

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.78

DOI 10.18698/0536-1044-2018-1-71-83

Перспективы повышения размерной стабильности и весовой эффективности рефлекторов зеркальных космических антенн из композиционных материалов

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

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Prospects of Increasing the Dimensional Stability and the Weight Efficiency of Mirror Space Antenna Reflectors Made of Composite Materials

S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, A.D. NovikovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: sreznik@bmstu.ru, pavel.prosuntsov@mail.ru, ovikov.andrey.sm13@gmail.com



Рефлекторы бортовых зеркальных космических антенн должны иметь малую погонную плотность и высокую размерную стабильность. Информация о методах проектирования рефлекторов из композиционных материалов носит отрывочный характер. Актуальность создания более совершенных конструкций рефлекторов, чем существующие, побуждает самостоятельно разрабатывать подходы к решению этой проблемы. Предложена методика проектирования рефлекторов зеркальных космических антенн, основанная на конечно-элементном моделировании температурного и напряженно-деформированного состояний вариантов композитных конструкций рефлекторов для заданных условий космического полета. Показана практическая возможность снижения погонной плотности и повышения размеростабильности рефлекторов зеркальных космических антенн по сравнению с имеющимися конструкциями.

Ключевые слова: рефлектор зеркальной космической антенны, композиционные материалы, углепластик, термомеханический анализ



Mirror space antenna reflectors should have low linear density and high dimensional stability. The information on the methods of designing reflectors made of composite materials is inconsistent. The need to design reflectors more advanced than the existing ones, prompts the development of original approaches to solving the problem. A method of designing mirror space antenna reflectors based on finite element simulation of the temperature and stress-strain state variants of composite structures for the given conditions of space flight is proposed. The feasibility of reducing the linear density and increasing the dimensional stability of mirror space antenna reflectors as compared to the existing designs is shown.

Keywords: mirror space antenna reflector, composite materials, carbon fiber reinforced plastic, thermomechanical analysis

За годы развития систем спутниковой связи произошли серьезные изменения в облике бортовых космических антенн. Вначале все искусственные спутники Земли, а не только связные, оснащали штыревыми антеннами. С освоением геостационарной и высоких эллиптических орбит в интересах космической связи возникла потребность в остронаправленных зеркальных антеннах. Конструкции рефлекторов зеркальных космических антенн (РЗКА) разрабатывались исходя из назначения, частотного диапазона и технологических возможностей.

Революционное значение для изготовления РЗКА имело применение композиционных материалов, в первую очередь углепластиков, так как позволило значительно облегчить их конструкцию, повысить стабильность формы и размеров. Наряду с высокими удельными жесткостными и прочностными характеристиками углепластики обладают уникальными теплофизическими параметрами — малыми (близкими к нулю) коэффициентами линейного теплового расширения и сравнительно высокой теплопроводностью в плоскости армирования.

Рост объема передаваемой информации стимулировал расширение диапазона радиосвязи в сторону высоких частот. Для антенн с жесткими рефлекторами постоянной формы наиболее часто используют Ku-Ка-диапазоны (12...40 ГГц) по классификации международного союза радиосвязи [1], а для межспутниковой связи — V-диапазон (40...75 ГГц). Увеличение частоты работы антенны повышает требования к точности профиля отражающей поверхности. Допустимое отклонение поверхности РЗКА от

расчетного значения не должно превышать $\Delta = \Lambda/16$ (Λ — длина радиоволны, на которой работает антенна), но используют и более строгие требования отклонения $\Delta = \Lambda/50$. В пересчете на допустимое отклонение в диапазоне с верхней границей 60 ГГц оно не должно превышать 0,1 мм.

Тепловой режим РЗКА определяется воздействием прямого и отраженного солнечного излучения, собственного излучения Земли, а также периодическими заходами в тень Земли. По оценкам специалистов, при выходе из тени Земли перепад температур на метровой поверхности рефлектора может составить 100 градусов, что оказывает воздействие на стабильность формы и размеров антенны и может отрицательно сказаться на диаграмме ее направленности.

Еще одним фактором, способным влиять на конструкцию РЗКА, является срок непрерывной работы спутника в космосе. Современные спутники связи рассчитаны на пятнадцатилетний срок службы, что, с одной стороны, обусловлено экономическими соображениями, так как частый запуск аппаратов повышает конечную стоимость связи, а с другой — научно-техническим прогрессом: за этот период объемы передаваемых данных не возрастают настолько, чтобы применение спутника стало нецелесообразным. При проектировании конструкции РЗКА необходимо учитывать продолжительность размещения на орбите, которая выражается в циклическом характере нагрузок и деградации характеристик используемых материалов. Основной фактор, влияю-

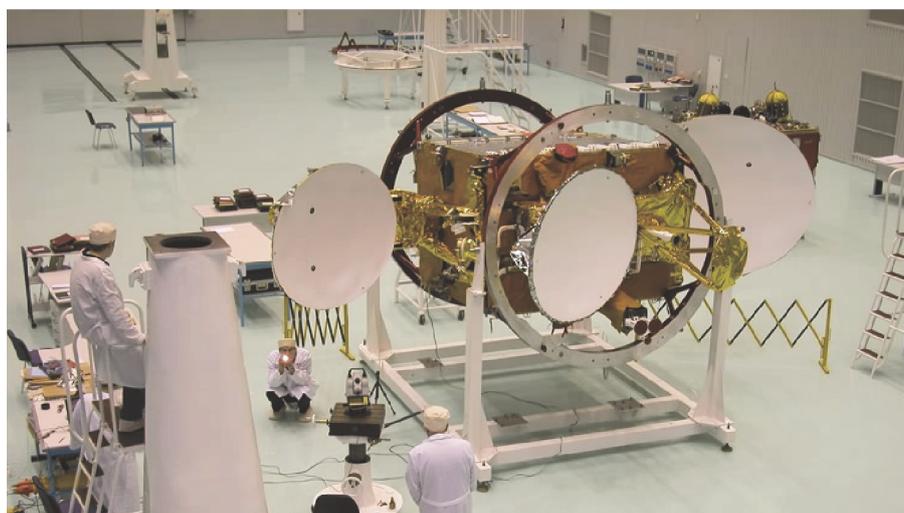


Рис. 1. Спутник «Ямал-201» с рефлекторами по схеме трехслойной оболочки (ПАО «РКК «Энергия»)

щий на длительную прочность углепластика, — ультрафиолетовое излучение, поэтому при выборе материалов необходимо применять либо УФ-стойкие полимерные смолы, либо специальные покрытия.

