

УДК 62-213.1

СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ СВЕТОВОГО ПОТОКА

Байбородов А. А., Васильева Т. С., Волков М. В., Кузнецов А. Д., Двирный В. В.

АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Железногорск

На сегодняшний день солнечные батареи (БС) считаются одним из самых надежных и достаточно хорошо отработанных вариантов обеспечения космического аппарата энергией. Мощность излучения Солнца на орбите Земли позволяет получать примерно 1367 Вт/м^2 .

Это позволяет получать примерно 410 Вт на 1 м^2 поверхности солнечных батарей (при КПД $\approx 30\%$).

Традиционные космические солнечные батареи работают на прямом неконцентрированном солнечном излучении. Основу БС как генератора постоянного тока составляют фотопреобразователи (ФП). [1]

Создание космических солнечных батарей на основе концентраторов солнечного излучения позволит существенно снизить расход дорогих полупроводниковых структур на единицу электрической мощности вырабатываемой БС. Так 1 м^2 ФП стоит примерно 160 тыс. долларов. Именно этим и объясняется постоянный интерес к БС с концентраторами солнечного излучения.

В настоящее время разработки солнечных батарей с концентраторами ведутся как в России, так и за рубежом.

При осуществлении патентного поиска зарубежных конструкций, найдены БС с концентраторами следующих типов:

- БС «RAPDAR TM» – панели с отражающими концентраторами;
- БС с концентраторами «FACT»;
- БС «PASP-Plus» – панели с концентраторами в виде выпуклых линз Френеля;
- БС «SCARLET» – панели с концентраторами в виде арочных линз Френеля;
- БС «SLASR» – панели с концентраторами в виде ультра лёгких линз Френеля.

Рассмотрим каждую из конструкций по отдельности.

БС «RAPDAR TM» концентрируют солнечный поток с помощью специальных отражателей [2]. Данная технология позволяет устанавливать меньшее количество фотопреобразователей на БС, что снижает ее стоимость. БС данного типа представлена на рисунке 1. Фирма «Boeing» провела эксперименты с использованием БС данного типа на КА «Boeing 702» [3,4].

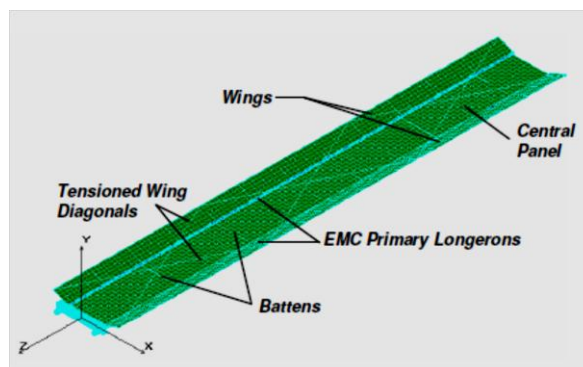


Рис. 1. БС «RAPDAR TM»

Однако эксперименты окончились неудачей. По сообщениям печати, возможная причина – перегрев ФП и выход ФП из строя, так как при большой площади отражателей требуется определенный теплоотвод от ФП.

Согласно патентам [3,4] открываемые отражатели на панелях БС планарного типа – значительно усложняют исполнение конструкции панели БС. Существуют упрощенные концентраторы Flexible Array Concentrator Technology («ФАСТ») [5], которые являются легкими высокоэффективными отражающими концентраторами и имеют значительно меньшую стоимость. «ФАСТ» – отражатель, который может использоваться как на гибких панелях при скручивании, так и на планарных панелях БС. Концентраторы «ФАСТ» представлены на рисунке 2.

