

Особенности создания и результаты испытания экспериментальной солнечной батареи космического назначения с каркасом сотовой конструкции из углепластика

© А.А. Наумова^{1,2}, А.А. Лебедев^{1,2}, Н.Т. Вагапова^{1,2,3},
М.Б. Каган¹, М.В. Синёва^{1,2}

¹АО «НПП «Квант», Москва, 129626, Россия

²НИТУ «МИСиС», Москва, 119049, Россия

³РТУ МИРЭА, Москва, 119454, Россия

Приведены современные достижения в области совершенствования фотовосприимчивой электрогенерирующей части солнечных батарей для космических аппаратов, в частности, особенности использования фотоэлектрических преобразователей с высокими удельными характеристиками. Рассмотрены каркасы солнечных батарей разного типа и показана перспективность легких жестких каркасов сотовой конструкции. Приведено описание конструкции, процесса создания и испытаний экспериментальной солнечной батареи малой площади для космических аппаратов с фотовосприимчивой электрогенерирующей частью из трехкаскадных фотоэлектрических преобразователей на тонком каркасе сотовой конструкции из углепластика с полиамидным покрытием. Режимы испытаний были выбраны аналогичными режимам испытаний солнечных батарей космических аппаратов, рассчитанных для работы на геостационарной орбите. Проведены такие испытания экспериментальной солнечной батареи, как термоциклические, на воздействие повышенной влажности, на прочность при воздействии синусоидальной вибрации. Результаты испытаний признаны успешными.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, солнечный элемент, солнечная батарея, космический аппарат, сотовый каркас, углепластик, термоциклические испытания, испытания на повышенную влажность, вибрационные испытания

Введение. Продолжающееся развитие космической техники требует совершенствования систем энергоснабжения космических аппаратов (КА). Благодаря совокупности целого ряда таких параметров, как высокие удельные характеристики, надежность, безопасность, а кроме того, прямому принципу преобразования фактически неисчерпаемой энергии одним из основных первичных источников энергии для КА уже более 60 лет являются солнечные батареи (СБ) [1, 2]. Несмотря на постоянное совершенствование как конструкции СБ, так и ее фотовосприимчивой электрогенерирующей части (ФГЧ), преобразующей энергию солнечного света в электрическую, сохраняется запрос на дальнейшее повышение значений основных характеристик:

- увеличение срока активного существования СБ в условиях космического пространства свыше 15 лет;

- получение большей энергии с СБ меньших площадей (более 300 Вт/м²) и меньшей массы (более 300 Вт/кг);

- повышение мощности в стартовом объеме СБ (более 25 кВт/м³).

Основа ФГЧ СБ — современный фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), имеющий эффективность преобразования $\eta = 28...32$ % (в спектре АМ0 при 25 °С). Дальнейший интенсивный, до 10 %, прирост КПД ФЭП, который, как показано в работе [1], наблюдался на мировом рынке ФЭП в середине 2000-х годов при переходе от кремниевых ФЭП ($\eta = 10...15$ %) к трехкаскадным на основе гетероструктур из материалов типа АЗВ5 ($\eta = 25...30$ %) [1], сдерживается необходимостью применения новых сложных технологий. Оптимизация и совершенствование структуры трехкаскадных ФЭП позволяют достигать $\eta = 30...32$ % [3], создание четырехкаскадных ФЭП — $\eta = 32$ % в условиях серийного производства [4] (ожидаемое значение КПД — до 35 %). Дальнейшее увеличение числа каскадов выше шести уже не будет давать значительного прироста эффективности. Ожидается, что предельное значение η будет близким к 40 % [5]. В связи с этим актуальными являются работы по повышению не только абсолютных значений эффективности преобразования, но и удельных значений путем снижения массы ФГЧ [1, 6].

Цель настоящей работы — на основании анализа преимуществ и недостатков современных ФГЧ определить конструкцию, которая в случае идеальных соответствующих весовых показателей может обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики.

Один из способов прироста удельной мощности трехкаскадных ФЭП — сокращение толщины и, следовательно, массы, не участвующей в генерации (работе нижнего каскада) части подложки [1, 6, 7]. У традиционных трехкаскадных ФЭП с полупроводниковой структурой InGaP/InGaAs/Ge 95 % массы приходится на германиевую подложку. Толщина подложки также превалирует в общей толщине полупроводниковой структуры — 150 ± 20 мкм по сравнению с ~ 6 мкм структуры, выращенной эпитаксиально. При этом для работы нижнего каскада, формируемого в подложке диффузионным путем в процессе эпитаксиального роста, должна быть достаточной — от 10 до 30 мкм [6]. Поскольку СБ современных КА имеет большую площадь (например, у телекоммуникационных КА на платформе «Экспресс-1000» она составляет около 40 м², «Экспресс-2000» — около 80 м² [8]), даже незначительное сокращение массы каждого ФЭП (на 0,6 г при утонении на треть толщины подложки) при том, что их количество около 20 тыс. шт. на одну СБ, позволит уменьшить ее массу на 12 кг, т. е. $\sim 8...10$ % [8]. Однако ощутимое снижение массы СБ, а также обеспечение необходимых механических свойств возможны только при использовании жестких легких каркасов [6].