Таким образом, конструкция рефлектора должна отвечать следующим требованиям: малая погонная плотность, не превышающая 2 кг/м^2 , стабильность формы отражающей поверхности в условиях орбитального полета на уровне $0,1 \text{ мм}$ и пятнадцатилетний срок службы.

Традиционные конструктивно-компоновочные решения РЗКА. С началом использования композиционных материалов в конструкции РЗКА получила широкое распространение конструктивно-компоновочная схема (ККС) трехслойной параболической оболочки с сотовым наполнителем. В настоящее время оболочки рефлектора изготавливают из углепластика, а соты — из алюминиевых сплавов или углепластика. Так, рефлекторы антенн спутников семейства «Ямал», разработанные ПАО «РКК «Энергия» и АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева», представляют собой трехслойные сотовые конструкции с несущими слоями из углепластика (рис. 1) [2].

Главное преимущество данной схемы — высокая жесткость, достигаемая путем разнесения несущих слоев углепластика, однако погонная плотность таких конструкций превышает 3 кг/м^2 [3]. Кроме того, возникают технологические трудности изготовления трехслойных сотовых конструкций с гладкой вогнутой поверхностью, так как с уменьшением толщины оболочек начинает проявляться рельеф сотового наполнителя [4].

Другая распространенная ККС, способная удовлетворить строгим требованиям, предъяв-

ляемым к космическим рефлекторам, — схема из сдвоенных оболочек (Dual-gridded reflector) (рис. 2) [5].

Примером реализации этой схемы является рефлектор HPS GmbH диаметром $1,2 \text{ м}$ для работы в Ku–Ka-диапазонах. Поскольку масса конструкции составляет $4,3 \text{ кг}$, ее погонная плотность превышает $3,5 \text{ кг/м}^2$ [6], что больше среднего значения, характерного для ККС с сотовым наполнителем.

Дополнительную жесткость конструкции РЗКА могут придавать ферменные элементы по типу тех, которые были использованы на спутнике Ямал-401 (рис. 3, а), разработанном АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева» совместно с компанией Thales Alenia Space и АО «Газпром космические системы» [7]. Другая компоновка ферменных элементов применена на рефлекторе спутника Intelsat-36, созданном американской компанией Space System Loral (рис. 3, б). Весовая эффективность подобных решений вызывает сомнение в силу массивности элементов. Даже будучи выполненными из углепластика, профили прямоугольного сечения по массе значительно превышают массу отражающей поверхности.

Вероятно, наиболее эффективной с позиции достижения минимальных значений погонной плотности могла бы быть ККС тонкой гладкой оболочки. Для придания ей необходимой жесткости на выпуклой поверхности следовало бы закрепить ребра. Нечто похожее на предлагаемую реберную конструкции уже применялось ранее, но в сочетании с трехслойной оболочкой рефлектора (см. рис. 1 и 4, а). На спутнике Artemis устанавливали два РЗКА диаметром $2,85 \text{ м}$, соответствующие ККС трехслойной оболочки с относительно толстостенным ре-

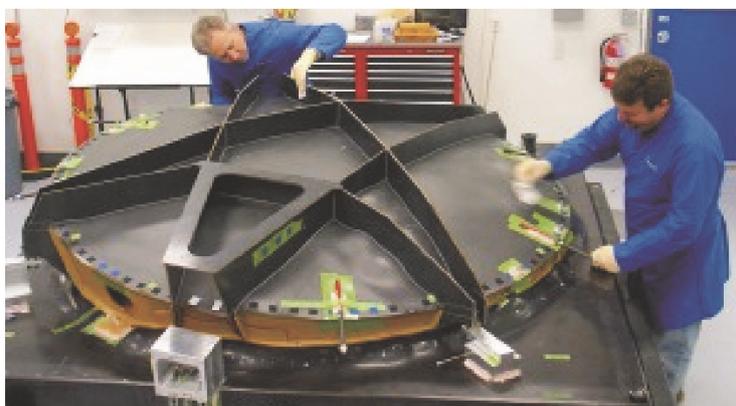


Рис. 2. Рефлектор антенны фирмы Vanguard Space Technologies (США), состоящий из сдвоенных оболочек, усиленных ребрами



а



б

Рис. 3. Спутники связи с рефлекторами, имеющими ферменное усиление:
а — «Ямал-401» (АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева»); б — Intelsat-36 (Space System Loral)

берным подкреплением на выпуклой поверхности (см. рис. 4, а) [8]. Антенны работали в S- и Ka-диапазонах.

Оребрение позволяет создать очень жесткие, размеростабильные и легкие конструкции для работы не только в Ku- и Ka-, но и в V-диапазоне.

Центральная часть уникального рефлектора антенны космического радиотелескопа «Радио-астрон», запущенного в 2010 г., представляет собой осесимметричную параболическую оболочку с системой кольцевых и радиальных ребер на выпуклой поверхности, изготовленную ЗАО «Пластик» в г. Сызрань (рис. 4, б) [9–10].

Схожая схема с радиальными ребрами применена в основном рефлекторе экспериментальной антенны производства ЗАО «Пластик» (рис. 4, в). Этот рефлектор демонстрировался на Международном авиакосмическом салоне

МАКС-2009 в г. Жуковском Московской области [11].

В МГТУ им. Н.Э. Баумана спроектирован, изготовлен и испытан в термовакуумной камере РЗКА с ребрами, выполненными по изогридной схеме (рис. 4, з) [12–22].

