

*В.Н. БОРЩЕВ¹, д-р техн. наук, А.М. ЛИСТРАТЕНКО¹, канд. техн. наук,
М.А. ПРОЦЕНКО¹, канд. техн. наук, И.Т. ТЫМЧУК¹, А.В. СУДЬЯ¹, А.В. КРАВЧЕНКО¹,
Н.И. СЛИПЧЕНКО², д-р физ.-мат. наук, И.Т. ПЕРЕКОПСКИЙ³, М.А. ЕЛИСЕЕНКО³*

СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКТУЮЩИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ БАТАРЕЙ СОЛНЕЧНЫХ (БС) КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1. Введение

Для достижения конкурентных преимуществ изготовители современных космических аппаратов (КА) стремятся к улучшению удельных энергомассовых и ресурсных характеристик источников энергии бортовых систем, в частности, солнечных батарей (БС).

На пути к данной цели непрерывно решаются следующие основные задачи усовершенствования БС:

- повышение эффективности фотоэлектрических преобразователей (ФП);
- снижение массы и площади;
- повышение радиационной стойкости;
- повышение ресурса.

Конструктивно-технологические решения высокоэффективных солнечных батарей в настоящее время в большинстве космических стран мира основываются на применении жестких углесотопластовых панелей. Основные достоинства таких панелей: приемлемая удельная масса, жесткость конструкции, возможность использования ФП различных типов, в том числе тонких и сверхтонких (до 80 – 100 мкм).

Успехи развития мировой космической фотоэнергетики также в последние годы связаны с достаточно хорошо разработанной технологией изготовления гетероструктур на основе полупроводниковых материалов $A^{III}B^V$ и промышленной технологией изготовления многопереходных гетероструктурных ФП с КПД 30 % и более. Применение высокоэффективных трехпереходных ФП на основе арсенида галлия на германиевой подложке позволяет повысить удельную энергоотдачу по площади проектируемых БС при рабочей температуре порядка 70 – 80 °С на конец орбитального ресурса до 260 – 270 Вт/м². А применение современных жестких облегченных панелей, материалов и комплектующих позволяет обеспечить удельный вес БС на уровне 2,4 – 2,6 кг/м² и менее.

Однако, несмотря на достигнутые успехи, постоянно существует необходимость регулярного пересмотра используемых и создания новых материалов и элементов БС, а также методов их защиты от воздействия вредных факторов космического пространства (ФКП). Наиболее важными причинами для этого являются:

- требования увеличения сроков активного существования БС;
- появление новых тенденций в конструировании БС;
- использование при создании БС новых конструкционных и функциональных материалов;
- создание специализированных БС для освоения новых орбит КА, в том числе для других планет.

Необходимость пересмотра многих установленных нормативных требований и стандартов, используемых при конструировании и эксплуатации БС, определяется также интенсивно развивающимся в последние годы международным сотрудничеством, в том числе по наземной и космической сертификации новых материалов и компонентов БС.

С этой точки зрения также актуальным является определение оптимальной кооперации изготовителей и поставщиков импортных материалов и комплектующих БС, так как в на-

стоящее время стало довольно сложно приобретать высокотехнологичные материалы и изделия не только в США и ЕС, но и в Китае. Связано это как с малыми объемами закупок отечественных производителей БС, так и с очень длительными сроками (3 – 5 месяцев) получения разрешения от государственных служб по экспортному контролю и поставки продукции. При этом цены на материалы и комплектующие для БС поддерживаются традиционно очень высокими.

Цель данной работы – анализ и обобщение литературных данных и рекомендаций международных стандартов по выбору и применению современных материалов, комплектующих и электрорадиоизделий при разработке солнечных батарей современных космических аппаратов, а также определение оптимальной кооперации их изготовителей и поставщиков [1 – 3].

2. Механизмы воздействия вредных факторов космического пространства

Космические аппараты в полете подвергаются воздействию обширного комплекса факторов космического пространства: потоков электронов и ионов высокой энергии, плазмы, солнечного электромагнитного излучения, метеорных частиц, атомарного кислорода и т. д. В результате такого воздействия в материалах и элементах оборудования КА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем КА.

Воздействие космической радиации по истечении некоторого периода эксплуатации может приводить как к постепенному ухудшению свойств материалов и характеристик бортовых систем и, как следствие, к появлению ограничений на целевое использование КА, так и к возникновению внезапных отказов в работе бортовой аппаратуры и КА в целом.

В качестве типичного примера, иллюстрирующего первый случай, можно указать постепенное снижение эффективности солнечных батарей КА в результате накопления поглощенной дозы космической радиации, а для иллюстрации второго случая – сбой в микросхемах с высокой степенью интеграции под действием одиночных протонов или тяжелых ионов высокой энергии. В околоземном космическом пространстве, где функционирует подавляющее большинство КА, основными компонентами космического ионизирующего излучения, отличающимися по происхождению, локализации, энергетическим характеристикам и составу, являются частицы радиационных поясов Земли (РПЗ), солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ).

Радиационные условия на борту КА зависят прежде всего от типа орбиты аппарата, т.е. от того через какие зоны космической радиации проходит аппарат, а также от особенностей конструкции КА и солнечных батарей. Под действием корпускулярных излучений в материалах и элементах КА и БС возникают различного рода обратимые и необратимые эффекты, приводящие к нарушению нормального функционирования бортовых систем КА. При этом радиационные условия на солнечно синхронной орбите (ССО) существенно менее жесткие, чем на геостационарной орбите. Поглощенная доза радиации на геостационарной орбите в период максимума солнечной активности СА почти в 100 раз больше поглощенной дозы радиации за тот же период на ССО.

Современные КА уже имеют срок службы ~10 – 15 лет и стоит задача повышения срока активного существования до 20 лет и более. В этой связи повышению предельной радиационной стойкости материалов и элементов КА и БС уделяется большое внимание [4 – 6].

Важнейшей характеристикой космической среды является ее изменчивость, тесно связанная с циклическими вариациями солнечной активности. Изменчивость обусловлена тем, что суммарная энергия солнечной коротковолновой радиации, солнечного ветра и энергичных корпускулярных частиц (протоны, электроны) зависит от уровня активности в солнеч-

ном цикле. Энергия этих излучений управляет условиями в магнитосфере и верхней атмосфере Земли.

Почти вся энергия Солнца выделяется в форме низкоэнергичных фотонов в области спектра от дальнего ультрафиолетового до инфракрасного излучения. В этом интервале длин волн суммарная энергия солнечной радиации остается почти постоянной, изменяясь на доли процента. При более высоких энергиях в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне при длинах волн менее 120 нм, рентгеновском и гамма-диапазонах поток солнечной радиации очень изменчив. Обнаруживают сильную изменчивость корпускулярная радиация Солнца, малоэнергичные частицы солнечного ветра (со скоростями приблизительно $400 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) и частицы высокой энергии (электроны, протоны и тяжелые ионы), обладающие субсветовыми скоростями.

Переменный компонент солнечной радиации изменяется циклически с подъемами и спадами при среднем периоде 11 лет (подъем примерно 4 года, спад 6-7 лет). В течение 11-летнего цикла происходят длиннопериодные (месяцы, годы) и краткосрочные вариации (сутки, часы, минуты). Существует фундаментальный 22-летний магнитный цикл Солнца, обусловленный взаимодействием между вращением Солнца и магнитным полем. Мощность корпускулярной радиации Солнца и энергичных частиц сильно зависит от солнечного магнитного цикла. В годы повышенной солнечной активности проникновение высокоэнергичных заряженных частиц галактических космических лучей в солнечную систему менее вероятно.