В данной статье приведены аргументы в поддержку возможности и целесообразности создания СБ космического назначения с ФГЧ из каскадных ФЭП на перспективном легком и одновременно достаточно жестком каркасе с малой строительной высотой. Кроме того, представлены результаты экспериментов, подтверждающие жизнеспособность такой СБ в требуемых условиях.

Каркасы солнечных батарей. В отечественной космической фотовольтаике наибольшее распространение получили каркасы СБ с сетчатым или струнным полотном, на котором монтируется ФГЧ. Такие каркасы обладают следующими преимуществами:

- простой теплоотвод (излучательный теплосброс с тыльной стороны ФЭП через несплошное полотно);
- использование альbedo Земли на околоземных орбитах при применении ФЭП с двусторонней чувствительностью [9];
- процессы сборки СБ на таких каркасах хорошо отработаны;
- нормальная работа СБ подтверждена в условиях космического пространства на разных орбитах в течение 15 лет.

Нашедшие широкое применение за рубежом каркасы на основе сотовой конструкции также имеют ряд преимуществ:

- бóльшая жесткость, за счет чего на них можно организовать автоматизированную сборку СБ;
- им легче придать сложную геометрическую форму;
- возможность монтажа на такие каркасы хрупких утоненных ФЭП, обладающих повышенными удельными характеристиками.

Последний пункт преимуществ каркасов на основе сотовой конструкции является главным, так как применение хрупких ФЭП на гибких (сетчатых и струнных) каркасах не столь эффективно и сопряжено с высокими технологическими потерями. При этом благодаря сплошной структуре каркаса, обеспечивающего защиту ФЭП от прямого воздействия факторов космического пространства, можно отказаться от монтажа защиты на тыльной поверхности, обязательной при использовании ФЭП на каркасах с сетчатым и струнным полотном, например стекла, что также должно обеспечить уменьшение массы — около 1 г с каждого ФЭП.

Однако такие каркасы, фактически являющиеся развитием конструкторского решения, заложенного в первых СБ, где ФЭП монтировали непосредственно на корпус КА, унаследовали и многие их недостатки. Так, в случае использования в качестве сотового основания металлических конструкций возможны проблемы с возникновением короткого замыкания ФГЧ на каркас. Поэтому перспективным можно считать применение углепластиковых сотовых каркасов с изолирующей поверхностью.

Следует отметить, что широкое распространение получили трехслойные сотовые конструкции [1, 10, 11], которые состоят из двух тонких прочных обшивок, сотового заполнителя и адгезионных слоев. Важно то, что достигнута малая строительная высота углепластикового каркаса со сформированными ФГЧ, повышающими мощность в стартовом объеме при сохранении требуемой жесткости, легкости, высокой виброустойчивости, стойкости к атмосферным воздействиям и повышенной эксплуатационной надежности [12, 13].

Экспериментальная часть. Для подтверждения изложенной выше информации был изготовлен и испытан экспериментальный образец солнечной батареи на сотовом каркасе (СБС) площадью $\sim 110 \text{ см}^2$ габаритными размерами $470 \times 235 \times 5 \text{ мм}$ с ФГЧ из сборок современных трехкаскадных ФЭП (структура InGaP/InGaAs/Ge) размером $37 \times 76 \times 0,15 \text{ мм}$ с эффективностью преобразования солнечного излучения $\eta \sim 28 \%$, смонтированных на сотовом каркасе.

Для подтверждения изложенной выше информации был изготовлен и испытан экспериментальный образец солнечной батареи на сотовом каркасе (СБС) с ФГЧ из сборок современных трехкаскадных ФЭП. Основные параметры сотового каркаса приведены ниже:

Площадь, см	~ 110
Габариты, мм.....	$470 \times 235 \times 5$
Тип ФЭП.....	Каскадные со структурой InGaP/InGaAs/Ge
Средняя эффективность преобразования солнечного излучения ФЭП, η	$\sim 28 \%$.

Каркас сотовой конструкции из углепластика был сформирован полимеризацией лент из препрега (на основе углеткани, пропитанной эпоксидной смолой), уложенных между расположенными в шахматном порядке методом плотной упаковки эластичными формообразующими элементами (например из силикона), находящимися под давлением с последующим отверждением. Такой способ изготовления ячеистого сотового заполнителя из композиционных материалов обеспечивает создание максимальной площади контакта между склеиваемыми поверхностями препрега и равномерного давления на формируемую ячейку по всем направлениям [14]. Затем каркас был покрыт полиамидной пленкой с лицевой стороны. Вся его суммарная конструкционная высота составила $h_k \approx 5 \text{ мм}$.