Как следует из таблицы, схема оребренной оболочки имеет преимущества по погонной плотности. Если принять во внимание, что возможности уменьшения погонной плотности у ККС трехслойной схемы практически исчерпаны, то перспективы ее снижения для ККС оребренной тонкой оболочки еще не исследованы.

Новые подходы к повышению размерной стабильности и весовой эффективности. Вследствие уникальных удельных механических и теплофизических характеристик углепластик

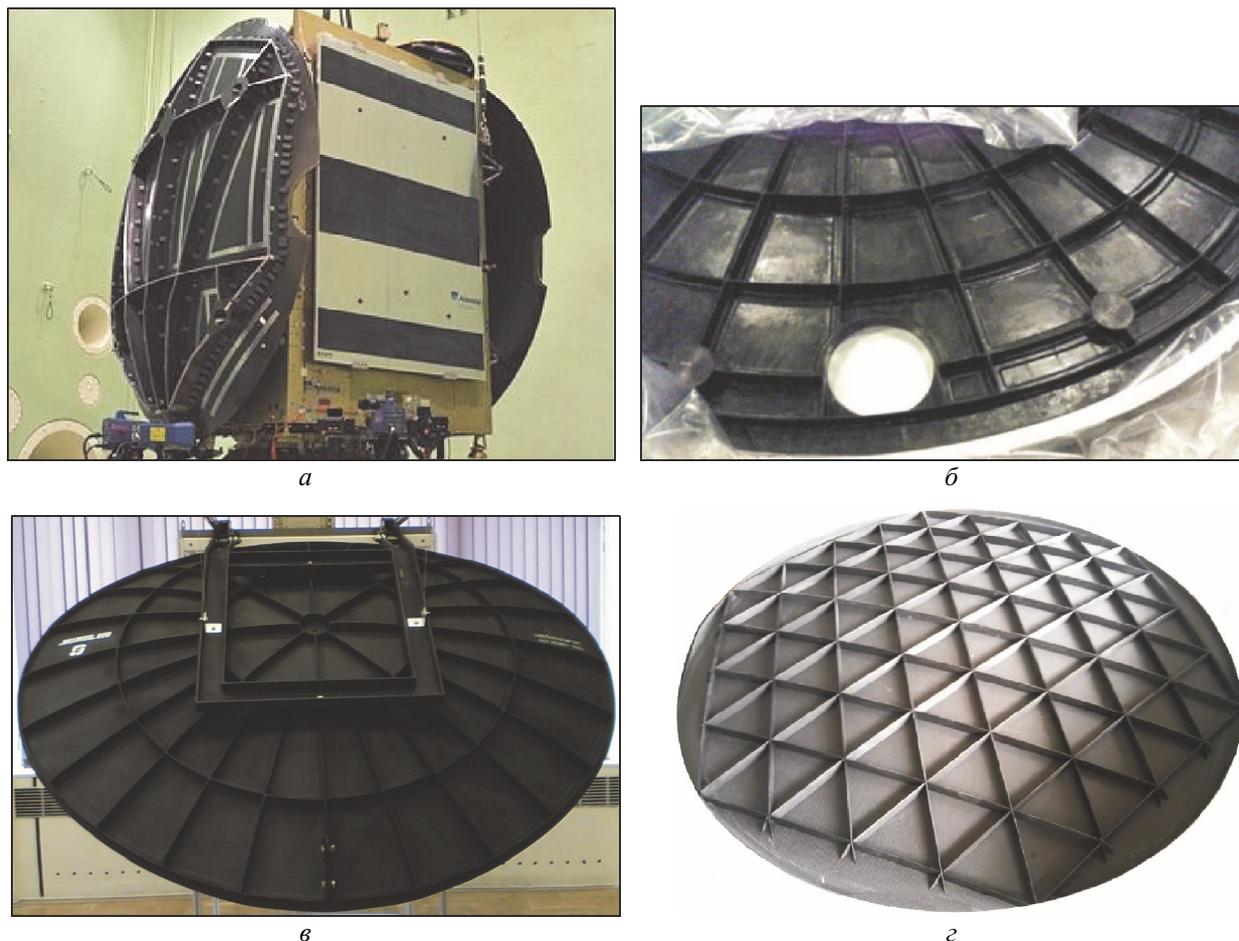


Рис. 4. Различные конструкции рефлекторов с реберным усилением:
 а — РЗКА спутника Artemis; б — центральная часть РЗКА антенны космического радиотелескопа «Радиоастрон» (ЗАО «Пластик»); в — основной РЗКА экспериментальной антенны (ЗАО «Пластик»);
 г — экспериментальный РЗКА (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

является безальтернативным материалом для изготовления РЗКА систем спутниковой связи. Однако важно верно выбрать исходные компоненты углепластика с точки зрения технологических особенностей производства, предполагаемых условий работы конструкции и весовых характеристик.

Ткани из углеродных волокон с однонаправленной, двунаправленной и мультиаксиальной

структурами служат оптимальным исходным компонентом для создания конструкции РЗКА (рис. 5).

Ткани с двунаправленной структурой обладают качеством равнопрочности, что открывает возможности армирования конструкции в двух направлениях одним слоем материала, а значит, повышает технологичность. В свою очередь, равнопрочные ткани подразделяют на обычные и плетеные (рис. 6).