Солнечная активность – это совокупность нестационарных явлений на Солнце. Наиболее известные ее проявления – солнечные пятна, факелы, флоккулы, хромосферные вспышки, изменяющееся радиоизлучение Солнца, вариации излучения ультрафиолетовой и рентгеновской областей спектра, усиление частоты и интенсивности солнечных космических лучей (СКЛ) в протонных событиях. Эти и другие подобные явления оказывают существенное влияние на верхнюю атмосферу Земли, особенно на термосферу (300 – 1000 км). В условиях повышенной солнечной активности риску подвергаются многие космические средства и системы. Так, возможно резкое сокращение сроков службы геостационарных спутников, вызванное космической коррозией поверхностей и материалов под воздействием внешней среды. Например, на геостационарной орбите изменение свойств солнечных панелей и оптических систем ориентации за несколько суток в условиях высокой гелиогеомагнитной возмущенности может быть эквивалентно изменениям примерно за половину срока, планируемого для обычных условий [3].

Околоспутниковая среда на высотах от 200 до 800 км агрессивна по отношению к полимерным пленкам и покрытиям. На околоземных орбитах факторами, определяющими изменение физических, химических, термооптических и механических свойств полимеров, являются потоки атомарного кислорода (ионы и атомы) с энергией около 5 эВ, термоциклирование в вакууме, электромагнитное излучение Солнца, проникающая радиация, потоки высокоэнергичных протонов и электронов.

Механизм разрушения материалов наружных поверхностей БС связан как минимум с двумя видами воздействия: физическим (кинетическим) распылением и химическим травлением при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения. Воздействие потоков атомарного кислорода приводит к окислительной деструкции полимерных материалов с образованием летучих оксидов CO, CO₂ и H₂O, что и обуславливает унос массы материалов. Атомарный кислород (АК) инициирует поверхностные реакции и модифицирует первый атомный слой (~1 нм). Вакуумный ультрафиолет вызывает деструкцию ароматических групп ниже слоя поверхности, эродировавшего при бомбардировке АК. Нелетучие оксиды (Ag₂O, AgO₂, SiO₂ и др.) образуют слои и пленки, которые существенно изменяют термооптические свойства материалов и, как следствие, тепловой режим БС [7].

Таким образом, анализ воздействий факторов космического пространства на материалы и элементы оборудования космических солнечных батарей показал, что для обеспечения надежной работоспособности и длительного срока активного существования БС перед разработчиком возникает необходимость обоснованного выбора материалов и комплектующих изделий с наиболее стабильными характеристиками в жестких условиях эксплуатации БС для различных орбит функционирования КА.

3. Основные комплектующие и материалы для современных БС

3.1. Ячейки фотопреобразователей

Достигнутый мировой технический уровень разработок фотопреобразователей и их производства позволил развернуть в ведущих космических державах промышленное изготовление высокоэффективных фотопреобразователей с КПД до 30 % и более. Такой результат стал возможным благодаря существенным успехам в области разработки и производства мультикаскадных наногетероструктурных фотопреобразователей на материалах III и V групп таблицы Менделеева. Это позволило обеспечить по сравнению с ранее используемыми традиционными кремниевыми солнечными батареями:

- повышение энергоэффективности с единицы площади более чем в два раза;
- повышение энергооборуженности КА всех типов более чем в два раза;
- достижение срока активного существования до 15 лет и более;
- улучшение удельных энергомассовых характеристик солнечных батарей более чем в два раза;
- минимальные потери начальной мощности к концу срока активного существования.

В ближайшие 5 – 10 лет предполагается дальнейшее повышение эффективности многокаскадных наногетероструктурных фотопреобразователей на основе материалов A_3B_5 и достижение КПД в интервале 33 – 35 % для условий АМ0.

Только три компании в мире прошли всеобъемлющую космическую квалификацию трехпереходных ФП и ячеек ФП с КПД 30 %, которые выпускаются серийно. Это Emcore (с 2014 г. – SolAero Technologies Corp.) и Spectrolab, обе в США, и Azur Space, Хайльбронн, Германия. В принципе, все три компании при разработке ФП шли одним и тем же путем, только в разное время. В то же время все три компании вышли на заключительном этапе на производство высокоэффективных ФП космической квалификации с КПД до 30 %: ZTJ Emcore с 29,5 %, Spectrolab XTJ с 29,5 % и Azur Space 3G30-Advanced с 29,7 % [8, 9]. Сегодня эти компании осваивают серийную технологию производства ФП с КПД 31 % и более. В Китайской Народной Республике также освоено серийное промышленное производство многопереходных арсенид-галлиевых ФП и ячеек ФП типа SC-3GA-3 с КПД 30 %. Эту продукцию выпускает ведущая китайская компания – Шанхайский Институт космических источников энергии (SISP) [10].

Гетероструктурные ячейки ФП типа 3G30 (рис. 1) разработаны компанией Azur Space для надежной эксплуатации КА на геостационарных орбитах Земли вплоть до значений поглощенной дозы (флюенс) $1 \cdot 10^{15}$ е/см² на конец срока активного существования (САС) в течение 15 лет. Однако именно ФП типа 3G30 и ячейки ФП типа 3G30A компании Azur Space предпочитают также и многие производители низкоорбитальных спутников во всем мире [9]. Это связано с тем, что успешные квалификационные испытания на соответствие стандарта ESA ECSS-E-CT-20-08C [11] прошли не только ФП типа 3G30 и ячейки ФП типа 3G30A, но также и штатные углеродопластовые солнечные батареи на их основе.

Квалификация проводилась, в том числе, по следующим видам испытаний:

- проверка параметров ФП на начало САС;
- проверка параметров ФП после облучения электронами и протонами в пересчете на эквивалентную поглощенную дозу (флюенс) $5 \cdot 10^{14}$ е/см² электронов с энергией 1 МэВ на конец САС;

- проверка на длительность хранения;
- проверка на количество циклов переключения защитных диодов;
- проверка параметров ячеек ФП на начало САС и после воздействия ультрафиолетового излучения;
- проверка адгезии межэлементных соединений к фронтальным контактам ФП;
- проверка адгезии межэлементных соединений к тыльным контактам ФП;
- подтверждение срока эксплуатации ячеек ФП.

Значения величины деградации эффективности ячеек ФП типа 3G30A в пересчете на воздействие электронами с энергией 1 МэВ вплоть до значений поглощенной дозы $1 \cdot 10^{16}$ е/см² на конец срока активного существования представлена на рис. 2. Типичные результаты квалификационных испытаний представлены в таблице.

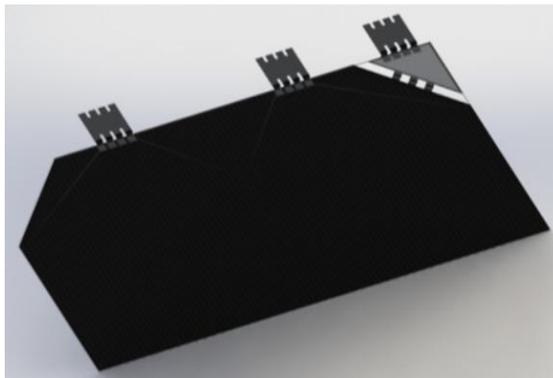


Рис.1. Внешний вид ячейки ФП типа 3G30A с внешним защитным диодом

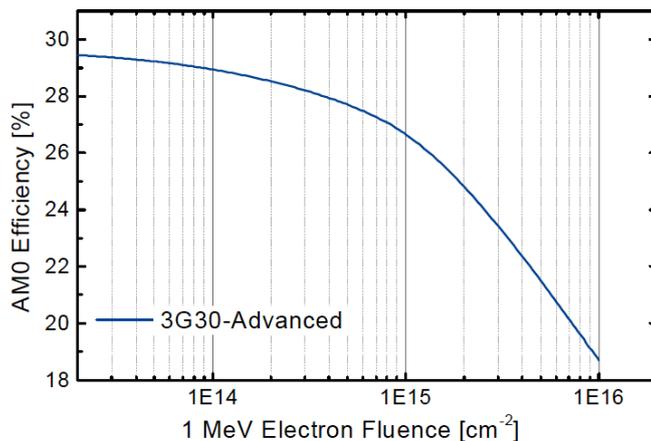


Рис.2. Дegradация эффективности ячеек ФП типа 3G30A после воздействия облучения электронами с энергией 1 МэВ