Сотовый каркас (рис. 1) был разработан и предоставлен ГНЦ «ФГУП «Центр Келдыша» [14]. Проектирование, сборка и испытания экспериментального образца были проведены в АО «НПП «Квант».

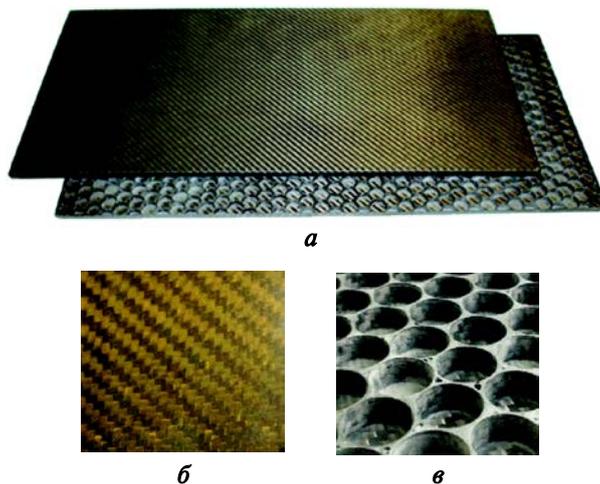


Рис. 1. Внешний вид углепластикового каркаса солнечной батареи:
а — общий вид углепластикового каркаса с лицевой и тыльной стороны;
б — фактура лицевой стороны каркаса; *в* — фактура тыльной стороны каркаса

Особенности создания экспериментального образца солнечной батареи. При изготовлении СБ используют общие технологические операции формирования из ФЭП элементарной сборочной единицы (рис. 2, *а*, *б*) — Cover Integrated Cell (CIC; дословно — покрытая интегрированная ячейка):

- приварка к ФЭП лицевых и тыльных токосъемных шин, а также шунтирующих диодных модулей (если ФЭП не имеет встроенного диода [15]), которые необходимы для предотвращения электрических потерь, возникающих в процессе эксплуатации СБ;

- покрытие защитными пластинами из специального оптического стекла с нанесенным клеящим компаундом ФЭП с лицевой стороны для обеспечения защиты от факторов космического пространства.

Эти операции были выполнены при изготовлении СБС. Приварка шин и диодов осуществлялась методом контактной сварки (напряжение импульса 1,4 В, время сварки 5 мс, время нарастания и спада импульса 1,25 мс).

В зависимости от типа каркаса в конструкции CIC может присутствовать и второе стекло, которым покрывается тыльная сторона ФЭП. Второе защитное стекло может применяться и в случае сплошных каркасов, когда для компенсации напряжений, возникающих из-за различий коэффициентов термического расширения материалов каркаса и CIC, интегрированная ячейка монтируется к каркасу через элементы (компаунд), не покрывающие всю тыльную поверхность этой сборочной единицы. При создании CIC для СБС защитные пластины из специального оптического стекла на тыльную поверхность ФЭП не монтировались.

Далее возможны следующие варианты в исполнении и последовательности технологических этапов:

1) из полученных СИС компонуют и собирают секции, ряды секций с проводными выводами монтируются на каркас. Данный вариант удобен при монтаже ФГЧ на гибкие каркасы [16];

2) каждую СИС монтируют на каркас индивидуально, и по месту производится коммутация. Этот вариант позволяет автоматизировать процесс монтажа ФГЧ, его используют при монтаже на плоские жесткие каркасы.

При изготовлении СБС был применен первый вариант:

- из СИС были скомпонованы и собраны секции (рис. 2, в);
- ряды секций с проводными выводами с помощью клеящего компаунда были смонтированы на каркас из углеволокна, в котором предварительно были высверлены отверстия для вывода проводов на тыльную сторону каркаса.

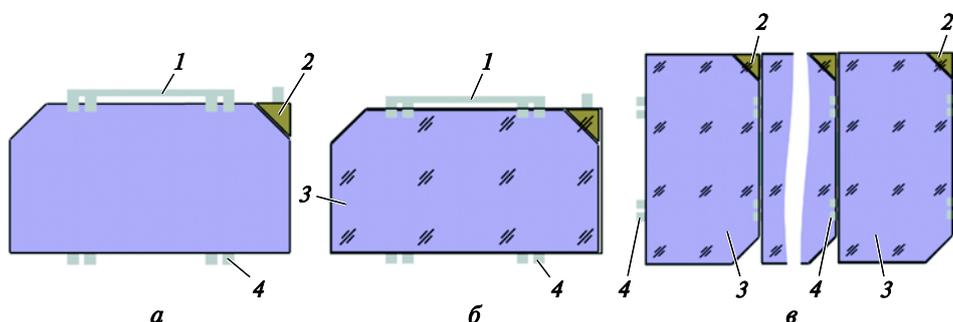


Рис. 2. Схема внешнего вида одиночной СИС до (а) и после (б) нанесения защитных пластин из специального оптического стекла, секций из СИС (в):