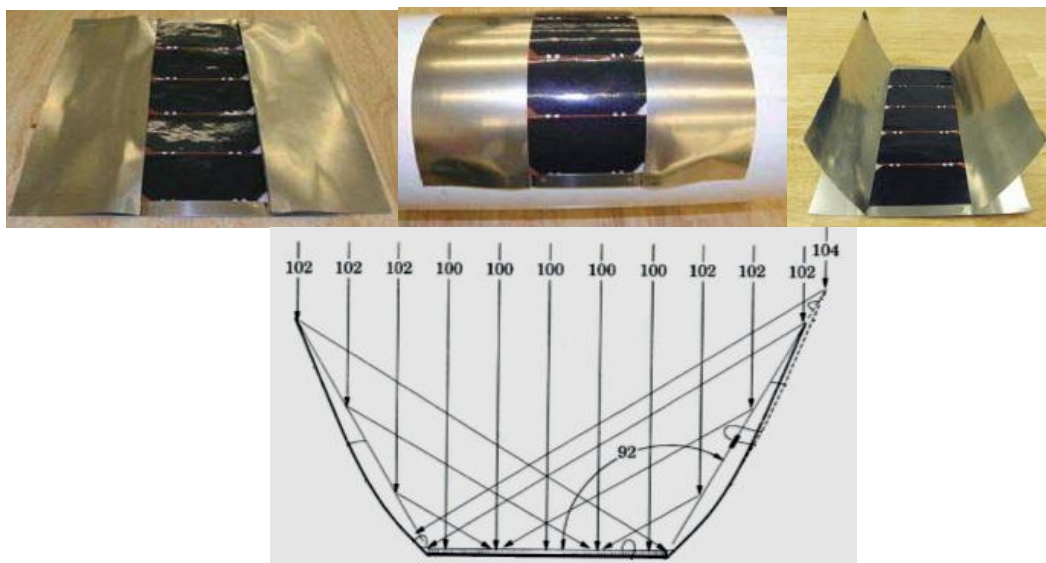


Рис. 2. Концентраторы «ФАСТ»

Исследовательский центр Льюиса (НАСА), фирма Boeing и ENTECH (США) в начале 90-х годов разработали и создали модули с концентраторами в виде отдельных выпуклых линз Френеля [6]. Вторичные оптические элементы – монолитные стеклянные конусы с зеркальной кромкой обеспечили дополнительную защиту полупроводниковых каскадов от воздействия космической радиации и увеличили допустимый угол неточной ориентации модулей на Солнце до $3,5 - 4^\circ$. Первая такая система, успешно применена в космосе для КА «PASP - Plus» (полет 1994-1995). Летные испытания подтвердили высокую радиационную стойкость БС с концентраторами, обусловленную защитой ФП линзовыми концентраторами. Модуль данного типа представлен на рисунке 3.

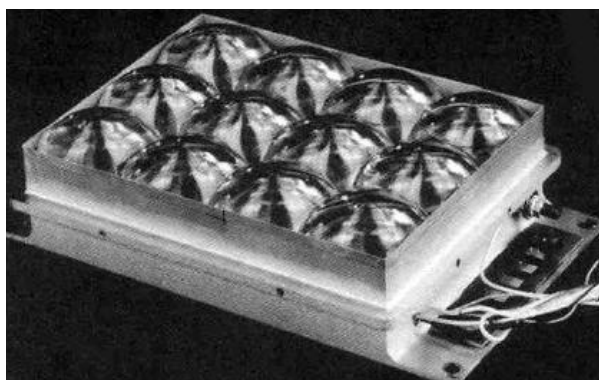


Рис. 3. Модуль с концентраторами в виде отдельных выпуклых линз «PASP - Plus»

Начиная с 1992 г. в США интенсивно проводились работы по созданию БС с концентраторами на основе линейных линз Френеля арочного типа [7, 8, 9]. В 1998 г. с участием нескольких американских фирм была изготовлена первая полномасштабная космическая БС с такими концентраторами, получившая название «SCARLET». Установка вырабатывает электрическую мощность 2,6 кВт для питания ионного электроракетного двигателя, обеспечивающего движение межпланетного КА «Deep Space 1». Полет начался в ноябре 1998 г. и прошел успешно. Линейный арочный концентратор шириной 85 мм имеет достаточно большое фокусное расстояние (около 90 мм), чтобы КПД линзы был высоким (~90%). Это привело к необходимости сделать линзы складывающимися, чтобы уменьшить транспортировочный объем панели БС.