Электрические параметры на начало и конец САС ФП типа 3G30 (28°C; 1367 Вт/м²)

Параметр	Единица измерения	В начале САС	Поглощенная доза	
			$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$
Среднее U_{xx}	В	2,700	2,564	2,522
Среднее I_{K3}	А	0,520	0,514	0,502
Среднее U_{MM}	В	2,411	2,290	2,246
Среднее I_{MM}	А	0,504	0,501	0,487
Среднее P_{MM}	Вт	1,215	1,147	1,094
Среднее η_{AM0}	%	29,5	28,1	26,8

Ячейки ФП типа 3G30A прошли летную квалификацию на немецком технологическом спутнике TET-1 с июля 2012 г. по октябрь 2013 г. Спутник имел круговую солнечно-синхронную орбиту с высотой 506 км. Экспериментальная БС представляла собой углестопластовую панель с расположенными на ней ячейками ФП размером 40×80 мм и ячейками ФП размером 20×20 мм. Ячейки ФП имели внешние защитные диоды и стеклянные защитные покрытия типа SMX100 производства компании Qiortiq (Великобритания). При этом ФП типа 3G30 с размерами 40×80 мм имели различные толщины от 150 мкм, 80 мкм до 20 мкм. Ячейки ФП типа 3G30A показали высокие результаты эффективности в течение всего времени полета спутника, которые превышали результаты наземной лабораторной квалификации [12].

3.2. Межэлементные соединения и токоведущие шины в БС

Для создания межэлементных соединений и токоведущих шин солнечных батарей нужны материалы, обладающие одновременно высокой электропроводностью и низким значением коэффициентов теплового линейного расширения. Высоко электропроводящие материалы, такие как алюминий, медь или серебро, не обладают достаточно высокой механической стойкостью. Поэтому для термомеханической стойкости межэлементных соединений и шин необходимо, чтобы они изготавливались на основе механически стойких сплавов с покрытиями из высоко проводящих металлов, как правило, серебра. Но при этом такие сплавы должны иметь как можно малые значения коэффициента теплового линейного расширения. Межсоединения из коваровой фольги с серебряным покрытием обладают большой стойкостью к воздействию термоциклов по сравнению с межсоединениями из чистой серебряной фольги. Межсоединения и шины из коваровой фольги с серебряным покрытием особенно необходимы для БС со сроком активного существования до 5 – 7 лет на малых орбитах, где БС испытывает десятки тысяч термоциклических воздействий. Именно такие межсоединения в ячейках ФП и токоведущих шинах БС широко используют в своих разработках в последнее десятилетие европейские и североамериканские компании – производители БС [13].

Например, стандартное межэлементное соединение AZUR (Standard Space Interconnector типа HNR 0003081-01-01 S) имеет следующие основные характеристики:

- геометрические размеры – 7,53 мм × 6,5 мм × 0,025 мм;
- толщина коваровой фольги – 15 мкм;
- толщина серебряного покрытия – по 5 мкм с двух сторон фольги.

Стандартная токоведущая шина AZUR (Standard Space Negative End Termination Busbar типа HNR 0004491-00-00 E) имеет следующие основные характеристики:

- геометрические размеры – 6,3 мм × 60,0 мм × 0,05 мм;
- толщина коваровой фольги – 40 мкм;
- толщина серебряного покрытия – по 5 мкм с двух сторон фольги.

3.3. Монтажные провода для БС

На протяжении нескольких десятилетий в РФ обеспечение космонавтики и авиации качественными и конкурентоспособными проводами и кабелями, необходимыми для проектирования, производства и эффективной эксплуатации изделий, является одной из основных задач, решаемых ОАО «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности» (ОКБ КП). ОКБ КП было участником всех известных советских и российских проектов в области авиации, космонавтики, военной техники: «Луноход», «Салют», «Энергия-Буран», «Вега» и др. Бортовая кабельная сеть российских модулей международной космической станции МКС «Альфа» на 95 % состоит из продукции ОКБ КП. Разработанные ОКБ КП герметичные теплостойкие провода с изоляцией из спеченной фторопластовой пленки (провода МС 16-13, МС 26-13), являются основой бортовой кабельной сети всех российских космических аппаратов. Они устойчивы при перепадах температур от минус 269 °С до плюс 200 °С и не боятся

агрессивных сред и открытого космоса. Широко применяются они и сейчас в Российской Федерации и за рубежом [5, 14, 15].

Также ОКБ КП разработаны провода МС 16-12 с изоляцией из полиимидного лака. Эти провода имеют преимущество перед проводами МС 16-13 по габаритным размерам, весу, механическим характеристикам и радиационной стойкости, однако обладают таким недостатком, как трудное снятие изоляции при монтажных работах из-за высокой адгезии полиимида к металлу. Этот недостаток был частично устранен путем введения под изоляцию подслоя из канифоли (МС 16-15) или суспензии фторопласта-4Д (МС 26-15). Последним вариантом подобных проводов являются провода МС 26-14, в которых фторсуспензия заменена на обмотку пленкой Ф-4Д.

В настоящее время практически невозможно выбрать провода, которые отвечают всем требованиям в полной мере. Однако если провода на основе полиимидного лака укрыть с помощью многослойной экрановакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) от прямого воздействия открытого космоса, то можно получить почти идеальные провода. Их недостаток лишь в повышенной жесткости и в заметно более высоком, чем у фторопластовых проводов, газовыделении при нагреве в вакууме. Необходимо также отметить, что радиационная стойкость полиимидной изоляции из лака АД-9103 превышает 1000 Мрад. Таким образом, провода на основе полиимидного лака можно уверенно применять на геостационарной орбите, так как полная поглощенная доза радиации на поверхности КА даже без защиты на геостационарной орбите при САС не менее 15 лет имеет значения менее 500 Мрад [5, 16].

За прошедшие десятилетия освоения космического пространства работоспособность проводов и кабелей в условиях, как правило, более жестких, чем условия, указанные в ТУ, подтверждена многочисленными испытаниями, проводившимися в рамках многих НИР и ОКР. По их результатам оформлено несколько руководящих документов – решений, перечней. Эти документы при анализе условий эксплуатации в разрабатываемом изделии используются разработчиками в первую очередь.

Одним из таких решения является разрешение АО «ОКБ КП» на применение в Международной космической станции фторопластовых проводов МС 16-13 при давлении 10^{-11} мм рт. ст., в диапазоне температур от минус 125 °С до плюс 125 °С, наработке 150 000 ч, дозе радиации $5,3 \cdot 10^6$ рад (5,3 Мрад) и сроке службы 23 года (по ТУ 10^{-6} мм рт. ст.; минус 60 °С – плюс 200 °С; 10 000 ч при +200 °С или 25 000 ч при 125 °С; 10^4 рад и 20 лет – соответственно).

Кроме того, в аэрокосмической отрасли широко применяются монтажные провода зарубежных производителей. К ним относятся такие известные компании как Tусо Raychem (Англия), Ахон Cable (Франция), Драка Fileka (Франция) и др. Эта продукция выпускается в соответствии с требованиями стандартов NASA STD 8739, US MIL-STD 1553B, ESA/SCC 3901001, 002, 012, 019 для эксплуатации БС на различных орбитах размещения КА. Компания Tусо Raychem признана как мировой лидер в разработках и изготовлении радиационно и температура стойких монтажных проводов специального назначения. Космические провода типа SPEC 55 компании Tусо Raychem предназначены для использования при +200° С. Исследования NASA подтвердили, что они сохраняют гибкость и при криогенных температурах. Провода SPEC 55 устойчивы к дуговым разрядам. Радиационно-модифицированная ETFE космическая изоляция этих проводов соответствует принятым стандартам NASA для космических материалов и также одобрена для применения ESA [17, 18].