1 — токосъемная шина на лицевой поверхности ФЭП; 2 — шунтирующий модуль с токосъемным выводом; 3 — защитные пластины из специального оптического стекла; 4 — токосъемная шина на тыльной поверхности ФЭП

Разрыв на рис. 2, в демонстрирует возможность переменного исполнения секций в зависимости от необходимой энергетической потребности, так как комбинированием последовательного и параллельного соединений можно получить требуемые ток и напряжение СБ. Однако изготовление слишком длинных секций нетехнологично и затрудняет их монтаж на каркас СБ. Был выбран следующий вариант компоновки (рис. 3):

- 3 секции по 6 СИС;
- 3 секции по 3 СИС;
- 3 секции по 2 СИС.

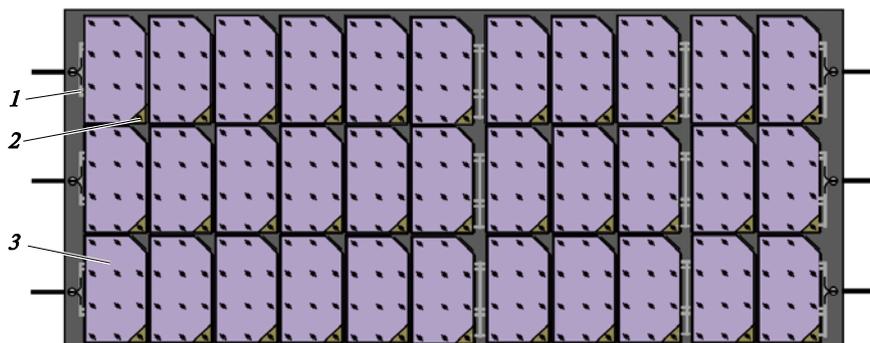


Рис. 3. Схема внешнего вида образца солнечной батареи на сотовом каркасе

При небольшой высоте каркаса $h_k \sim 5$ мм общая строительная высота СБС составляет не более 6 мм. Учитывая сравнительно малую высоту изготовленной СБС и принимая, что удельная мощность ФГЧ в оптимальной точке вольт-амперной характеристики (ВАХ) лежит в пределах $300 \dots 400$ Вт/м² ($P_{уд.ВАХ}$), пространство, необходимое для безопасного размещения каждой отдельной панели большой раскрываемой (трансформируемой) СБ, составляет ~ 10 мм. Поэтому следует ожидать, что в 1 м³ стартового объема будет можно разместить не менее 30 кВт потенциально генерируемой мощности ($P_{ст.об}$) на начало активной эксплуатации СБ.

Расчеты энерго-массовых характеристик СБС, выполненные с учетом того, что $h_{СБС} = 5,7$ мм и масса ФГЧ $m_{ФГЧ} = 1,31$ кг/м², по итогам измерений ВАХ с помощью импульсного имитатора внеатмосферного солнца (спектр АМ0, комнатная температура; ИИВС) показали следующие значения:

$$P_{уд.ВАХ} = 310,5 \text{ Вт/м}^2;$$

$$P_{ст.об} = 62 \text{ кВт/м}^3.$$

Испытание солнечной батареи на сотовом каркасе. Для подтверждения стойкости выбранной конструкции к воздействиям, которые воспринимают СБ во время стадий своего жизненного цикла, были проведены следующие виды испытаний:

- термоциклические;
- на воздействие повышенной влажности;
- на прочность при воздействии синусоидальной вибрации.

Режимы испытаний — аналогичные для испытаний СБ КА, рассчитанных для работы на геостационарной орбите. Перед проведением испытаний каждого вида и после них осуществлялись контроль внешнего вида СБС (рис. 4, а), проверка электрического сопротивления изоляции и электрических характеристик на ИИВС при комнатной температуре.

Перед проведением испытаний полости по краям сотовой подложки СБС с тыльной стороны были залиты компаундом для обеспечения жесткого крепления на испытательных стендах (рис. 4, б).