В 1998-2000 гг. исследовательский центр Гленна (НАСА), фирма ENTECH, АЕС-ABLE и Институт космической энергетики разработали и реализовали новую концепцию и технологию изготовления БС с концентраторами, названную «SLA» (Stretched Lens Array) с существенно улучшенными характеристиками [9]. В новом подходе используют простой продольно упругий материал линзы, который натягивается между складывающимися в транспортировочном положении арками. Названный «Stretched Lens Array» («SLA»), новый ультралёгкий концентратор панелей БС имеет фокусное расстояние около 90 мм, но за счет складных рамок обеспечивает очень компактный объем укладки в транспортировочном положении. Общий вид «SLA» в транспортировочном и рабочем положениях представлен на рисунке 4. На конструкцию оформлен патент [10].

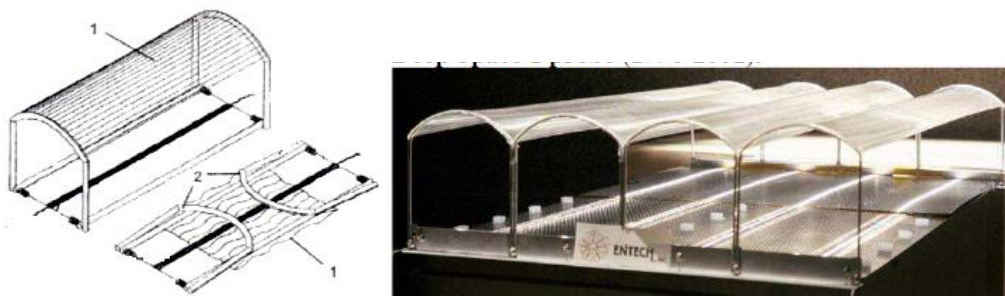


Рис. 4. Общий вид «SLA»: 1 – ультралёгкий концентратор; 2 – раскладывающиеся арки

Концентраторы «SLA» совместимы с панелями БС разных платформ, от маленьких, разворачивающихся планарных крыльев БС, до больших, развертываемых устройств гибких крыльев.

Самой легкой и самой компактной панелью БС является космическая система «Stretched Lens Array Square Rigger» («SLASR») фирмы ATK [11]. Панели «SLASR» прошли все основные испытания элементов, включая сохранность покрытия линзы. Линза и радиатор составляют приблизительно 70 % общего количества массы крыла, удельная масса крыла которого соответствует $0,85 \text{ кг/м}^2$. Будущие планы относительно «SLASR» включают летное испытание, чтобы подтвердить расчетные параметры панели. Также планируется дальнейшего развития «SLASR» – для питания солнечного электрического двигателя (SEP) системы согласно контракту с НАСА. Вид БС «SLASR» представлен на рисунке 5.

В отечественном спутникостроении также рассматривается использование разных типов концентраторов:

- осесимметричный фокон;
- параболоцилиндрическое зеркало;
- жесткие линейные линзы Френеля.

Применение осесимметричного фокона позволяет обеспечить снижение необходимости точного слежения за Солнцем до $\pm 7^\circ$ по обеим осям.

Благодаря применению параболоцилиндрического зеркала точное слежение за Солнцем (порядка $\pm 2^\circ$) должно осуществляется только по одной оси (она параллельна образующей зеркала).