3.4. Электросоединители

Повышения надежности современных КА, улучшение их габаритно-массовых показателей и снижения стоимости возможно достичь только за счет применения новых технологий, материалов и комплектующих. Применение современных облегченных субминиатюрных (тип D-sub) и микроминиатюрных (тип Micro-D) соединителей с извлекаемыми контактами под обжимку, а также обжимных сростков, используемых для сращивания участков прово-

дов в кабельных жгутах, позволило существенно снизить массу бортовой кабельной сети (БКС) КА. Электрические соединители в кабельной и жгутовой продукции приводов солнечных батарей с токоъемниками методом обжимки контактов в основном производятся в странах Европейского Союза и США. Они прошли наземную отработку и проверки в соответствии с европейскими и американскими стандартами (ECSS-Q-ST-70-26С, MIL-DTL-38999, MIL-DTL-83513, MIL-DTL-24308, и т.д.) и имеют достаточно длительную и удачную летную историю. Несмотря на то, что для таких электрических соединителей отрицательная температура эксплуатации ограничена техническими условиями величиной минус 65°C, соединители имеют практический опыт применения при криогенных температурах в условиях космического пространства (минус 100°C и ниже). Например, соединители семейства MIL-DTL-38999 известной компании Glenair (США) успешно применялись в космических миссиях после наземных испытаний при отрицательных температурах, превышающих минус 100°C.

Соединители Glenair Series 28 HiPer-D являются наиболее часто используемыми прямоугольными разъемами ввода-вывода, как в военной, так и аэрокосмической технике. В отличие от стандартных разъемов D-Subs M24308 со штампованными стальными корпусами, HiPer-D изготавливаются из алюминия или нержавеющей стали. Диэлектрические вставки выполнены из термореактивной эпоксидной смолы для повышения стойкости к химическим веществам и способны выдерживать непрерывную рабочую температуру плюс 200 °С. Флюоросиликоновые прокладки и лицевые уплотнения аэрокосмического класса обеспечивают водонепроницаемость изделий. Стандартные разъемы HiPer-D содержат силиконовые герметики RTV компании Dow Corning, которые обеспечивают высокие характеристики соединителей по дегазации. Общая потеря массы не превышает 1,0 %, а величина летучего конденсационного материала (CVCM) не превышает 0,1 %.

Разъемы типа HiPer D 280-018 и 280-019 проходили дополнительные термоциклические испытания в диапазоне температур от минус 150 °С до плюс 200 °С. После термоциклических испытаний соединители HiPer-D не обнаружили признаков отказа по напряжению пробоя, сопротивлению изоляции и механической прочности и полностью соответствуют или превосходят механические и электрические требования MIL-DTL- 24308. Тестирование проходили соединители типа розетка и соединители типа вилка. При этом радиационная стойкость электросоединителей, изготовленных из алюминия или нержавеющей стали, не ниже 10^4 Мрад. Их применение как на низких, так и на геостационарной орбитах не вызывает сомнения [5, 19, 20].

В ОАО "ИСС" им. Академика М.Ф. Решетнева для определения допустимых условий эксплуатации обжимных соединений при максимально возможном САС (не менее 15 лет) были проведены целевые испытания кабелей – типопредставителей с применением обжимных соединений, а также испытания обжимных сростков, соединяющих провода в кабелях. Условия эксплуатации имитировались термоциклированием в термовакуумной камере в диапазоне квалификационных температур от минус 110°C до плюс 120°C при давлении 10^{-5} Па. Образцы обжимных соединений во время испытаний постоянно находились под токовой нагрузкой. После проведения более 5000 термоциклов характеристики контактных областей показали высокую устойчивость к влиянию внешних факторов.

В результате выполненных работ было определено, что воздействие режимов, имитирующих условия эксплуатации БКС КА на орбите, не имеют существенного значения для характеристики электрических соединений. В настоящее время прогнозируемый САС вновь разрабатываемых КА в АО "ИСС" им. академика М.Ф. Решетнева достигла 15 лет, что, в том числе, связано с тем, что при их разработке уделялось большое внимание надежности бортовой кабельной сети [16, 21, 22].

3.5. Электрорадиоизделия и ИС для печатных узлов БС

Сокращение, а в ряде случаев и прекращение производства радиационно-стойких ЭРИ в последнее время привело к значительному их удорожанию. Поэтому применение в космической технике дорогих радиационно-стойких изделий стало экономически невыгодно, и разработчики спутниковых микроэлектронных систем обратили свое внимание на коммерческие изделия. В конце сентября – начале октября 1998 г. в Ницце было проведено рабочее совещание, посвященное “коммерциализации” военной и космической техники (Working shop meeting “Commercialization of Military and Space Electronics”). На этом совещании отмечалось, что если раньше в аппаратуре военного и космического назначения применялось примерно 70 % радиационно-стойких изделий и 30 % коммерческих, то в настоящее время наблюдается обратная картина [23 – 25].

Однако применение в военной и космической технике коммерческих радиотехнических изделий столкнулось с существенными проблемами. Основная проблема заключается в низкой радиационной стойкости коммерческих ИС. Это означает, что предельная доза соизмерима с накопленной дозой за период эксплуатации изделий на борту КА. Поэтому разработчику микроэлектронных систем необходимо знать вероятность безотказной работы изделия в каждый момент времени. Стандарты не дают такой возможности.

Для коммерческих изделий попадание в поставочную партию дефектных изделий более вероятно, чем для изделий, изготовленных по специальной “радиационно-стойкой” технологии. Проблема может быть решена с помощью отбраковки дефектных изделий. Практически все ИС в настоящее время изготавливаются по планарной технологии или ее модификациям. Поэтому качество окисной пленки на поверхности полупроводника играет важную роль в обеспечении надежности и радиационной стойкости планарных изделий. Накопление заряда в макродефектах окисной пленки вызывает деградацию параметров ИС и, в конечном счете, приводит к их отказу. Эффективно выявляет макродефекты в диэлектрической пленке воздействие ионизирующего излучения (ИИ). При этом заряжаются точечные дефекты и частично макродефекты. Поэтому для обнаружения последних после облучения необходимо произвести низкотемпературный отжиг, в результате которого точечные дефекты освободятся от накопленного при облучении заряда, а макродефекты, наоборот, увеличат свой заряд за счет освобожденного из точечных дефектов. ИС, в которых присутствуют макродефекты, не восстанавливают свои параметры после отжига и могут быть эффективно отбракованы. Восстановившие свои параметры изделия могут быть использованы в микроэлектронных спутниковых системах. Отбраковка ИС с применением операции “облучение–отжиг” может производиться как в процессе их производства на пластинах перед операцией 100 % контроля, так и на готовых изделиях в корпусах. Таким образом, можно проводить отбраровку коммерческих ИС с макродефектами окисной пленки при использовании операции “облучение–отжиг”. Именно поэтому в военный стандарт США MIL-STD-883 введен метод 10.19.5, включающий радиационно-термическую обработку (РТО) и электротермотренировку (ЭТТ). Таким образом, вынужденная “коммерциализация” спутниковых микроэлектронных систем создает необходимые знания и опыт для применения коммерческих ЭРИ в космической технике.