Толщина традиционных тканей составляет в среднем 0,2...0,4 мм, а плетеных — 0,1 мм. В местах переплетения жгутов отклонение их траектории от прямолинейного в значительной степени снижено, что улучшает отражающую способность материала и повышает его жесткость. Кроме того, толщина квазиизотропного углепластика с укладкой $[0^\circ/+30^\circ/-30^\circ/+60^\circ/-60^\circ/+90^\circ]$ из обычной ткани равна 1,8 мм, а из плетеной — 0,6 мм. Оболочка из такого мате-

Значения погонной плотности для разных ККС

| Схема | Производитель | Погонная плотность, кг/м ² |
|------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Трехслойная | HPS GmbH | 3,0 |
| Двойные оболочки | HPS GmbH | 3,5 |
| Оребрение | МГТУ им. Н.Э. Баумана | 2,5 |

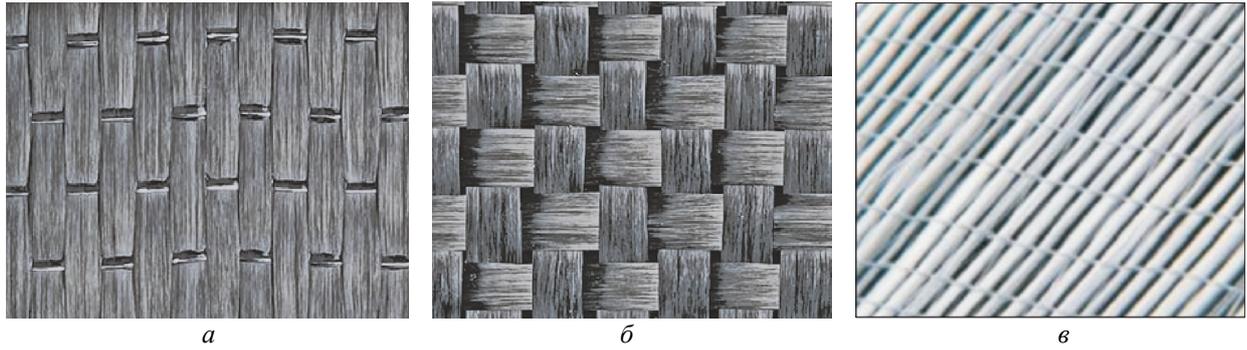


Рис. 5. Основные виды углеродных тканей:
 а — однонаправленные; б — двунаправленные; в — мультиаксиальные

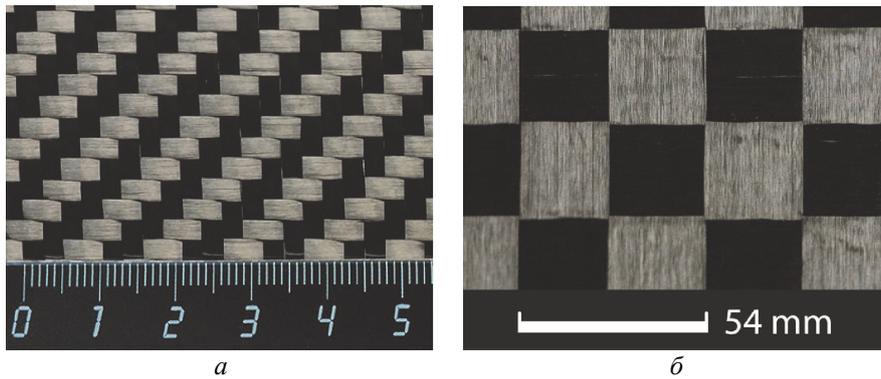


Рис. 6. Равнопрочные ткани на основе обычного (а) и плоского (б) жгутов

риала получается не только более тонкой, но и более легкой, так как в нем меньше расстояние между волокнами, заполняемое эпоксидным компаундом в обычных тканях.

Выбор конструктивно-компоновочной схемы РЗКА. Как уже отмечалось, геометрия расположения ребер может быть различной. При этом конструкция должна удовлетворять тре-

бованиям, предъявляемым к ее жесткости и размеростабильности в условиях орбитального полета. На основе отечественного и иностранного опыта для проектных исследований РЗКА выбраны варианты ККС с ребрами на выпуклой стороне гладкой оболочки (рис. 7).

ККС представляли собой следующее:

- подкрепление по схеме «пятиконечная звезда» высотой 30 мм. На торце оболочки име-

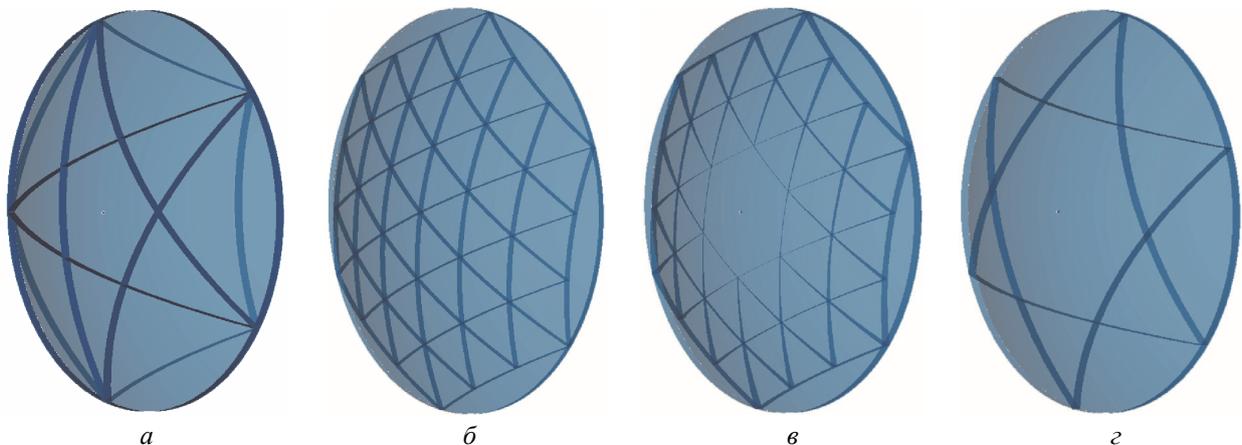


Рис. 7. Варианты подкрепления:
 а — схема «пятиконечная звезда»; б и в — изогридное подкрепление с ребрами постоянной и переменной высоты;
 з — схема «шестиконечная звезда»

ется кольцевое ребро высотой 30 мм. Толщина всех элементов равна 1,0 мм;

- изогридное подкрепление с ребрами постоянной высоты. Шаг и высота ребер составляют 125 и 20 мм соответственно. На торце оболочки есть кольцевое ребро высотой 20 мм. Толщина всех элементов составляет 1,0 мм;

- изогридное подкрепление с ребрами переменной высоты. Шаг и высота ребер составляют 125 мм. Высота ребер изменяется от 30 мм с края и до 3 мм в центре. На торце оболочки имеется кольцевое ребро высотой 20 мм. Толщина всех элементов равна 1,0 мм;

- подкрепление по схеме «шестиконечная звезда» высотой 30 мм. На торце оболочки есть кольцевое ребро высотой 30 мм. Толщина всех элементов составляет 1,0 мм.