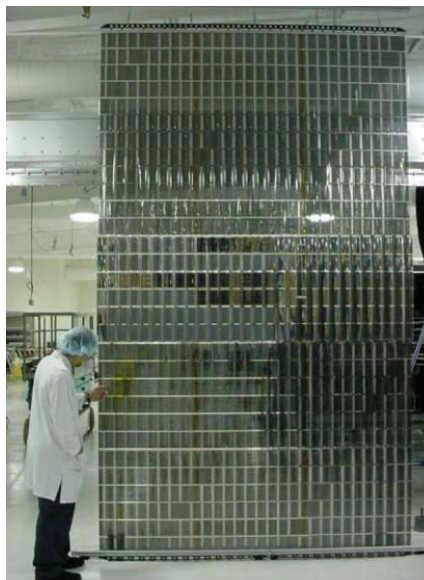


Рис. 5. БС «SLASR»

В обоих случаях используются вторичные оптические элементы. Например, в схеме с фоконем, предлагается использовать сферическую линзу, приклеенную к фронтальной поверхности ФП. Эта линза является многофункциональным элементом: уменьшает углы падения солнечных лучей на поверхность ФП за счет преломления на внешней границе, обеспечивает надежное механическое крепление фокона в модуле и дополнительно улучшает радиационную защиту ФП в условиях космического пространства. Оптическая схема ФП с данными типами концентраторов представлена на рисунке 6.

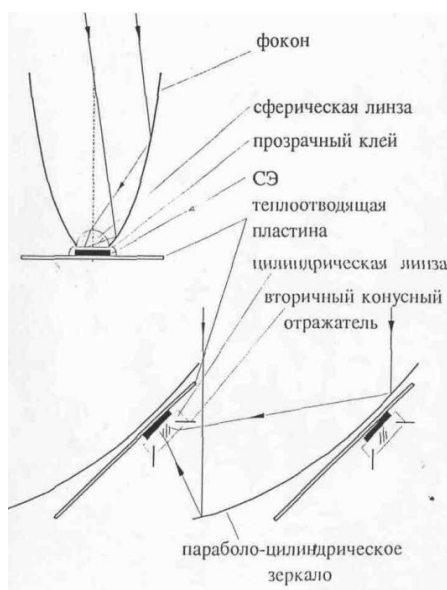


Рис. 6. Оптическая схема ФП с осесимметричным фоконем и параболоцилиндрическим зеркалом

Конструкция третьего типа концентраторов максимально приближена к традиционным схемам БС для простоты применения в составе существующих и

разрабатываемых ракетно-космических систем отечественного производства. Данная конструкция подразумевает использование жестких линейных линз Френеля. Оптическая схема элемента БС с концентраторами данного типа представлена на рисунке 7.

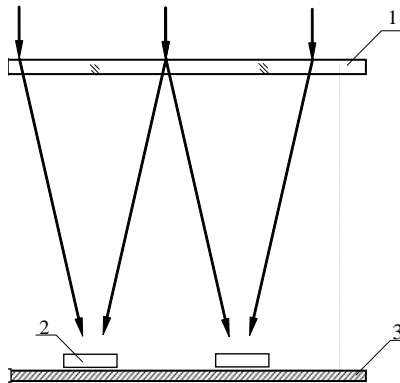


Рис. 7. Оптическая схема элементов БС с жесткими линейными линзами Френеля: 1 – линза Френеля; 2 – ФП; 3 – радиатор

Для жесткого закрепления линз и ФП спроектирован каркас солнечной батареи (КБС), который представлен на рисунке 8.