Для обеспечения необходимой радиационной стойкости коммерческих ЭРИ также используются способы прогнозирования уровней накопленной дозы на печатных узлах (ПУ) бортовой аппаратуры (БА) с учетом влияния «теневого» защиты. При таком подходе сначала формируется предварительный перечень элементной базы на основе принципиальной электрической схемы и ограничений, налагаемых требованиями технического задания по стойкости аппаратуры к воздействиям ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП), характеристиками радиационной обстановки на орбите функционирования БА и к внешним воздействующим факторам (ВВФ). Далее строится поле распределения накопленной дозы на ПУ, так как уровень накопленной дозы напрямую зависит от величины геометрических размеров экрана. Неоднородность защиты БА в составе КА по разным направлени-

ям обуславливает неодинаковость уровней накопленной дозы в разных приборах и даже в разных местах одного прибора. Полученная информация является исходной для оценки радиационной обстановки в «тени», критерием которой является соотношение радиационной стойкости ЭРИ (предельной накопленной дозы – уровня дозы, до которого в ЭРИ не возникает отказа) и накопленной за САС дозы. Имея информацию о предполагаемой накопленной дозе на ПУ (рассчитанной с учетом эскиза конструкции печатного узла, информации о расположении ПУ в КА – т.е. полной схемы радиационной защиты), можно определить дополнительные ограничения, позволяющие оптимизировать расположение «ненадежных», с точки зрения стойкости, элементов на плате. Определение таких критичных ЭРИ возможно на основе данных об ИИ, приведенных в техническом задании, и значений величин минимальной массовой защиты БА [26].

Основной исходной информацией для расчета доз в материалах и кабелях являются дифференциальные (по энергии) потоки заряженных частиц (электронов и протонов) на орбите КА за весь САС. По ним методом Монте-Карло рассчитываются дозы в кремнии в центре шара за сферическими экранами различной толщины из алюминия. Эти данные позволяют учесть защитный эффект от всего КА, элементов конструкции изделия и даже поверхностных слоев рабочей изоляции. Чтобы использовать табличные данные по ослаблению дозы от потоков электронов и протонов, необходимо привести реальную поверхностную плотность элементов конструкции к эквивалентной массовой плотности алюминия (г/см^2). Кроме того, приходится учитывать, что эквивалентная доза в материалах экранов может оказаться до 30 % выше найденного для Si значения [5]. Из литературных источников известно, что для бесперебойного функционирования электронных компонентов суммарная поглощенная доза нерадиационно-стойких коммерческих элементов космического аппарата не должна превышать 10 – 15 крад (а для некоторых – 2-3 крад) [6].

3.6. Панели БС и платы печатные для малых КА

В конце двадцатого века возникла идея создания дешевых сверхмалых космических аппаратов, обладающих меньшими функциями, надежностью и ресурсом, но при этом обладающих и меньшей стоимостью (около 65 – 80 тыс. дол.), а также малым сроком разработки и изготовления (не более 1 года). Традиционно такие спутники используются для обучения и отработки новых технологий, однако сфера их применения постоянно расширяется. Важную роль в этом направлении играет стандарт «CubeSat». В настоящее время во многих странах мира занимаются разработкой и выпуском КА и комплектующих (составных частей) к ним по стандарту CubeSat. При этом в качестве жестких панелей БС малых и сверхмалых КА в настоящее время широко применяются углесотопластовые, алюминиевые, углепластиковые и панели на основе фольгированных стеклотекстолитов.

Например, голландская компания Innovative Solutions in Space (ISIS), занимающаяся технологиями для малых космических аппаратов в диапазоне от 1 до 20 кг, для своих БС применяет алюминиевые и углепластиковые панели [27]. Компания Clyde Space Ltd, Великобритания, для панелей БС использует высококачественный фольгированный стеклотекстолит FR-4 с полиимидным покрытием [28]. Испанская компания DHV и болгарская компания EnduroSat производят печатные платы для панелей БС в соответствии с ECSS-Q-ST-70-11C из материала FR4-Tg170 с толщиной медного покрытия 18 мкм [29, 30, 31]. Все типы печатных плат для панелей БС проходят квалификационные испытания на соответствие требованиям ECSS-Q-ST-70-10, а в составе БС на соответствие требованиям ECSS-E-20-08B [32, 11]. Платы из материала типа FR4 успешно применяются для изготовления облегченных панелей БС, которые позволяют обеспечить создание БС для КА типа CubeSat – 3U мощностью до 7 Вт с массой от 135 г до 190 г и при массе КА не более 4 кг [28].

Стандарт Государственного космического агентства Украины разрешает применение в изделиях приборостроения импортного фольгированного стеклотекстолита FR-4, а также отечественного аналога FR-4 стеклотекстолита фольгированного СТЭФ-1. Эти материалы

удовлетворяют требованиям по уровню газовыделений неметаллических материалов конструкции изделий в соответствии со стандартом ECSS-Q-ST-70-02C [33, 34].

3.7. Датчики температуры

Точность, быстродействие, стабильность, долговечность, надежность и экономичность – это ключевые характеристики, которыми оперируют на современном рынке датчиков температуры. Платиновые датчики температуры имеют оптимальное сочетание перечисленных характеристик. Высокая чистота, химическая устойчивость и физические свойства платины делают ее идеальным материалом для измерительного термосопротивления. Платиновые датчики температуры благодаря особым свойствам платины имеют следующие преимущества по сравнению с термисторами, полупроводниковыми термодатчиками и термопарами:

- высокая точность (например, погрешность платиновых датчиков при 0°C составляет $\pm 0,1 - 0,5^\circ\text{C}$);

- почти линейная зависимость сопротивления от температуры;

- высокая чувствительность;

- широкий диапазон измеряемых температур: минус 196...плюс 1000°C;

- высокая долговечность, надежность и долгосрочная стабильность (например, максимальный дрейф номинального сопротивления после 1000 ч при 500°C платиновых датчиков составляет сотые доли процента). Платиновые датчики устойчивы к ударным и вибрационным нагрузкам.

На рис. 3 представлен внешний вид температурного датчика ТЭП 018-05.

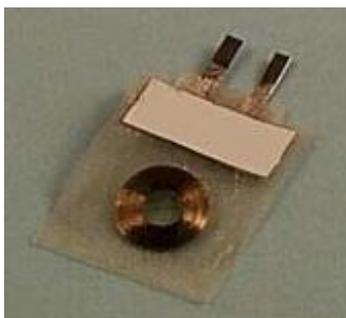


Рис. 3. Внешний вид температурного датчика ТЭП 018-05

Датчик температуры предназначен для измерения температуры поверхностей. Материал, из которого состоит чувствительный элемент, – платиновая проволока диаметром 50 мкм. Вид намотки проволоки – спираль. С помощью кремнийорганического лака чувствительный элемент закрепляется на подложке из стеклоткани.

Основные характеристики:

- датчик температуры имеет градуировочную характеристику в диапазоне температур от минус 260°C до плюс 300°C;

- основная погрешность характеристики $\pm 0,5^\circ\text{C}$;

- гарантийный срок службы 20 лет;

- гарантийная наработка в пределах гарантийного срока: 33000 часов при эксплуатации в диапазоне от минус 260°C до плюс 100°C;

- масса – 1,5 г;

- номинальное сопротивление, 100 Ом [35].

3.8. Паяльные пасты для токоведущих шин и межсоединений

Основным преимуществом современных паяльных паст перед другими предложениями является точность дозирования припоя и флюса. Это способствует предотвращению растекания припоя, а следовательно, обеспечивает хороший внешний вид соединения, и позволяет

подавать припой в соединения сложной конфигурации. Паяльные пасты разрабатываются на основе синтетических материалов. Остатки флюса после оплавления пасты не являются коррозионными и токопроводящими и могут быть оставлены на плате без удаления их специальными моющими составами в условиях стандартной влажности и температуры. Паяльные пасты представляют собой механическую смесь ряда субстанций: флюса, порошкообразного сплава-припоя и связующего материала. Свойства паяльной пасты обусловлены характеристиками входящих в ее состав веществ.

Компания AIM Solder является ведущим мировым производителем оловянно-свинцовых, а также бессвинцовых припоев и монтажных материалов для электронной промышленности. Все паяльные пасты соответствуют стандарту IPC. Общими преимуществами паяльных паст канадской компании AIM, изготовленных на основе серебросодержащего сплава Sn62/Pb36/Ag2, являются продолжительное время жизни на трафарете, улучшенная реакция на простой трафарет, точность дозирования припоя и флюса, улучшенная паяемость, повышение стабильности качества пайки за счет улучшения смачиваемости и уменьшения количества образующихся микросфер (пустот), уменьшение количества остатков флюса. Все эти характеристики определяют паяльные пасты AIM как первоклассный продукт для пайки.

