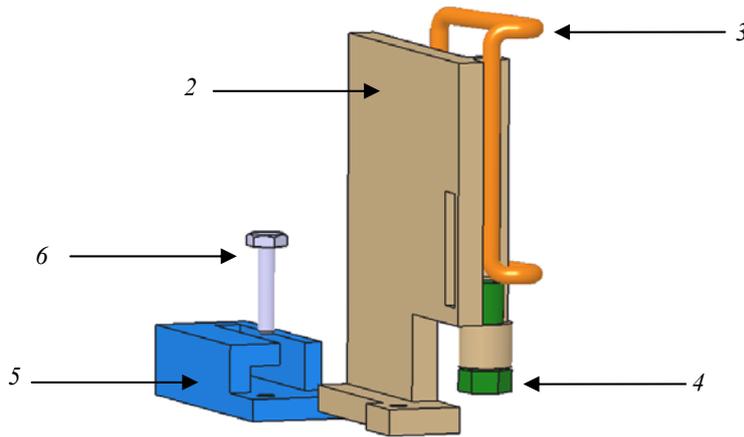


Рис. 2. Узел в снятом положении:

1 – язычок (не виден на этом рисунке); 2 – база; 3 – скоба; 4 – регулировочный болт;
5 – кронштейн для закрепления узла в общем виде; 6 – крепежный болт

Fig. 2. The unit is in the removed position:

1 – tongue (not visible in this figure); 2 – base; 3 – bracket; 4 – adjusting bolt;
5 – bracket for fixing the unit in General; 6 – mounting bolt

Разработанный узел крепления обеспечивает возможность снятия его с опорного кронштейна для установки на нем натяжного шнура (рис. 2). Ось крепежного болта (6) расположена максимально близко к оси шнура для минимизации крутящего момента от усилий натяжения и возможного поворота базы. При этом сохраняется возможность удобного откручивания обоих болтов, как крепежного (6), так и регулировочного (4).

Материалом для базы (2), язычка (1) был выбран АМг6, материалом для болтов – Сталь 45. Для скобы (3) будет произведён подбор материала, исходя из прочностных расчётов. Примерный расчёт позволил оценить массу узла, равную 0,018 кг.

Аналитический расчет силы натяжения шнура в узле крепления оттяжек

Для обеспечения надежного закрепления натяжного шнура в спроектированном узле требуется определить величину и направление действия сил в узле. Исходя из расчетной силы трения внутри рабочей поверхности узла, необходимо оценить усилие зажима. Требуемое усилие на оттяжках силовой спицы зависит от материала и механических характеристик шнура (коэффициента трения, модуля упругости, предела текучести и др.) [14].

Схема приложения сил показана на рис. 3.

Исходя из данного рисунка, сила трения равна

$$F_{\text{трения}} = -F_{\text{тяги}};$$

$$F_{\text{трения}} = k \cdot N,$$

где N – сила реакции шнура на силу, воздействующую со стороны зажима; k – коэффициент трения.

Предполагая деформации упругими, сила зажима равна

$$F_{\text{зажима}} = -N;$$

$$F_{\text{зажима}} = \frac{F_{\text{тяги}}}{k},$$

Коэффициент трения между шнуром и базой является уникальным в каждом отдельном случае и зачастую определяется экспериментально. Как видно из формулы выше, зажим держит оттяжку благодаря силе натяжения, которая меньше, чем сила зажима. Уменьшить разницу между ними можно обработкой скобы и паза, в котором будет находиться нить, тем самым увеличив коэффициент трения.

При этом мы можем определить максимальную силу $F_{\text{тяги}}$, которую возможно приложить к скобе (3), с помощью аналитического расчёта тем самым определив максимальную нагрузку для эксплуатации спроектированного узла.

Упростив расчетно-конструктивную схему скобы, мы получаем пространственную раму, изображенную на рис. 4.