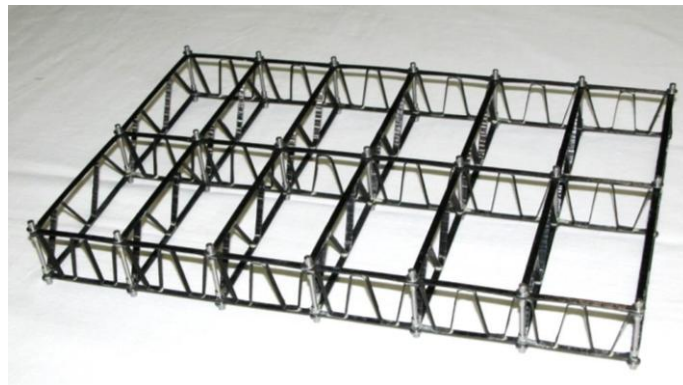


Рис. 8. Каркас

Фокусное расстояние, как конструкционный параметр, определяет архитектурную высоту несущей конструкции КБС, что в свою очередь определяет условия пакетирования КБС. Поэтому представляет интерес возможность снижения удельного веса БС с концентраторами, за счет понижения архитектурной высоты несущей конструкции. Это возможно осуществить при использовании концентратора с меньшим фокусным расстоянием. На данную конструкцию оформлен патент [12].

Применение солнечных батарей с концентраторами в области космической солнечной энергетики имеет важное преимущество: концентрирование солнечного излучения приводит к существенному уменьшению размеров ФП структур, что позволяет резко снизить стоимость БС в целом. К недостаткам можно отнести следующее:

- имеет большую сложность исполнения по сравнению с планарными;
- сравнительно большая масса для конструкций с жесткими линзами Френеля по сравнению с планарными БС.

В дальнейшей работе необходимо исследовать возможность применения пленочных линз, тем самым добиться снижения массы всей конструкции в целом.

Библиографический список

1. Чеботарев, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие [Текст]/ В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011. – 488 с., ил. ISBN 978-5-86433-510-9.
2. Lake, M. S. The Fundamentals of Designing Deployable Structures with Elastic Memory Composites [Текст]: Campbell, D.; Presented at the 2004 IEEE Aerospace Conference – Big Sky, March 6-13, 2004 – IEEE Paper No. 1134.
3. Патент US 006017002 A. Thin-Film Solar Reflectors deployable from an edge-stowed configuration/ Stephen D. Burke, Ray A. Stribling [и др.]. – № 6017002; заявка: 25.06.2000 – 8 с.
4. Патент EP 0976655 A1. Thin-Film Reflektors for concentration solar array/ Ray A. Stribling, Jr. – заявл. 30.06.1998; публ. 02.02.2000. – 16 с.
5. John H. FACT, Mega-ROSA, SOLAROSA [Текст]: Glenn Research Center – Ohio, 2012.
6. Патент US 20140263847 A1. Solar arrays, deployment mechanisms therefor, and related methods/ Michael I. Eskenazi, Nicholas C. Wilder, David M. Murphy. – US13/804,331; заявл. 14.03.2013; публ. 18.09.2014. – 33 с.
7. Rizk J. Reflectors and Concentrators for Solar Panels [Текст]: Hellany A., Nagrial M.; University of Western Sydney – Australia, 1997. – ISBN: 978-1-61804-012-1.
8. Murphy D. M. SCARLET: design of the Fresnel concentrator array for New Millennium Deep Space 1 [Текст]: Eskenazy M.I.; Conf Rec. of the 26th IEEE PVSC – Anaheim, 1997. – с. 861-856.
9. Henry W. Brandhorst, Jr. Ultralight, Compact, Deployable, High-Performance Solar Concentrator Array for Lunar Surface Power [Текст]: Julie, A.R.; Space Research Institute Auburn University – Auburn, 2014.
10. Dwayne, L. ST8 Validation Experiment: Ultraflex-175 Solar Array Technology Advance: Deployment Kinematics and Deployed Dynamics Ground Testing and Model Validation [Текст]: Steve White; 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition – Orlando, Florida, 7 January 2010. – AIAA 2010-1497 4.
11. Henry W. Brandhorst, Jr. The Stretched Lens Array Square Rigger (SLASR) for Space Power [Текст]: 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC) 1126-29 – San Diego, California, June 2006 – AIAA 2006-4137.
12. Патент RU 2 575 182. Панель солнечной батареи/ В.И. Кузоро, В.И. Халиманович, В.С. Калиновский, Т.С. Васильева. – 2014127672/28; заявл. 07.07.2014; опубл. 20.02.2016. – 7 с.