Помимо геометрии расположения ребер, важным является учет крепления РЗКА к корпусу космического аппарата. Например, в ре-



Рис. 8. Рефлектор STAAR фирмы RUAG Space AG

флекторе STAAR диаметром 2,4 м фирмы RUAG Space AG, также изготовленном из углеродного волокна (рис. 8), каркас служит и для креп-

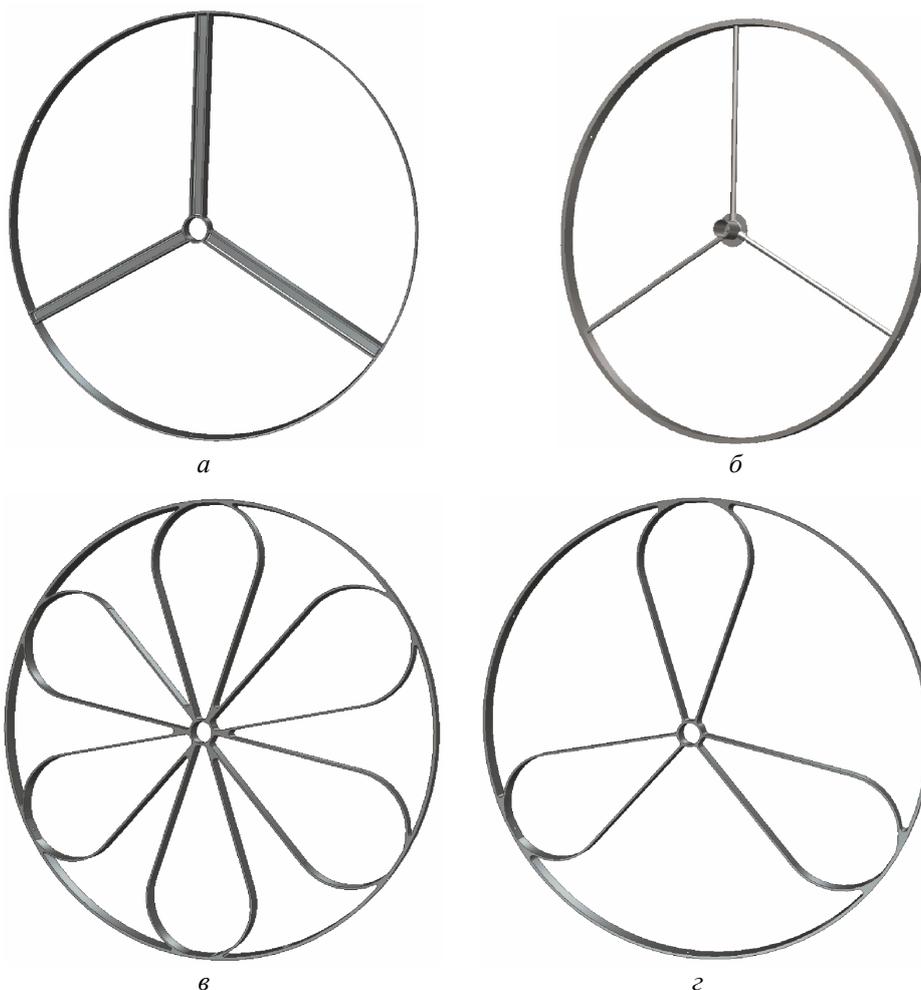


Рис. 9. Крепежные конструкции с использованием: а — двутавров; б — круглых стержней; в, з — профилей прямоугольного сечения

ления рефлектора к корпусу космического аппарата.

Иным подходом может быть использование дополнительных крепежных элементов, соединяемых с РЗКА. К преимуществам такого подхода относится возможность варьирования формой элементов в целях достижения максимальной размеростабильности и жесткости. Рассмотрены варианты с использованием двутавров, круглых стержней, трехслойных профилей прямоугольного сечения (рис. 9).

Тепловой и термомеханический анализ перспективных конструктивно-компоновочных решений рефлекторов. Важнейшим этапом проектирования РЗКА является моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний конструкции применительно к условиям эксплуатации.

Цель работы — определение толщины оболочки, высоты и толщины ребер, наилучшим образом отвечающих строгим требованиям — низкой погонной плотности и высокой размеростабильности, путем сравнения результатов моделирования для ряда вариантов ККС.

При математическом моделировании углепластик наделялся следующими теплофизическими и механическими характеристиками: коэффициент теплопроводности — 31 Вт/(м·К); удельная теплоемкость — 1 000 Дж/(кг·К); плотность — 1 550 кг/м³; излучательная способность (степень черноты) — 0,85; поглощательная способность — 0,735; коэффициент линейного теплового расширения — $5,27 \cdot 10^{-7}$ К⁻¹; модуль Юнга — 140 ГПа; коэффициент Пуассона — 0,3. Предполагалось, что рефлектор работает в составе антенны КА на геостационарной орбите.

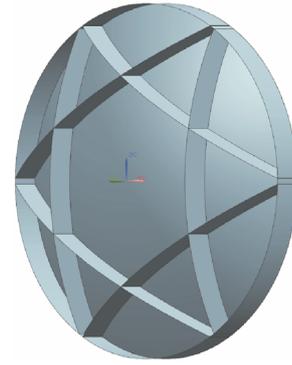


Рис. 10. Технологически оптимизированная конструкция РЗКА

Тепловые расчеты выполнены в программном пакете Siemens PLM Software посредством решателя Space System Thermal. Результаты моделирования температурного состояния для конечно-элементной модели рефлектора были использованы как исходные данные для определения напряженно-деформированного состояния РЗКА с помощью решателя Siemens NX Nastran.