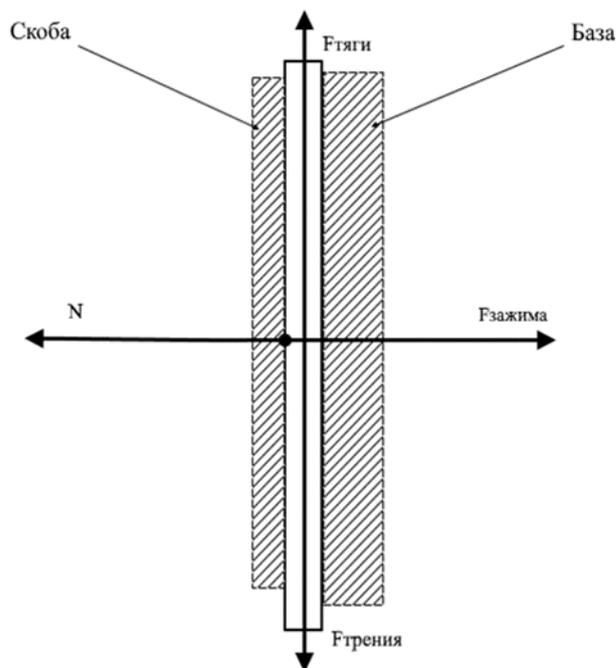


Рис. 3. Распределение сил в канавке зажима

Fig. 3. Distribution of forces in the clamping groove

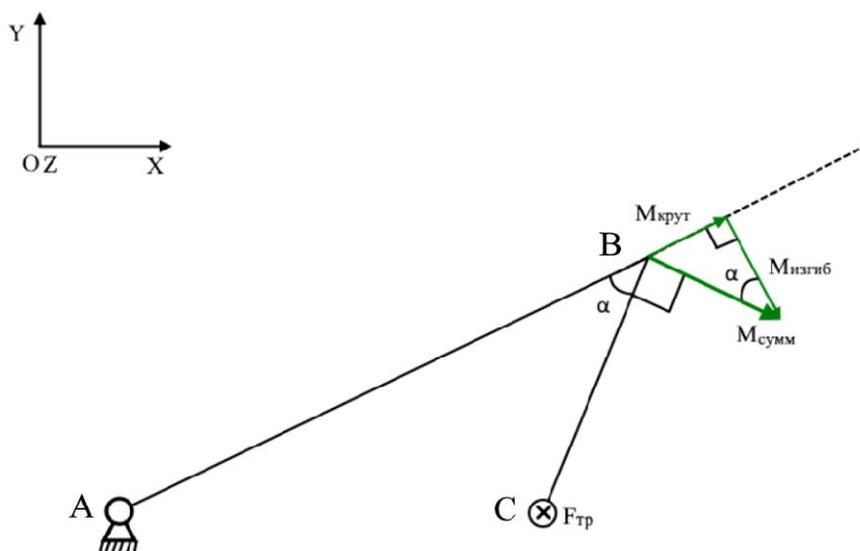


Рис. 4. Расчетно-конструктивная схема скобы

Fig. 4. The bracket in a simplified form

Теперь необходимо найти максимальное значение силы $F_{\text{тяги}}$, исходя из предела текучести материала скобы. По третьей теории прочности, запишем формулу эквивалентного напряжения и приравняем её к пределу прочности материала

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{4\tau_A^2 + \sigma_A^2};$$

где σ_A – нормальное напряжение в точке А; τ_A – тангенциальное напряжение в этой же точке. Распишем эти величины далее

$$\sigma_A = \frac{M_{\text{Изгиб}}}{W_{\text{Изгиб}}};$$

$$M_{\text{Изгиб}} = F_{\text{тяги}} \cdot AB + F_{\text{тяги}} \cdot CB \cdot \cos \alpha;$$

$$W_{\text{Изгиб}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32};$$

$$\tau_A = \frac{M_{\text{Акруч}}}{W_{\text{круч}}};$$

$$M_{\text{Акруч}} = M_{\text{круч}} = F_{\text{тяги}} \cdot CB \cdot \sin \alpha;$$

$$W_{\text{круч}} = \frac{\pi \cdot d^3}{16};$$

где $M_{\text{Изгиб}}$ – максимальный изгибающий момент в точке А; $M_{\text{Изгиб}}$ – изгибающий момент в точке В; $M_{\text{Акруч}}$ – максимальный скручивающий момент в точке А; $W_{\text{Изгиб}}$ – момент сопротивления изгибу; $W_{\text{круч}}$ – момент сопротивления кручению.

Исходя из выведенных величин, запишем выражение эквивалентного напряжения

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{4 \left(\frac{F_{\text{тяги}} \cdot CB \cdot \sin \alpha \cdot 16}{\pi \cdot d^3} \right)^2 + \left(\frac{(F_{\text{тяги}} \cdot AB + F_{\text{тяги}} \cdot CB \cdot \cos \alpha) \cdot 32}{\pi \cdot d^3} \right)^2};$$

Отсюда мы можем выразить максимальную силу натяжения в узле $F_{\text{тяги}}$, так как нам известны все характеристики скобы

$$F_{\text{тяги}} = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \sigma_{\text{эkv}}}{32 \sqrt{2 \cdot BC \cdot AB \cdot \cos \alpha + AB^2 + BC^2}}.$$

Задавшись диаметром скобы и видом материала, рассчитаем размеры скобы и определим максимально допустимые усилия для спроектированного узла.