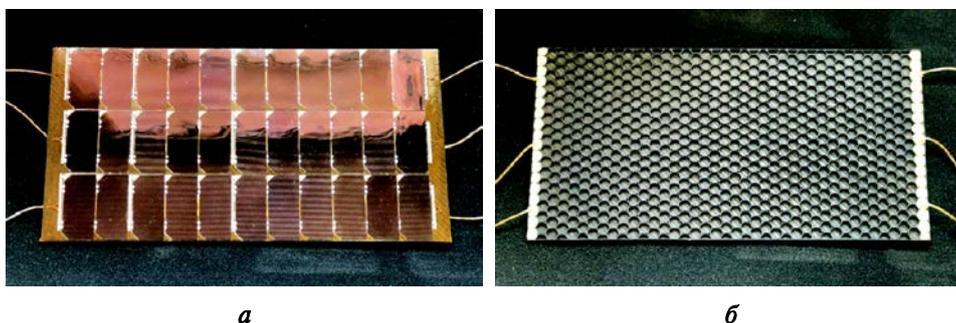


Рис. 4. Внешний вид солнечной батареи на сотовом каркасе после испытаний:
а — лицевая сторона; б — тыльная сторона

Термоциклические испытания в объеме 55 термоциклов проводили в двух камерах:

- камере холода при $T = -(65 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$;
- камере тепла при $T = (130 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$.

Для проведения каждого термоцикла СБС поочередно выдерживалась в каждой камере в течение 25 мин; время переноса из одной камеры в другую составляло не более 5 мин. После 55 термоциклов СБС была выдержана при нормальных климатических условиях в течение 2 ч.

Испытания на воздействие повышенной влажности проводили в камере тепла при $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. СБС выдерживали в течение 1,5...2 ч. Затем повышалась относительная влажность воздуха до 93 %. Указанные параметры поддерживались в камере в течение 5 сут. После испытаний СБС выдерживали в нормальных климатических условиях в течение 2 ч.

Испытания на прочность при воздействии синусоидальной вибрации СБС проводили последовательно в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Для проведения испытаний в одной из трех плоскостей возбуждали колебания СБС в октавных поддиапазонах, при этом проходя каждый октавный поддиапазон от меньшего значения частоты к большему. Время прохождения каждого октавного поддиапазона составляло не менее 2 мин.

Результаты измерения основных электрических характеристик СБС (ток короткого замыкания ($I_{кз}$, А), напряжение холостого хода ($U_{х.х}$, В), ток ($I_{опт}$, А) и напряжение ($U_{опт}$, В) в оптимальной точке ВАХ, фактор прямоугольности ВАХ (FF , %) на ИИВС при комнатной температуре после каждого вида испытаний представлены в таблице.

**Результаты измерений основных электрических характеристик СБС
(АМ0, 25 °С)**

Вид испытаний	Основные электрические характеристики					
	$I_{к.з.}, A$	$U_{к.з.}, B$	$I_{опт.}, A$	$U_{опт.}, B$	$FF, \%$	КПД, %
До испытаний	1,35	29,61	1,26	27,22	85,80	27,80
После термоциклических испытаний	1,35	29,40	1,25	26,71	84,12	27,01
После испытания на воздействие повышенной влажности	1,34	29,44	1,24	27,02	84,93	27,11
После испытания на прочность при воздействии синусоидальной вибрации	1,34	29,42	1,23	26,65	83,15	26,52

Внешний вид с лицевой и тыльной стороны СБС после всех видов испытаний показан на рис. 4.

Обсуждение результатов. На основе сравнения результатов измерений основных электрических характеристик СБС до и после испытаний каждого вида, а также осмотра внешнего вида образца СБС и измерения сопротивления изоляции было сделано заключение о том, что СБС успешно прошла все виды испытаний.

Сохранение внешнего вида СБС без появления видимых повреждений:

- возникновения трещин каркаса и элементов СИС (трещин на стеклах, на ФЭП);
- отслаивания стекол от ФЭП или СИС от каркаса;
- появление пузырей и следов воздействия влаги в компаунде под стеклами;
- образование сколов на каркасе и ФГЧ;
- отслаивание элементов коммутации, свидетельствующее о правильности выбора конструкции, технологических режимов и примененных материалов.

В частности, подтверждена возможность отказа от монтажа защитной пластины из специального оптического стекла на тыльную поверхность ФЭП и компенсации разницы коэффициента термического расширения с помощью применяемого клеящего компаунда. Благодаря отсутствию в каркасе металла было сохранено высокое значение сопротивления изоляции (не менее 20 МОм). Результаты измерений основных электрических характеристик свидетельствуют об отсутствии невидимых глазу скрытых повреждений: сравнение значения наиболее чувствительной характеристики — тока короткого замыкания — с начальным значением показало уменьшение всего на 3 %. Таким образом, было подтверждено достижение и сохранение $P_{ст.об} \approx 60 \text{ кВт/м}^3$ при $h_{СБС} \approx 6 \text{ мм}$, $P_{уд.ВАХ} \approx 310 \text{ Вт/м}^2$ и удельной массы СБС $m_{СБС} \approx 3,4 \text{ кг/м}^2$.