Для проведения сравнительного анализа разработаны компьютерные модели с вариациями геометрических характеристик: толщины оболочки, высоты и толщины ребер. Геометрические характеристики выбраны из условия примерно одинаковой погонной массы для всех вариантов, не превосходящей 1,7 кг/м². Сравнение вариантов конструкций выполнено для момента времени 21 600 с работы на геостационарной орбите, начиная с полного затенения Землей. Этот момент времени соответствовал повороту космического аппарата на 150° относительно оси Земля–Солнце, когда перепад температур на поверхности РЗКА достигает максимальных значений.

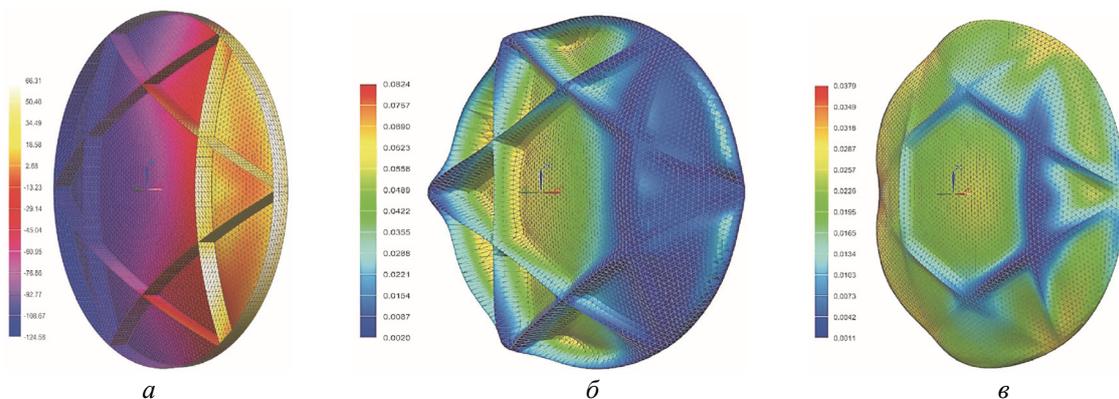


Рис. 11. Результаты моделирования оптимизированного РЗКА:

а — температурное состояние, °С;
б — перемещения, мм, при круговом закреплении РЗКА; в — перемещения, мм, при закреплении РЗКА в центре

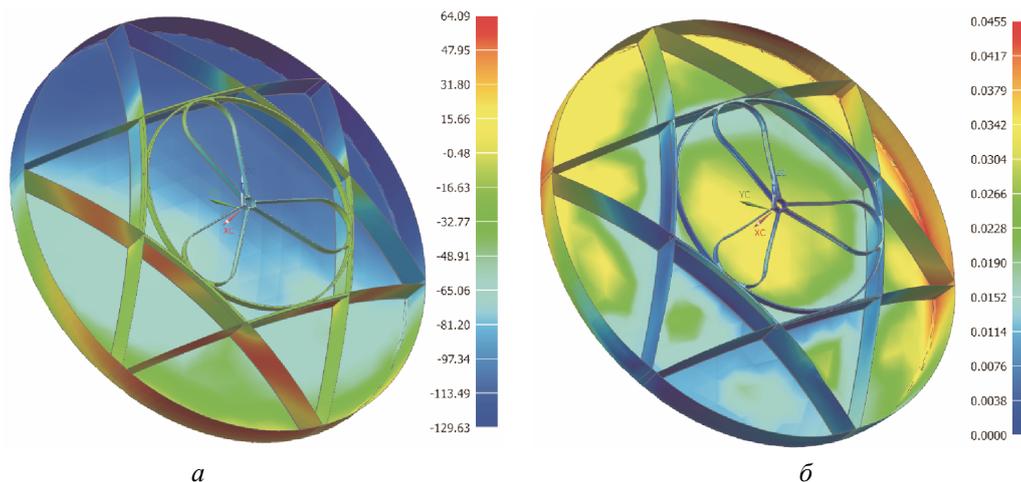


Рис. 12. Результаты моделирования оптимизированного РЗКА с учетом крепежной конструкции:
 а — температурное состояние, °С; б — перемещения, мм

Как показали результаты анализа [23, 24], наименьшие значения перемещений соответствуют схеме ребрения «шестиконечная звезда» с высотой ребер 90 мм. После технологической оптимизации конструкции разработана схема (рис. 10), имеющая следующие параметры: высота ребер 90 мм, толщины оболочки и ребер 0,6 мм. Исходя из конструктивных соображений, внешний край рефлектора скруглен, а окантовка оболочки отклонена на 3° . В месте крепления ребер к оболочке учтено технологическое скругление дугой радиусом 5 мм.

Результаты теплового и деформационного расчета модели оптимизированной конструкции РЗКА приведены на рис. 11.

Также проведено моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний для РЗКА с учетом крепежной конструкции (рис. 12).

Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что отобранная конструкция отвечает строгим требованиям, предъявляемым к РЗКА спутников связи. Перемещения отражающей поверхности при работе на геостационарной орбите не превысят 0,042 мм при массе

конструкции в сборе 2,15 кг и погонной плотности 1,75 кг/м².

Выводы

1. На современном этапе развития систем космической связи актуальна разработка конструкций РЗКА, имеющих погонную плотность менее 2 кг/м² и высокую стабильность формы и размеров с перемещениями поверхности под действием эксплуатационных нагрузок до 0,1 мм.

2. Проведенные проектные исследования показали, что конструкция рефлектора, выполненного по схеме «тонкая оболочка с реберным подкреплением на выпуклой поверхности», может отвечать указанным выше требованиям. Применение плоской углеродной ткани в комбинации с эпоксидным связующим, реберной схемы «шестиконечная звезда» и оригинальной ажурной схемы крепления к корпусу космического аппарата позволят достигнуть показателей погонной плотности на уровне 1,75 кг/м² при максимальных перемещениях поверхности в условиях полета по геостационарной орбите, не превышающих 0,05 мм.