Анализ результатов расчетов для различных диаметров скобы d применительно к сплавам АМг6, ВТ14 и ВТ16, достаточно часто применяемым в ракетно-космической технике, представлен в таблице.

Вводные данные и результаты аналитического расчёта

	АМг6			ВТ 14			ВТ16		
	d1, м	d2, м	d3, м	d1, м	d2, м	d3, м	d1, м	d2, м	d3, м
	0,0022	0,002	0,0018	0,0022	0,002	0,0018	0,0022	0,002	0,0018
σв, Па	305000000			850000000			1030000000		
АВ, м	0,021								
СВ, м	0,007								
sin α	0,78								
cos α	0,62								
$F_{\text{тяги}}$, Н	12,29	9,23	6,73	34,25	25,73	18,76	41,50	31,18	22,73

Как видно из расчётов, допустимое усилие на шнуре может варьироваться от 6,73 до 41,50 Н, в зависимости от диаметра и материала скобы. Исходя из опытных данных, известно, что необходимые усилия на оттяжках равны 8–14 Н, поэтому оптимальными вариантами будут скобы АМг 6 с диаметром 2,2 мм, ВТ14 – с диаметром в 1,8 мм.

Конечно-элементное моделирование несущей способности скобы в узле крепления оттяжек

Для подтверждения результатов расчёта была создана конечно-элементная модель в САПР Catia для проведения статического анализа [15]. С помощью построенной модели мы рассчита-

ем максимальные напряжения в скобе и сравним их с полученными в аналитическом расчете. Для расчёта была выбрана скоба с диаметром 0,0018 м из материала ВТ16.

Как видно на рис. 5, критическое сечение в скобе соответствует аналитическому расчёту. Максимальные напряжения в скобе по данным статического анализа равны 100 МПа.

Погрешность между аналитическим расчётом и расчётом по модели равна

$$\Delta = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}} - \sigma_{\text{МОД}}}{\sigma_{\text{ЭКВ}}} \cdot 100 \% = \frac{10,3 - 10}{10,3} \cdot 100 \% = 3 \%$$

Погрешность расчёта не превышает 3 %.

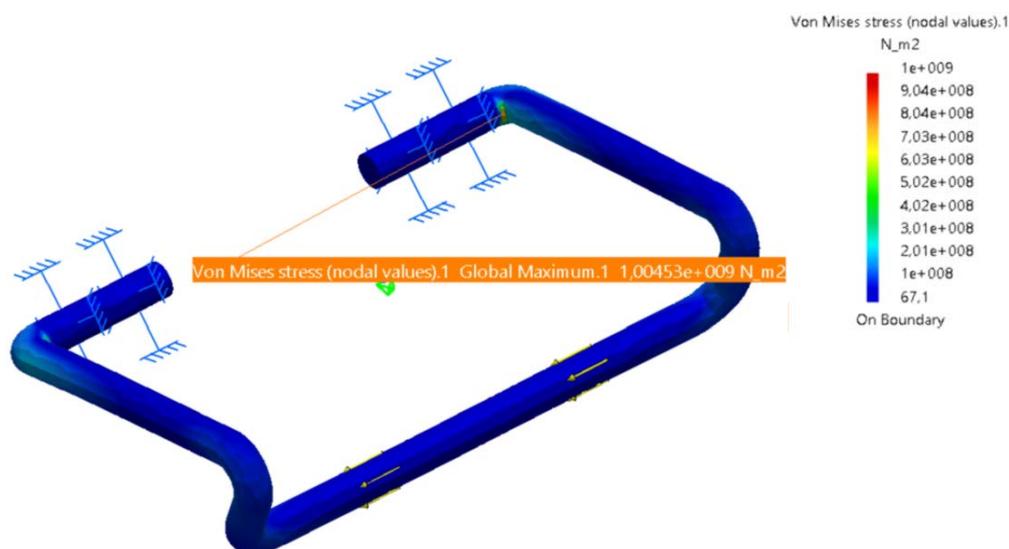


Рис. 5. Распределение напряжений в скобе

Fig. 5. Stress distribution in the bracket

При проектировании узла крепления необходимо учитывать, что сила зажима, приложенная к шнуру не должна вызывать в нем пластических деформаций, что ограничивает максимальное усилие зажима только упругими деформациями. Для определения силы упругости, определим напряжения в поперечном сечении

$$F_{\text{упругости}} = k_{\text{жест}} \cdot \Delta d,$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

где $F_{\text{упругости}}$ – сила упругости, равная силе реакции опоры N ; $k_{\text{жест}}$ – коэффициент жесткости; σ – нормальные напряжения; E – модуль упругости первого рода; ε – относительная линейная продольная деформация; Δd – линейная деформация. Однако конечные результаты во многом зависят от вида и материала шнура, который может варьироваться в зависимости от поставленных задач.