Основные характеристики паяльной пасты марки NC 293+ (Sn62/Pb36/Ag2):

- NC 293+ (Sn62/Pb36/Ag2) это паяльная паста с флюсом умеренной активности, не требующая отмывки, с более усовершенствованным составом на основе канифоли, имеет улучшенные характеристики трафаретной печати и обеспечивает более широкий диапазон времени для выполнения технологических операций;

- NC 293+ обеспечивает необходимую активность и обладает превосходными смачивающими свойствами (даже для труднопаяемых сплавов типа палладия, никеля, золота, органических покрытий, и т.д.);

- максимальная температура нагрева до 215°C;

- паяльная паста может использоваться в широком диапазоне влажности воздуха (не гигроскопична), может смываться, имеет малый остаток флюса после пайки, и предназначена для пайки в воздушной среде [36, 37].

Паяльная паста марки NC 293+ (Sn62/Pb36/Ag2) прошла наземную и летную квалификацию в составе БС КА отечественной разработки и изготовления «МС-2-8» и «EgyptSat -1».

3.9. Адгезивы космического применения для приклейки, герметизации электронных компонентов, их защиты и изоляции

Один из наиболее важных процессов монтажа БС – соединение отдельных деталей с помощью клеящих составов, например приклеивание ФП или ячеек ФП к обшивкам панели БС, приклейки и герметизации датчиков температуры, закрепление коммутационных шин.

При выборе клеевых материалов для сборки БС необходимо, в первую очередь, учитывать условия эксплуатации, т.к. многие их физико-химические свойства зависят от температуры, давления, воздействия радиации и других факторов.

Рабочие температуры являются одной из характеристик космической среды, оказывающей сильное влияние на работоспособность клеевых соединений, особенно при склеивании разнородных материалов, т.е. материалов, отличающихся друг от друга в первую очередь значениями коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР) и деформационными характеристиками (модуль упругости). В результате воздействия факторов космического пространства (ФКП) в орбитальных полетах клеевые соединения, используемые при изготовлении и креплении элементов солнечной батареи, могут испытывать колебания температур в пределах от минус 185°C до плюс 120°C в зависимости от характера орбиты, ориентации спутника и т.д. Циклическое изменение температур в значительной степени влияет на работоспособность и надежность клеевых соединений. Поэтому, при выборе клеевых материалов, в первую очередь следует обращать внимание на значение КТЛР по отношению

к склеиваемым материалам. Так как любые изменения температуры относительно температуры отверждения клея будут порождать термические напряжения в склеиваемых материалах и в клеевом слое. Характер распределения напряжений в клеевом слое также очень зависит от относительной жесткости склеиваемых материалов. Поэтому во многих случаях существенное влияние оказывают величина модуля упругости и толщина клеевого слоя.

В дополнение к специфическим требованиям, предъявляемым к соединениям разнородных материалов, следует обратить внимание на ряд факторов, которые необходимо учитывать при использовании клеевых соединений в конструкциях. Это наличие остаточных напряжений в клеевом слое, возникающих при его отверждении, зависимость рабочей температуры от температуры стеклования и др. Многих из перечисленных факторов, влияющих на работоспособность клеевых соединений, можно избежать путем правильного выбора материала клея. Так, например, применяя клей, имеющий во всем рабочем диапазоне температур значительно более низкий модуль упругости, чем у склеиваемых материалов, можно уменьшить термические напряжения и их концентрацию.

Клеевые материалы, используемые в конструкциях космического назначения, относятся к классу материалов специального применения и требования, предъявляемые к ним более жесткие, чем для аналогичных материалов, применяемых в других отраслях промышленности. Это следует учитывать при выборе клеевых материалов для сборки солнечных батарей.

Для приклеивания ячеек ФП к поверхности панели БС чаще всего используют клеи на основе RTV-силиконов [38 – 40]. При этом следует учитывать, что RTV-силиконы полидиметилсилоксанового типа при воздействии (непрерывном или циклическом) низких температур вплоть до минус 143°C будут, как правило, создавать в этих условиях значительные напряжения в клеевых слоях, которые могут привести к разрушению соединения на границе раздела ФП – клей. RTV-силиконы полидиметилфенилсилоксанового типа имеют более низкую температуру стеклования (на 45 – 55°C) и поэтому лучше подходят для этой цели.

Для приклейки ячеек ФП на сотовые панели БС в США используют силиконовый адгезив марки CV-2568 (фирма Nusil Technology, США), имеющий низкий уровень газовыделений [40]. В ЕС для приклейки ячеек ФП на сотовые панели БС используют силиконовый клей для открытого космоса марки RTV-S691 компании Wacker Chemie AG (Германия) [38, 39]. В Китайской Народной Республике для приклейки ячеек ФП на сотовые панели БС используют двухкомпонентный адгезив марки KH-CL-SP (аналог клея RTV-S691) на основе силиконового полимера [10].

4. Летная история БС современных КА

Летную историю современных БС КА на высокоэффективных арсенид-галлиевых ФП удобно рассматривать на примере эксплуатации геостационарных спутников. Производители коммерческих геостационарных спутников связи и вещания декларируют срок активного существования спутников не менее 15 лет. Эксплуатация спутников подтверждает этот САС для основной массы КА. Для обеспечения таких сроков САС КА в системах электропитания зарубежные производители спутников связи и вещания используют солнечные батареи с комплектующими и материалами практически одних и тех же поставщиков. В настоящее время все мировые производители устанавливают на спутники солнечные батареи с трехпереходными арсенид-галлиевыми фотопреобразователями типа *Ultra Triple-Junction* (GaInP/GaAs/Ge) с КПД до 30 %. Из представленных в [41] данных следует, что лучшими в мире по надежности являются платформы Eurostar-3000 компании Astrium, одной из ведущих европейских компаний, разрабатывающей и изготавливающей КА и БС для них. Из 22 запущенных спутников, построенных в период с 2001 по 2013 г. было всего два (9,1 %) проблемных аппарата. Чтобы сертифицировать новые поколения ФП, современные материалы и комплектующие на соответствие стандарта ESA ECSS-E-ST-20-08C [11] в составе углестовых испытательных БС и штатных солнечных батарей, собранных по промышленным технологиям, в компании Astrium было осуществлено несколько программ. Новое поколение

европейских трехпереходных гетероструктурных ФП с КПД 28 – 30 % (GaInP / GaInAs / Ge), изготовленных AZUR SPACE, были успешно сертифицированы в рамках программ ESA (ARTES3 для GEO-платформ, таких как Eurostar 3000 и AlphaBus), для платформ GalileoSat, для средневысотных (MEO) орбит, а также программы ESA SWARM для низких орбит (LEO) [42]. К 2013 г. компания Astrium получила и установила один миллион трехпереходных арсенид-галлиевых ФП компании AZUR SPACE в 300 солнечных батареях мощностью от нескольких сотен ватт до 26 кВт для космических платформ различного назначения [43]. К настоящему времени Компания Azur Space имеет более чем сорокалетнюю историю и опыт изготовления нескольких миллионов ФП космического назначения для более чем 340 космических аппаратов. При этом, высокоэффективные одно- и двухпереходные арсенид-галлиевые ФП компания AZUR SPACE производит с 1996 г., а трехпереходные – с 2002 г.