Следует отметить, что эти значения получены при формировании ФГЧ СБС из ФЭП стандартной толщины со средними значениями $\eta = 28 \%$, поэтому следует ожидать более высоких величин указанных параметров при применении в конструкции СБ перспективных ФЭП меньшей массы и толщины, использование которых в СБ с другими (гибкими) каркасами, как уже отмечалось, связано с рядом трудностей.

Описанные исследования необходимо рассматривать как промежуточный этап, поскольку они не позволяют говорить о результатах длительного воздействия низкоэнергетических электронов, плазмы, жесткого ультрафиолетового излучения и других факторов космического пространства на предлагаемую конструкцию и, в частности, на углепластиковый каркас. Используемые для ФГЧ СБС материалы (компаунд, защитные пластины из специального оптического стекла, лицевые и тыльные шинки, диоды и др.) и ФЭП находят применение и в других СБ, в составе которых уже успешно прошли летные испытания. Таким образом, наиболее интересно поведение полимерного материала каркаса и всей конструкции в сборе, поскольку под воздействием солнечной радиации в полимерах происходит сшивка в перпендикулярном направлении углеродных цепочек, что может привести к понижению гибкости и повышению хрупкости материала и каркаса в целом.

Заключение. Успешное проведение испытаний экспериментальной СБ на углепластиковом каркасе с малой строительной высотой позволяет с оптимизмом смотреть на перспективу дальнейшего повышения как абсолютных характеристик СБ (за счет совершенствования существующих и применения новых ФЭП), так и удельных (за счет применения легких жестких каркасов и утоненных ФЭП без защиты с тыльной стороны оптическими стеклами), в частности, достижения $P_{\text{ст.об}} > 60 \text{ кВт/м}^3$ и $P_{\text{уд. ВАХ}} > 310 \text{ Вт/м}^2$. Положительно на параметрах СБ, в том числе на их стоимости, должна сказаться возможность автоматизации сборки СБ при использовании жесткого каркаса.

Авторский коллектив выражает особую благодарность за помощь в подготовке статьи С.В. Янчуру, Е.В. Слыщенко, В.Ф. Иванову, О.Н. Терешковой, Е.П. Слыщенко.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Слыщенко Е.В., Наумова А.А., Лебедев А.А., Генали М.А., Вагапова Н.Т., Жалнин Б.В. Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АПВВ. *Сибирский журнал науки и технологий*, 2018, т. 19, № 2, с. 308–324.
- [2] Раушенбах Г. *Справочник по проектированию солнечных батарей*. М.М. Колтун, ред. Москва, Энергоатомиздат, 1983, 360 с.

- [3] Sharps P., Aiken D., Cho B., Cruz S., Derkacs D., Fatemi N., Haas A., Kerestes C., Miller N., Pantha B., Patel P., Stan M., Stavrides A., Steinfeldt J., Struempel C., Whipple S. Next generation radiation hard IMM space solar cells. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603002
- [4] Guter W., Dunzer F., Ebel L., Hillerich K., Köstler W., Kubera T., Meusel M., Postels B., Wächter C. Space solar cells – 3G30 and next generation radiation hard products. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603005
- [5] Suarez F., Liu T., Sukiasyan A., Lang J., Pickett E. Advances in dilute nitride multi-junction solar cells for space power applications. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03006. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603006
- [6] Каган М.Б., Жалнин Б.В., Вагапова Н.Т., Лебедев А.А., Слыщенко Е.В., Леднев А.М. Улучшение энергомассовых характеристик гетеропереходных трехкаскадных фотопреобразователей космического назначения. *Электронные и электромеханические системы и устройства: сборник научных трудов*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2016, с. 411–416.
- [7] Cappelluti F., Ghione G., Gioannini M., Bauhuis G., Mulder P., Schermer J., Cimino M., Gervasio G., Bissels G., Katsia E., Aho T., Niemi T., Guina M., Kim D., Wu J., Liu H. Novel concepts for high-efficiency lightweight space solar cells. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603007
- [8] Нестеришин М.В., Стадухин Н.В., Крючков П.А. Современные системы электропитания космических аппаратов информационного обеспечения производства АО «ИСС». *Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. Вып. 2*. Химки, АО «НПО Лавочкина», 2017, с. 476–483.
- [9] Билалов Б.А., Саркаров Р.Н., Сафаралиев Г.К. *Солнечный модуль*. Пат. №2468305 Российская Федерация, 2012, бюл. № 33, 5 с.
- [10] Безручко К.В., Гайдуков В.Р., Губин С.В., Драновский В.И., Карпов Я.С., Туркин И.Б. и др. *Солнечные батареи автоматических космических аппаратов (компоновка на КА, конструкции узлов, проектировочные расчеты)*. Харьков, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2001, 276 с.
- [11] Геллер Б.Э., ред. *Справочник по композиционным материалам*. В 2 кн. Кн. 2. Москва, Машиностроение, 1988, 584 с.
- [12] Гайдачук А.В., Карпикова О.А., Кондратьев А.В., Сливинский М.В. *Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения. В 2 т.* Гайдачук А.В., ред. Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, 2012, 279 с.
- [13] Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Сливинский М.В., Гайдачук В.Е., Гайдачук А.В. Новая концепция оптимизации по массе сотовых конструкций каркасов панелей солнечных батарей и негерметичных панелей космических аппаратов. *Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева*, 2008, № 1, с. 136–141.
- [14] Дрондин А.В., Зернов О.Д., Янчур С.В. *Способ изготовления ячеистого сотового заполнителя из композиционных материалов*. Пат. №2623781 Российская Федерация, 2017, бюл. № 19, 7 с.
- [15] Самсоненко Б.Н. *Способ изготовления фотопреобразователя со встроенным диодом*. Пат. №2645438 Российская Федерация, 2016, бюл. № 6, 13 с.