Заключение

В работе был разработан узел крепления оттяжек на силовой спице рефлектора. Узел может применяться в широком спектре крупногабаритных антенн, обладает высокой технологичностью и универсальностью. Были определены предельные диапазоны сил натяжения и материалы, используемые в узле, а также его прочностные и массовые характеристики.

В дальнейшем в конструкции можно улучшить эргономические характеристики для снижения массы узла.

Рекомендуется использовать наиболее универсальный вариант исполнения скобы из титанового сплава ВТ16 диаметром 22 мм, который выдерживает до 41,50 Н усилий натяжения, что

даёт значительный запас прочности для большинства расчетных случаев. Но, исходя из технологических и экономических соображений, при более низких усилиях в оттяжках, можно также использовать скобы из АМгб, ВТ14 меньшего диаметра.

Библиографические ссылки

1. Параметрический анализ анизогридного корпуса космического аппарата для очистки орбиты от космического мусора / И. Д. Белоновская, В. В. Кольга, И. С. Ярков, Е. А. Яркова // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 94–105.
2. Замятин Д. А., Кольга В. В. Моделирование конструкции мачты рефлектора // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч. конф. (10–13 ноября 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. Ч. 1. С. 21–22
3. Кольга В. В., Ярков И. С., Яркова Е. А. Разработка тепловой панели малого космического аппарата навигационного обеспечения // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 3. С. 382–388.
4. Оптимизация расположения мест крепления приборной панели космического аппарата на основе модального анализа / В. В. Кольга, М. Е. Марчук, А. И. Лыкум, Г. Ю. Филипсон // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 328–338.
5. Оптимизация расположения интерфейсных точек приборной панели космического аппарата - В. В. Кольга, М. Е. Марчук, А. И. Лыкум, С. А. Зоммер // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 6. С. 1401–1405.
6. О подходах к прогнозированию акустического воздействия на оболочечные элементы космического аппарата / В. В. Кольга, М. Е. Марчук, А. И. Лыкум, Г. А. Романенко // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2021, г. Красноярск) : в 2 ч. / СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Ч. 1. С. 38–41.
7. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М. : Радио и связь, 1987. 9 с.
8. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. 348 с.
9. Тестоедов Н. А., Кольга В. В., Семенова Л. А. Проектирование и конструирование баллистических ракет и ракет носителей. Красноярск, 2014. 308 с.
10. Патент 2350518С1 Российская Федерация МПК В64G 1/22, H01Q 15/16. Способ изготовления развертываемого крупногабаритного рефлектора космического аппарата / Тестоедов Н. А., Халиманович В. И. и др.; заявление № 2007122181/11, от 13.06.2007; опубл. 27.03.2009, бюл. № 9.
11. Патент 2296396С2 Российская Федерация МПК H01Q 15/16. Способ сборки крупногабаритных развертываемых космических рефлекторов и технологическое приспособление для формирования отражающей поверхности рефлектора / Семенов Ю.П., Стрекалов А.Ф. и др.; заявление №2005100412/09, от 11.01.2005; опубл. 27.03.2007, бюл. № 9.
12. Патент 2674386 Российская Федерация, МПК В64G 1/22. Способ изготовления крупногабаритного трансформируемого рефлектора / Величко А. И., Шендалев Д. О. и др.; заявление №2016136059, от 2016.09.06; опубл. 07.12.2018, бюл. № 34.
13. Патент 2276823С2 Российская Федерация МПК H01Q 15/16. Способ изготовления крупногабаритных развертываемых рефлекторов и устройство для формирования криволинейной поверхности рефлектора / Полухин Н. В., Бычков В. И. и др.; заявление № 2004125486/09, от 19.08.2004; опубл. 20.05.2006, бюл. № 14.
14. В.И. Анурьев. Справочник конструктора машиностроителя. Том 1. М.: Машиностроение, 2001, 53 с.
15. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн. Ч. 1 // Сибирский аэрокосмический журнал. 2007. № 2. С. 51–57.