Кроме того в Astrium успешно сертифицированы материалы и комплектующие, предназначенные для использования в космосе, и связанные с ними процессы изготовления ячеек ФП и БС на жестких углеродопластовых каркасах. В том числе клеи и герметики марки RTV-S691 и RTV-S690 компании Wacker Chemie AG (Германия), защитные стекла ФП различной толщины марки CMX производства компании Qioptiq (Великобритания). Межэлементные соединения и токопроводящие шины из серебра, золота, молибдена с серебряным покрытием, ковара с серебряным покрытием различной толщины компании Azur Space Solar Power. А также провода с изоляцией из полиимидного лака и электросоединители для них типа SUB-D микро- D (MIL-DTL-83513, MIL-DTL-24308) и соединители семейства MIL-DTL-38999 широко известной компании Glenair (США) [43 – 45].

5. Выбранные материалы и комплектующие для использования в спутниковых технологиях ГП «КБ «Южное»

В рамках работ по реализации «Программы развития спутниковых технологий ГП «КБ «Южное» на период с 2015 по 2023 годы» в настоящее время в ГП «КБ «Южное» на стадии разработки и изготовления находятся космические аппараты класса микроспутник «Січ-2М» и «YuzhSat», класса CubeSat «GS-1» и геостационарный спутник связи «ГСС». ООО «Научно-производственное предприятие «ЛТУ» принимает участие в реализации этой программы в качестве разработчика и изготовителя солнечных батарей.

В результате анализа требований по живучести и стойкости к внешним воздействиям [46 – 51] и на основании проведенного обзора применяемых и перспективных комплектующих и материалов для современных БС, как вариант для комплектования БС всех разрабатываемых КА ГП «КБ «Южное» были выбраны гетероструктурные ячейки ФП 3G30A разработки компании Azur Space. Эти ячейки ФП имеют хорошую летную историю в составе жестких БС для применения на всех орбитах функционирования КА и прошли успешные квалификационные испытания на соответствие стандарта ESA ECSS-E-ST-20-08C. Для монтажа таких ячеек ФП в электрическую схему БС для всех КА выбраны межсоединения и токоведущие шины из коваровой фольги с серебряным покрытием компании Azur Space, которые максимально адаптированы для надежного соединения ячеек ФП применительно к условиям воздействия факторов космического пространства.

В качестве монтажных проводов для БС низкоорбитальных КА «Січ-2М», «YuzhSat» и «GS-1» выбраны провода МС 16-13. Они удовлетворяют требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям в течение срока активного существования КА. Полная поглощенная доза радиации на поверхности КА без защиты на низких орбитах при САС не менее 5 лет не превышает 45×10^5 рад или 4,5 Мрад. В качестве монтажных проводов для БС геостационарного космического аппарата связи были выбраны провода типа МС 16-15 1x0,35 и МС 26-15 1x0,35 с высокой радиационно стойкой полиимидной изоляцией. Радиационная стойкость полиимидной изоляции из лака АД-9103 превышает 1000 Мрад. Таким образом, провода на основе полиимидного лака можно с уверенностью применять на геостационарной орбите, так как полная поглощенная доза радиации на поверхности КА

даже без защиты на геостационарной орбите при САС не менее 15 лет имеет значения менее 500 Мрад [5, 6, 14].

Для БС КА "YuzhSat" выбраны соединители электрические M2000 SERIES D-SUB компании CONNECTORS AMPHENOL стандарта MIL-DTL-24308. Разъемы стандарта MIL-DTL-24308 соответствуют жестким требованиям к рабочим характеристикам, обладают прочным корпусом, устойчивы к воздействию окружающей среды, отвечают повышенным требованиям по надежности. Для БС КА «Січ-2М» выбраны соединители электрически типа УСНЦ 144-55/17 ВО11НФП. В качестве электросоединителей для БС КА "GS-1" были выбраны соединители с извлекаемыми контактами под обжимку DF13-8S-1.25C компании HIROS ELECTRIC CO, LTD. В качестве электросоединителей для БС геостационарного спутника связи были выбраны прямоугольные электросоединители компании Glenair с извлекаемыми контактами под обжимку типа вилка HiPer D 280-018P 3H44 ME G P или как альтернативный вариант соединители типа УСНЦ 144-79/21 ВО11НФП.

Для БС КА «Січ-2М» и БС геостационарного спутника связи в качестве датчика температуры для БС был выбран отечественный температурный датчик космического назначения ТЭП 018-05 компании ООО "ДП" ЗАВОД РАПИД", г. Чернигов. Платиновый температурный датчик типа ТЭП 018-05 прошел наземную и летную квалификацию в составе БС КА «МС-2-8» и "EgyptSat -1».

В результате анализа требований по живучести и стойкости к внешним воздействиям БС КА в качестве клея для приклейки ячеек ФП к поверхности жестких панелей БС перспективных КА разработки ГП «КБ «Южное» был выбран силиконовый клей марки RTV-S691 в соответствии с ECSS-Q-70-71A. Кремнийорганический полимер с наполнителем марки RTV-S691 имеет обширный опыт применения в условия космического пространства в диапазоне температур минус 180 °С – плюс 200 °С, в том числе при воздействии циклически изменяемой температуры. Кроме того, RTV-силиконы полидиметилфенилсилоксанового типа имеют достаточно высокую радиационную стойкость, до 200 Мрад, что позволяет их применять на низких и геостационарных орбитах без дополнительных средств защиты, так как клеевые соединения надежно защищены от воздействия ИИ ячейками ФП с защитными стеклянными покрытиями. Тем не менее, эластомер NuSil CV-2568 (США) также имеет обширный опыт применения в условиях космоса и также может быть использован для приклейки ячеек ФП к поверхности жестких углесотопластовых панелей БС как аналог клея RTV-S691.

В качестве паяльной пасты для пайки токоведущих шин и межсоединений была выбрана паяльная паста марки NC 293+ компании AIM SOLDER.

Для применения в конструкции панели БС с полиимидным покрытием для КА "GS-1" предложен материал СТЭФ-1 толщиной 1,5 мм с удельным весом 1,9 г/см³, что позволяет реализовать требования по весу к БС.

6. Заключение

Выбранные современные материалы и комплектующие для БС новых и перспективных КА ГП «КБ «Южное» имеют хорошую летную историю, полностью удовлетворяют требованиям стандартов ECSS-E-СТ-20-08С и ECSS-Q-70-71A.

Список литературы:

1. Научно-технические основы разработки, изготовления и эксплуатации систем электроснабжения космических аппаратов / К.В. Безручко, В.Н. Боршев, Н.В. Замирец, А.М. Листратенко и др. Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", 2011. 218 с.
2. Лукьяненко М.В., Кудряшов В.С. Энерговооруженность космических аппаратов и бортовые источники электроэнергии // Вестник Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. 2008. Вып. 1 (18). С. 141-145.
3. Семкин Н.Д. Испытания материалов и элементов электронного оборудования космических аппаратов : учеб. пособие. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. 320 с.
4. Акишин А.И. Космическое материаловедение : методическое и учебное пособие. Москва : НИИЯФ МГУ, 2007. С. 209.

5. Тютнев А.П., Кочетов И.Т., Семенов В.Т. Квалификация электротехнических материалов, проводов и кабелей для применения на внешней поверхности космических аппаратов по критерию радиационной стойкости // Вопросы электромеханики. 2012. Т.126. С. 29-35.
6. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. Москва : Университетская книга. 2010. 192 с.
7. Шувалов В.А., Токмак Н.А., Резниченко Н.П. Деградация полимерных пленок космических аппаратов при длительном воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения // Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 5. С 57 – 68.
8. AZUR SPACE Solar Power GmbH – 30 % Triple Junction GaAs Solar Cell Assembly. www.azurspace.de //официальный сайт (дата обращения 2.02.2018).
9. Strobl G.F.X., Fuhrmann D., Guter W., Khorenko V., Köstler W., Meusel M. About AZUR's 3G30-advanced Space Solar Cell and next Generation Product // Proc. of the 27th EUPVSEC, Frankfurt, p. 1BO10.3, 2012.
10. Shanghai Institute of Space Power-sources. – Performance Specification and Quality Test of SC-3GA-3 Solar Cell. 2016.-35.
11. ECSS-E-ST 20-08C «Космическая техника. Фотовольтаические сборки и компоненты» / Европейская Кооперация по Космической Стандартизации. 2012. 163 с.
12. Strobl G.F.X., Ebel L., Fuhrmann D., Guter W., Kern R., Khorenko V., Köstler W., Meusel M. Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end of life // Proc. of the 40th IEEE PVSC Conference, Denver/Colorado, June 8-13, 2014.
13. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей ; под ред. М.М. Колтуна. Москва : Энергоиздат, 1983. 360 с.
14. Куница Т.Н., Романов Б.С. О возможности эксплуатации в нестандартных условиях кабелей и проводов для авиакосмической техники // Наука и техника. 2010. №3(322). С.31-33.
15. Опытное конструкторское бюро кабельной промышленности, www.okbkr.ru/production/cables/montage/ //официальный сайт (дата обращения 2.02.2018).
16. Васильев И.С., Сунцов С.Б. Ефремов С.В., Ким В.С. Проведение испытаний обжимных электрических соединений в бортовой кабельной сети космического аппарата с целью определения их характеристик // Авиация и ракетно-космическая техника. Вестник СибГАУ. 2014. № 1(53). С. 114-118.
17. Лесневский В.А. Монтажные провода для высокоимпульсных двигателей. Выбор и их сравнительные испытания // Решетневские чтения. 2014. С.164-165.
18. ООО «Промкомплект Украина» Преимущества метода обжимки методу пайки. Ptku.com.ua //официальный сайт (дата обращения 2.02.2018).
19. Guidelines for Space-Grade Applications. MIL-DTL-38999 Connectors for Space Flight. GLENAIR, INC.(USA), www.glenair.com // официальный сайт (дата обращения 02.02.2017).
20. ECSS-Q-ST-70-26C. «Гарантирование космической продукции. Обжимка высоконадежных электрических соединений» // Европейская Кооперация по Космической Стандартизации. 2008. 41 с.
21. Васильев И.С., Ефремов С.В., А.П. Леонов А.П. Надежность электрических соединений в бортовой кабельной сети космических аппаратов // 4-я Научно-техн. конф. МС АО ИСС им Решетнева. Сборник тезисов. 2017. С. 131-133.
22. Васильев И.С., Ким В.С., Ефремов С.В. Надежность электрических соединений в бортовой кабельной сети перспективных космических аппаратов // Науковедение. 2013. № 3. С. 1-7.
23. Попов В.Д. Проблемы и возможности применения коммерческих интегральных схем в военной и космической технике // Chip News. 1999. №5(38). С.28-32.
24. Гобчанский О., Попов В., Николаев Ю. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры // Современные технологии автоматизации. 2001. №4. С.36-40.
25. Попов В.Д. Пострадиационный эффект в ИС. Неразрушающий контроль качества в ИС // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. №4. С.36-39.
26. Артюхова М. Оценка стойкости ИС для бортовой космической аппаратуры / М. Артюхова, В. Жаднов, С. Полесский // Электронные компоненты. 2013. № 1. С. 72-76.
27. CubeSat Solar Panels, <https://www.isispace.nl/product/isis-cubesat-solar-panels> // официальный сайт (дата обращения 02.02.2018).
28. CubeSat Solar Panels, <https://www.clyde.space/products/cubesat-solar-panels> // официальный сайт (дата обращения 02.02.2018).
29. CubeSat Solar Panels, <http://dhvtechnology.com/pages/products/cubesat-solar-panel/> // официальный сайт (дата обращения 02.02.2018).
30. CubeSat Solar Panels, <https://www.endurosat.com/cubesat-category/cubesat-solar-panels> // официальный сайт (дата обращения 02.02.2018).
31. ECSS-Q-ST-70-11C Гарантирование космической техники. Требования к печатным платам // Европейская Кооперация по Космической Стандартизации. 2008. 46 с.
32. ECSS-Q-ST-70-10C Гарантирование космической техники. Квалификация печатных плат // Европейская Кооперация по Космической Стандартизации. 2008. 90 с.

33. СОУ ГКА 0062:2012. Материалы космической техники. Номенклатура марок, разрешенных к применению в изделиях приборостроения.
34. ECSS-Q-ST-70-02С Гарантирование космической техники. Термовакuumные испытания для отбора материалов космического применения по уровню их газовой выделенности / Европейская Кооперация по Космической Стандартизации. 2008. 45 с.
35. ООО Датчиковое производство. Завод Рапид, <https://zavod-rapid.com> // официальный сайт (дата обращения 2.02.2018).
36. Брянцева И., Солтовская А. Современные паяльные пасты AIM // Производство электроники. 2014. №2. С 1-2.
37. Паяльная паста марки NC293+ компании AIM Solder, www.aimsolder.com // официальный сайт (дата обращения 02.10.2018).
38. ECSS-Q-70-71А «Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Данные для выбора материалов, предназначенных для использования в космосе, и связанных с ними процессов» / Европейская Кооперация по Космической Стандартизации. 2004. 222 с.
39. Силиконовый теплопроводный клей марки RTV-S691 для открытого космоса компании Wacker Chemie AG www.wacker.com. // официальный сайт (дата обращения 02.02.2018).
40. Эпштейн Д.М., Смоллен Г., Картер Р.Л. Склеивание разнородных материалов в конструкциях космических аппаратов // Технология изготовления клееных конструкций ; под ред. М. Боднара. Москва : Мир, 1975. С. 322.
41. Крылов А. Производство и эксплуатация спутников связи и вещания. Москва, 2014. 73 с.
42. Dettlaff K., Dr. Gerhard A., Paarmann C., Bals A., Dr. Zimmermann W., Fernander E., Caon A. Qualification of European Triple-Junction Solar Cells with Astrium PVA Technology // Proceedings of the 8th European Space Power Conference, held on 14-19 September 2008 at Constance in Germany. Edited by H. Lacoste and L. Ouwehand. ESA-SP. Vol. 661.
43. Astrium installs millionth solar cell as it delivers its 300th array, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/FEB/ASTRIUM_030212.html // официальный сайт (дата обращения 02.02.2018).
44. Gerhard A., Steins W., Siguier M., Inguibert V., Sarrailh P. et al. Degradation of solar cells due to in orbit electrostatic discharge? // Spacecraft Charging Technology Conference 2014 (2014 SCTC), Jun 2014, PASADENA, United States. <hal-01087738>
45. Thomas Andreev, Claus Zimmermann, Andreas Löhberg, Sybren de Jong, Udo Schuhmacher, Jürgen Schneider, et al. Qualifying solar array components for high intensity, high temperature environments – the test approach for the Bepi Colombo solar arrays) // European Space Power Conferenc. May 2015.
46. Січ-2М.16.1163.307 ТР «Требования по стойкости космического аппарата к факторам космического пространства».
47. YUZHSAТ.16.1177.307 ТР. Вторая редакция. "Требования по стойкости космического аппарата к факторам космического пространства".
48. ГСП.16.1209.307 ТР. «Требования по стойкости космического аппарата к факторам космического пространства».
49. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы (ОКР) "Разработка батарей солнечной" CubeSat.12.9603.314 ТЗ.
50. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы (ОКР) "Разработка батарей солнечной" Січ-2М.12.9433.314 ТЗ.
51. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы (ОКР) "Разработка батарей солнечных" YuzhSat.12.9678.314 ТЗ.
52. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы (ОКР) "Разработка батарей солнечной и контрольно-проверочной аппаратуры" ГСП.12.9621.314 ТЗ.

¹ ООО «Научно-производственное предприятие «ЛТУ», г. Харьков

² Институт сцинтилляционных материалов, г. Харьков

³ ГП «КБ «Южное», г. Днепр

Поступила в редколлегию 02.10.2019