Литература

- [1] Recommendation ITU-R V.431-6. Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-6-199304-S!!PDF-E.pdf (accessed 18 September 2017).
- [2] Спутник связи ЯМАЛ-200 (2017). URL: <http://www.energia.ru/automatic/yamal-200.html> (дата обращения 11 июля 2017).
- [3] Reflector Antennas. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/> (accessed 15 June 2017).

- [4] Чичурин В.Е., Наговицин А.В., Патраев Е.В., Михнеев М.М., Лукина Н.М. Устройства для работы с сотовым наполнителем при изготовлении зеркальных рефлекторов. *Решетневские чтения-2013*, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2013, т. 1, с. 449–450.
- [5] *Designing for dimensional stability in space* (2005). URL: <http://www.compositesworld.com/articles/designing-for-dimensional-stability-in-space> (accessed 15 June 2017).
- [6] Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflector. *Proceed. 4th European Conf. on Antenna and Microwave Propagation*, Barcelona, Spain, 12–16 April 2010, 5 p. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5497865> (accessed 18 September 2017).
- [7] *Спутник Ямал-401* (2017). URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/projects> (дата обращения 12 декабря 2017).
- [8] *Advanced Data Relay and Technology Mission Satellite* (2009). URL: <http://weebau.com/satellite/A/artemis.htm> (accessed 1 June 2017).
- [9] Архипов М.Ю. Идентификация и моделирование деформированного состояния лепестка космического радиотелескопа «Радиоастрон» при проведении термовакuumных испытаний. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2001, № 3, с. 30–40.
- [10] Архипов М.Ю., Виноградов И.С., Новиков С.Б., Федорчук С.Д. Численное моделирование температурных деформаций космического радиотелескопа «Радиоастрон». *Космические исследования*, 2014, № 5, с. 428–429.
- [11] 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, № 2–4, с. 555–560.
- [12] 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*, 2012, № S7, с. 70–81.
- [13] Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/638.html> (дата обращения 01 сентября 2017).
- [14] Резник С.В., Денисов О.В., Чуднов И.В. Основные подходы к формированию программы термовакuumных испытаний прецизионных рефлекторов зеркальных космических антенн. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 8, с. 167–184. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/612062.html> (дата обращения 01 сентября 2017).
- [15] 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. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 8, с. 151–166. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/612095.html> (дата обращения 01 сентября 2017).
- [16] Reznik S.V. Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas. *Proc. 3rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications*, 13–16 May 2013, Wrexham, Nord Wales, UK, pp. 7–11.
- [17] 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*, Минск, 28–30 октября 2014, Минск, ОИПИ НАН Беларуси, 2014, т. 1, с. 223–226.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Reznik S., Prosuntsov P., Timoshenko V., Denisov O., Minakov D., Mikhailovsky K. Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna. *Proc. 36th ESA Antenna*

- Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science*, 5–9 October 2015, Noordwijk, Netherlands, 2015, 6 p.
- [21] Reznik S., Prosuntsov P., Azarov A. Design study of a lightweight reflector for the space antenna. *Proc. 36th ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science*, 5–9 October 2015, Noordwijk, Netherlands, 2015, 1 p.
- [22] 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. 699–705.
- [23] Reznik S.V., Novikov A.D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors. *MATEC Web of Conferences, Thermophysical Basis of Energy Technologies*, 2017, no. 01012, 2016, 5 p.
- [24] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D., Aung Zaw Ye. Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 153, no. 1, 7 p.

References

- [1] *Recommendation ITU-R V.431-6. Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications*. Available at: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-6-199304-S!!PDF-E.pdf (accessed 18 September 2017).
- [2] *Sputnik sviazi IaMAL-200 [YAMAL-200 Communications Satellite]*. (2017). Available at: <https://www.energia.ru/en/automatic/yamal-200.html> (accessed 11 July 2017).
- [3] *Reflector Antennas*. Available at: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/> (accessed 15 June 2017).
- [4] Chichurin V.E., Nagovitsin A.V., Patraev E.V., Mikhneev M.M., Lukina N.M. Ustroistva dlia raboty s sotovym zapolnitelem pri izgotovlenii zerkal'nykh reflektorov [The device for work with honeycomb filler in the manufacture of mirror reflectors]. *Reshetnevskie chteniia-2013 [Reshetnevskie reading-2013]*. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva publ., 2013, vol. 1, pp. 449–450.
- [5] *Designing for dimensional stability in space* (2005). Available at: <http://www.compositesworld.com/articles/designing-for-dimensional-stability-in-space> (accessed 15 June 2017).
- [6] Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflector. *Proceedings 4th European Conf. on Antenna and Microwave Propagation*, Barcelona, Spain, 12–16 April 2010, pp. 1–5. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5497865> (accessed 18 September 2017).
- [7] *Sputnik Iamal-401 [Satellite Yamal-401]*. (2017). Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/projects> (accessed 12 December 2017).
- [8] *Advanced Data Relay and Technology Mission Satellite* (2009). Available at: <http://weebau.com/satellite/A/artemis.htm> (accessed 1 June 2017).
- [9] Arkhipov M.Iu. Identifikatsiia i modelirovanie deformirovannogo sostoianiia lepestka kosmicheskogo radioteleskopa «Radioastron» pri provedenii termovakuumnykh ispytaniy [Identification and Simulation of Deformed State of «Radioastron» Space Radio Telescope Mirror Segment in Thermal-Vacuum Testing]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]*. 2001, no. 3, pp. 30–40.
- [10] Arkhipov M.Iu., Vinogradov I.S., Novikov S.B., Fedorchuk S.D. Chislennoe modelirovanie temperaturnykh deformatsii kosmicheskogo radioteleskopa «Radioastron» [Numerical simulation of thermal deformations of the space radio telescope «Radioastron»]. *Kosmicheskie issledovaniia [Cosmic Research]*. 2014, no. 5, pp. 428–429.
- [11] Bitkina E.V., Denisov A.V., Bitkin V.E. Konstruktivno-tekhnologicheskie metody sozdaniia razmerostabil'nykh kosmicheskikh kompozitnykh konstruksii integral'nogo tipa [Design – engineering methods of creating of dimensionally stable space structures of integrated type made of composite materials]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. 2012, vol. 14, no. 2–4, pp. 555–560.