References

1. Belonovskaya I. D., Kolga V. V., Yarkov I. S., Yarkova E. A. [Parametric analysis of an anisogrid body of a spacecraft for cleaning the orbit from space debris]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 1, P. 94–105 (In Russ.).
2. Zamyatin D. A., Kolga V. V. [Modeling the design of the reflector mast]. *Reshetnevsky Readings: Proceedings of the XXIV Intern. scientific conf.* (November 10–13, 2020, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk, 2020, P. 21–22 (In Russ.).
3. Kolga V. V., Yarkov I. S., Yarkova E. A. [Development of a thermal panel for a small spacecraft for navigation support]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 382–388 (In Russ.).
4. Kolga V. V., Marchuk M. E., Lykum A. I., and Philipson G. Yu. [Optimization of the location of attachment points for the instrument panel of a spacecraft based on modal analysis]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 328–338 (In Russ.).
5. Kolga V. V., Marchuk M. E., Lykum A. I., Sommer S. A. [Optimization of the location of the interface points of the instrument panel of the spacecraft]. *Innovations. The science. Education*. 2021, No. 6, P. 1401–1405 (In Russ.).
6. Kolga V. V., Marchuk M. E., Lykum A. I., Romanenko G. A. [On approaches to predicting the acoustic impact on the shell elements of the spacecraft]. *Reshetnev readings: materials of the XXV Intern. scientific conf.* (November 10–12, 2021, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk, 2021, P. 38–41 (In Russ.).
7. Gryanik M. V., Loman V. I. *Razvertivaemye zerkal'nye anteny zontichnogo tipa* [Deployable mirror antennas of umbrella type]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1987, 9 p.
8. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing information support spacecraft]. Krasnoyarsk, 2011, 348 p.
9. Testoedov N. A., Kolga V. V., Semenova L. A. *Proektirovanie i konstruirovaniye ballisticheskikh raket i raket nositeley* [Design and construction of ballistic missiles and launch vehicles]. Krasnoyarsk, 2014, 308 p.
10. Testoedov N. A., Khalimanovich V. I. et al. *Sposob izgotovleniya razvertivayemogo krupnogabaritnogo reflektora kosmicheskogo apparata* [Method for manufacturing a deployable large spacecraft reflector]. Patent RF №2350518, 2009.
11. Semenov Yu. P., Strekalov A. F. et al. *Sposob sborki krupnogabaritnykh razvertivayemykh kosmicheskikh reflektorov i tekhnologicheskoye prispособleniye dlya formirovaniya otrazhayushchey poverkhnosti reflektora* [A method for assembling large-sized deployable space reflectors and a technological device for forming a reflective surface of a reflector]. Patent RF № 2296396, 2007.
12. Velichko A. I., Shendalev D. O. et al. *Sposob izgotovleniya krupnogabaritnogo transformiruyemogo reflektora* [A method of manufacturing a large-sized transformable reflector]. Patent RF № 2674386, 2018.
13. Polukhin N. V., Bychkov V. I. et al. *Sposob izgotovleniya krupnogabaritnykh razvertivayemykh reflektorov i ustroystvo dlya formirovaniya krivolineynoy poverkhnosti reflektora* [A method for manufacturing large-sized deployable reflectors and a device for forming a curved reflector surface]. Patent RF №2276823, 2006.
14. Anuryev V. I. *Spravochnik konstruktora mashinostroitel'ya. Tom 1* [Handbook of a machine builder's designer. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 53 p.
15. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. [Review of designs of modern transformable space antennas. Part 1]. *Siberian Aerospace Journal*. 2007. No. 2. P. 51–57 (In Russ.).

Кольга Вадим Валентинович – доктор педагогических наук, профессор, кандидат технических наук, профессор кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kolgavv@yandex.ru.

Лыкум Андрей Игоревич – инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: rob4i@mail.ru.

Марчук Максим Евгеньевич – инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mmarchuk98@mail.ru.

Филипсон Глеб Юрьевич – инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: gortsev2014@gmail.com.

Kolga Vadim Valentinovich – Dr. Sc., professor, Cand. Sc., Professor of Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kolgavv@yandex.ru.

Lykum Andrey Igorevich – engineer; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: rob4i@mail.ru.

Marchuk Maxim Evgenevich – engineer; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mmarchuk98@mail.ru.

Filipson Gleb Yurevich – engineer; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: gortsev2014@gmail.com.