- [16] Imaizumi M., Takamoto T., Kaneko N., Nozaki Y., Ohshima T. Qualification test results of IMM triple-junction solar cells, space solar sheets, and light weight & compact solar paddle. *E3S Web of Conferences 16*, 2017, 03012. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603012

Статья поступила в редакцию 23.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Наумова А.А., Лебедев А.А., Вагапова Н.Т., Каган М.Б., Синёва М.В. Особенности создания и результаты испытаний экспериментальной солнечной батареи космического назначения с каркасом сотовой конструкции из углепластика. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2003>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Королёвские чтения — 2020), Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 28–31 января 2020 г.

Наумова Анастасия Александровна — заместитель начальника отдела АО «НПП «Квант», аспирант НИТУ «МИСиС». e-mail: naumova_aa@msk.npp-kvant.ru

Лебедев Андрей Александрович — заместитель начальника отдела АО «НПП «Квант», ассистент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, инженер кафедры физической химии НИТУ «МИСиС». e-mail: lebedev.aa@misis.ru

Вагапова Наргиза Тухтамышевна — канд. хим. наук, начальник отдела АО «НПП «Квант», старший преподаватель кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ «МИСиС», доцент кафедры физики и химии материалов РТУ МИРЭА. e-mail: vagapova_nt@msk.npp-kvant.ru

Каган Марлен Борисович — д-р техн. наук, главный конструктор по фотоэнергетике, АО «НПП «Квант». e-mail: otdel_17@npp-kvant.ru

Синёва Мария Владимировна — старший научный сотрудник АО «НПП «Квант», аспирант НИТУ «МИСиС». e-mail: umc@npp-kvant.ru

An experimental space-purpose solar cell with a carbon fiber honeycomb frame: features of development and test results

© A.A. Naumova^{1,2}, A.A. Lebedev^{1,2}, N.T. Vagapova^{1,2,3},
M.B. Kagan¹, M.V. Sineva^{1,2}

¹ Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”,
Moscow, 129626, Russia

² National University of Science and Technology “MISiS”,
Moscow, 119049, Russia

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“MIREA — Russian Technological University”, Moscow, 119454, Russia

The study describes the design, the process of developing and testing an experimental solar cell of $S \approx 110 \text{ cm}^2$ for spacecraft with a photogenerating part of three-stage photovoltaic converters on a carbon fiber reinforced plastic honeycomb frame coated with a polyamide. The honeycomb frame was developed and introduced by Keldysh Research Center; design, assembly and testing of an experimental prototype of the solar cell were carried out in JSC SPU «Kvant». The main advantage of the considered sample of the solar cell is a low construction height of the carbon fiber frame with the formed photogenerating part, which increases the power in the starting volume and the specific power at the optimum point while maintaining the required rigidity, lightness, high vibration resistance, resistance to weathering and increased operational reliability. The test modes were selected similar to the ones for solar cells of spacecraft, designed to operate in geostationary orbit. The following tests were carried out: thermal cycling, high humidity, strength with exposure to sinusoidal vibration. Before and after testing of each type, the solar cell was monitored; the electrical insulation resistance and electrical characteristics were checked on a pulsed simulator of an extra-atmospheric sun at room temperature. The test results were recognized as successful: the most sensitive characteristic - short-circuit current, in comparison with the initial value showed a decrease of only 3 %.

Keywords: photoconverter, solar cell, spacecraft, honeycomb frame, carbon fiber, thermal cycling tests, high humidity tests, vibration tests

REFERENCES

- [1] Slyschenko E.V., Naumova A.A., Lebedev A.A., Genali M.A., Vagapova N.T., Zhalnin B.V. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii — Siberian Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 308–324.
- [2] Rauschenbach H.S. *Solar Cell Array Design Handbook. The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion*. Springer Netherlands, 1980, 549 p. [In Russ.: Rauschenbach H.S. *Spravochnik po proyektirovaniyu solnechnykh batarey*. Koltun M.M., ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 360 p.].
- [3] Sharps P., Aiken D., Cho B., Cruz S., Derkacs D., Fatemi N., Haas A., Kerestes C., Miller N., Pantha B., Patel P., Stan M., Stavrides A., Steinfeldt J., Struempel C., Whipple S. Next generation radiation hard IMM space solar cells. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603002
- [4] Guter W., Dunzer F., Ebel L., Hillerich K., Köstler W., Kubera T., Meusel M., Postels B., Wächter C. Space solar cells – 3G30 and next generation radiation

- hard products. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603005
- [5] Suarez F., Liu T., Sukiasyan A., Lang J., Pickett E. Advances in dilute nitride multi-junction solar cells for space power applications. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03006. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603006
- [6] Kagan M.B., Zhalnin B.V., Vagapova N.T., Slyschenko E.V., Lednev A.M., Lebedev A.A. Uluchshenie energomassovykh kharakteristik geteroperekhodnykh trokhkaskadnykh fotopreobrazovateley kosmicheskogo naznacheniya [Improving the energy-mass characteristics of heterojunction three-stage space-purpose photoconverters]. *Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva: sbornik nauchnykh trudov* [Electronic and electromechanical systems and devices: collection of scientific papers]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2016, pp. 411–416.
- [7] Cappelluti F., Ghione G., Gioannini M., Bauhuis G., Mulder P., Schermer J., Cimino M., Gervasio G., Bissels G., Katsia E., Aho T., Niemi T., Guina M., Kim D., Wu J., Liu H. Novel concepts for high-efficiency lightweight space solar cells. *E3S Web of Conferences 16, ESPC 2016*, 2017, 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603007
- [8] Nesterishin M.V., Stadukhin N.V., Kryuchkov P.A. Sovremennyye sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya proizvodstva AO «ISS» [Modern power supply systems for spacecraft of production information support in JSC ISS-Reshetnev Company]. In: *Aktualnye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamentalnykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy* [Important issues of designing automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research]. *Issue 2*. Khimki, Lavochkin Association Publ., 2017, pp. 476–483.
- [9] Bilalov B.A., Sarkarov R.N., Safaraliev G.K. *Solnechnyy modul* [Solar module]. Patent RF no. 2468305, 2012, bul. 33. 5 p.
- [10] Bezruchko K.V., Gaydukov V.R., Gubin S.V., et al. *Solnechnye batarei avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov (komponovka na KA, konstruksii uzlov, proyektirovochnyye raschety)* [Solar batteries of automatic spacecraft (layout on spacecraft, node designs, design calculations)]. Kharkov, National Aerospace University “KhAI”, 2001, 276 p.
- [11] Geller B.E., ed. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam* [Composite materials reference book]. In 2 books. Book 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 584 p.
- [12] Gaydachuk A.V., Karpikova O.A., Kondratyev A.V., Slivinsky M.V. *Sotovyve zapolniteli i panelnyye konstruksii kosmicheskogo naznacheniya* [Space honeycomb and panel structures]. In 2 vol. Kharkov, National Aerospace University “KhAI”, 2012, 279 p.
- [13] Slivinsky V.I., Tkachenko G.V., Slivinsky M.V., Gaydachuk V.E., Gaydachuk A.V. *estnik Sibirskogo gos. aerokosm. un-ta imeni akad. M.F. Reshetnev — Bulletin of the Siberian State aerospace university named after acad. M.F. Reshetnev*, 2008, no. 1, pp. 136–141.
- [14] Drondin A.V., Zernov O.D., Yanchur S.V. *Sposob izgotovleniya yacheistogo sotovogo zapolnitelya iz kompozitsionnykh materialov* [A method of manufacturing a cellular honeycomb aggregate from composite materials]. Patent RF, no. 2623781, 2017, bul. no. 19, 7 p.
- [15] Samsonenko B.N. *Sposob izgotovleniya fotopreobrazovatelya so vstroyennym diodom* [A method of manufacturing a photoconverter with a built-in diode]. Patent RF, no. 2645438, 2016, bul. no. 6, 13 p.

- [16] Imaizumi M., Takamoto T., Kaneko N., Nozaki Y., Ohshima T. Qualification test results of IMM triple-junction solar cells, space solar sheets, and lightweight & compact solar paddle. *E3S Web of Conferences 16*, 2017, 03012. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603012

Naumova A.A., Vice Head of the Department, Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”. e-mail: naumova_aa@msk.npp-kvant.ru

Lebedev A.A., Vice Head of the Department, Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”. e-mail: otdel_17@kvant.ru

Vagapova N.T., Cand. Sc. (Chem.), Deputy Head, Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”. e-mail: vagapova_nt@msk.npp-kvant.ru

Kagan M.B., Dr. Sc. (Eng.), Chief Designer for Photovoltaics, Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”.

Sineva M.V., Engineer, Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”. e-mail: umc@npp-kvant.ru