- [12] Vechtomov V.A., Zimin V.N., Kuzenkov A.N., Dronov D.V., Kozlov A.A. Bortovaia mnogoluchevaia antenna Ka-diapazona dlia zonirovannogo obsluzhivaniia territorii RF sputnikovoi sviaz'iu s vysokoskorostnym dostupom [The onboard multi-beam antenna in Ka band for zoned and service, Russia satellite communication with high speed access]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering]. 2012, no. S7, pp. 70–81.
- [13] Reznik S.V. Aktual'nye problemy proektirovaniia, proizvodstva i ispytaniia raketno-kosmicheskikh kompozitnykh konstruksii [Topical problems of rocket-space composite structures designing, production and testing]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation]. 2013, is. 3. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/638.html> (accessed 01 September 2017).
- [14] Reznik S.V., Denisov O.V., Chudnov I.V. Osnovnye podkhody k formirovaniu programmy termovakuumnykh ispytaniia pretsizionnykh reflektorov zerkal'nykh kosmicheskikh antenn [Main approaches to formation of a thermal vacuum test program of precision mirror reflectors of space antennas]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2013, no. 8, pp. 167–184. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/612062.html> (accessed 01 September 2017).
- [15] Mikhailovskii K.V., Reznik S.V. Razrabotka matematiko-algoritmicheskogo obespecheniia dlia rascheta vnutrennikh napriazhenii v tonkostennykh reflektorakh iz ugleplastika vo vremia tekhnologicheskogo protsessa ikh izgotovleniia [Development of mathematical and algorithmic support for determination of internal stresses in thin reflectors made of carbon-epoxy composite during the technological process of manufacturing]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2013, no. 8, pp. 151–166. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/612095.html> (accessed 01 September 2017).
- [16] Reznik S.V. Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas. *Proc. 3rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications*, 13–16 May 2013, Wrexham, Nord Wales, UK, pp. 7–11.
- [17] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Proektnye issledovaniia reflektorov zerkal'nykh kosmicheskikh antenn s vysokoi stabil'nost'iu formy i maloi pogonnoi plotnost'iu [Design studies of reflectors of mirror space antennas with a high dimensional stability and low linear density]. *Mater. 6 Belorusskogo kosmicheskogo kongressa* [The proceedings of the 6th Belarusian space Congress]. Minsk, 28–30 October 2014, Minsk, OIPI NAN Belarusi publ., 2014, vol. 1, pp. 223–226.
- [18] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Obosnovanie konstruktivno-komponovochnoi skhemy reflektora zerkal'noi kosmicheskoi anteny s vysokoi stabil'nost'iu formy i maloi pogonnoi plotnost'iu [Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 2015, vol. 88, no. 3, pp. 674–680.
- [19] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Modelirovanie temperaturnogo i napriazhenno-deformirovannogo sostoianii reflektora zerkal'noi kosmicheskoi anteny [Modeling of the temperature and stressed-strained states of the reflector of a mirror space antenna]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 2015, vol. 88, no. 4, pp. 945–950.
- [20] Reznik S., Prosuntsov P., Timoshenko V., Denisov O., Minakov D., Mikhailovsky K. Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna. *Proc. 36th ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science*, 5–9 October 2015, Noordwijk, Netherlands, 2015, 6 p.
- [21] Reznik S., Prosuntsov P., Azarov A. Design study of a lightweight reflector for the space antenna. *Proc. 36th ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science*, 5–9 October 2015, Noordwijk, Netherlands, 2015, 1 p.
- [22] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Obosnovanie konstruktivno-komponovochnoi skhemy reflektora zerkal'noi kosmicheskoi anteny s vysokoi stabil'nost'iu formy i maloi pogonnoi plotnost'iu [Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length]. *Inzhenerno-*

- fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 2015, vol. 88, no. 3, pp. 699–705.
- [23] Reznik S.V., Novikov A.D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors. *MATEC Web of Conferences, Thermophysical Basis of Energy Technologies*, 2017, no. 01012, 2016, 5 p.
- [24] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D., Aung Zaw Ye. Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 153, no. 1, 7 p.

Статья поступила в редакцию 19.10.2017

Информация об авторах

РЕЗНИК Сергей Васильевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

ПРОСУНЦОВ Павел Викторович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru).

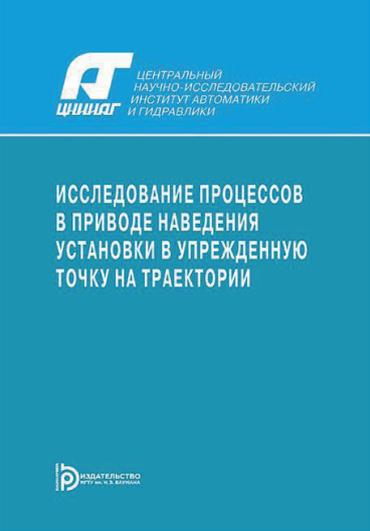
НОВИКОВ Андрей Дмитриевич (Москва) — аспирант, ассистент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com).

Information about the authors

REZNIK Sergey Vasilievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

PROSUNTSOV Pavel Viktorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru).

NOVIKOV Andrey Dmitrievich (Moscow) — Postgraduate, Teaching Assistant, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
**В.М. Кашина, В.Д. Свечарника, В.Л. Солунина,
А.Б. Шаповалова**
**«Исследование процессов
в приводе наведения установки
в упрежденную точку на траектории»**

Рассмотрены особенности работы приводов наведения установки в режиме слежения за упрежденной точкой на траектории. Исследованы статистические характеристики сигналов в системе наведения по результатам математического моделирования и по данным экспериментальных работ.

Для инженеров и научных работников, занимающихся проектированием систем управления.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru