

УДК621.355; 621.383:535.215

Солнечные и аккумуляторные батареи ОАО «Сатурн» на космических аппаратах с электронными двигателями

В.В. Галкин

Аннотация

В составе системы электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА), в том числе использующих электроракетные двигатели, всегда присутствует первичный источник электроэнергии и вторичный, обеспечивающий работу СЭС на теневых участках полета или компенсирующий нехватку мощности первичного источника. В качестве первичного источника используются, как правило, солнечные батареи (СБ), вторичного – аккумуляторные батареи (АБ) различных типов. На примере разработок ОАО «Сатурн» рассмотрим современное их состояние и перспективы совершенствования.

Ключевые слова

система электроснабжения (СЭС); космический аппарат (КА); солнечная батарея (СБ)

Солнечные батареи

В СССР и России традиционным является построение солнечных батарей (СБ) на трубчатых каркасах, промежутки между трубчатыми элементами каркаса заполнены гибким носителем в виде натянутых струн. На рисунке 1 представлены некоторые типы СБ, в том числе и наиболее тиражируемое изделие, СБ для космических аппаратов (КА) «ГЛОНАСС».

В качестве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для изделий ранних разработок использовались кремниевые ФЭП. Сегодня во всех новых проектах применяются трехкаскадные ФЭП на основе арсенида галлия с коэффициентом полезного действия (КПД) порядка 30 %.

На рисунке 2 представлена СБ для геостационарного метеорологического КА «Электро-Л». Это наиболее современная на сегодня конструкция с точки зрения энергомассовой отдачи. Каркас на основе углепластиковых труб.

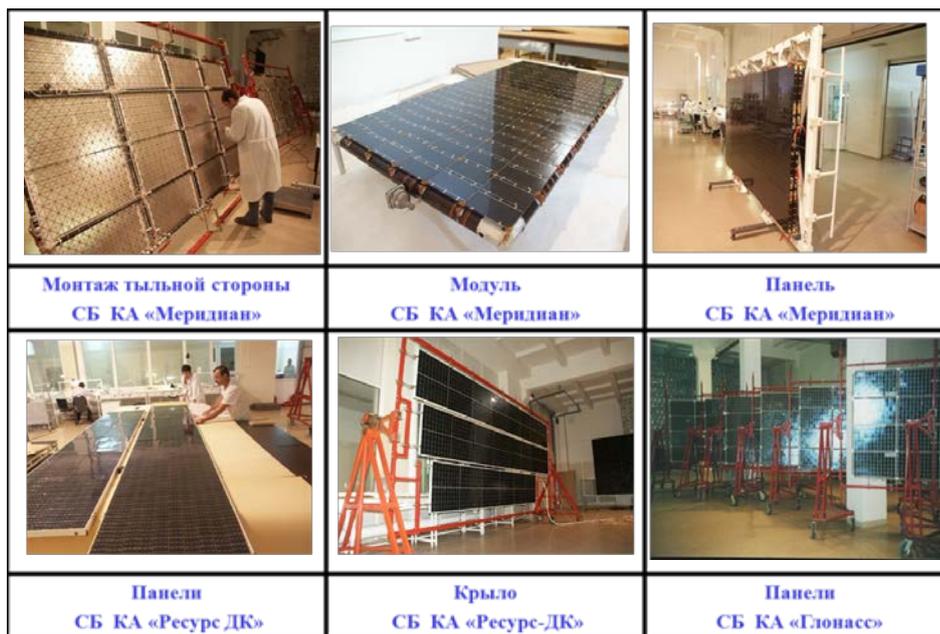


Рис.1. Солнечные батареи



Рис.2. СБ для КА «Электро-Л»

На рисунке 3 показаны фрагменты конструкции фотогенерирующей части. Это ФЭП размером 40×80 мм с фаской. Видны продольные и поперечные струны. В качестве тыльной защиты использован 100 мкм фольгированный стеклотекстолит. Медь фольгированного стеклотекстолита использована в качестве тыльных межэлементных соединений. ФЭП имеет встроенный диод. Для этой СБ использованы ФЭП немецкой фирмы AZUR. ОАО «Сатурн» имеет опыт работы и с СБ на трехслойных сотовых панелях, изготовления ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева». Общий вид одного крыла СБ КА «Ямал-200» представлен на рисунке 4.

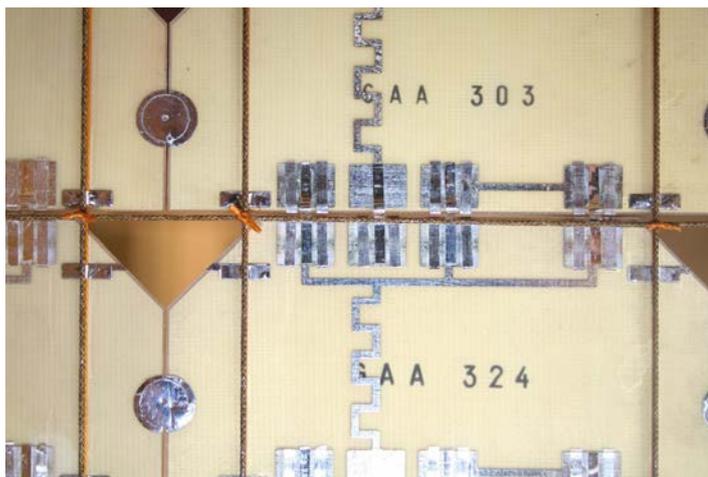


Рис.3. СБ для КА «Электро-Л». Фрагмент тыла

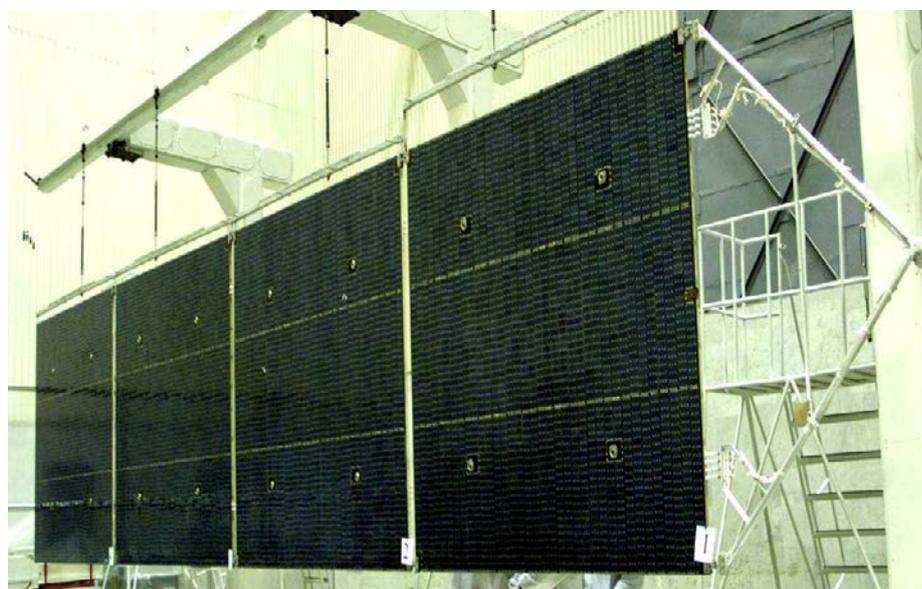


Рис.4. Крыло СБ КА «Ямал-200». Сотовые панели

Современное состояние технических характеристик СБ представлено в таблице 1 (столбцы 2, 3, 4) и перспектива ближайших лет (столбец 5).

Второй столбец – параметры БС американской фирмы «Спектролаб» - наиболее известного производителя СБ. Остальные столбцы – наша совместная с российскими фирмами и фирмой AZUR продукция.

На каркасе ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» удельная масса СБ несколько хуже, чем у «Спектролаба» из-за большей удельной массы сотовой панели. Лучшие показатели у каркаса фирмы ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева» – из-за низкой удельной массы трубчатых каркасов. Но здесь несколько хуже радиационная стойкость. Важное пояснение – эти цифры для СБ малой до 40 м² площади. Для больших площадей

необходимо увеличивать сечение труб каркаса и весовые показатели при этом будут приближаться к показателям «Спектролаб».

Таблица 1

Характеристики перспективных СБ

Параметр	Spectrolab (перспективный уровень)	ФЭП AZUR каркас ОАО «РКК «Энергия им. С.П. Королева»	ФЭП AZUR каркас ОАО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева»	ФЭП AZUR каркас НПО им. С.А. Лавочкина, ОНПП «Технология»
КПД ФЭП, %	28.2*...29.5	29.1		31
Удельная масса ФЭП, кг/м ²	0.732			0.732 (0.453**)
Удельная мощность на начало САС по ФЭП, Вт/м ²	330 (366)	356	360	381
Удельная мощность на 15 лет САС по ФЭП, Вт/м ²	260 (290)	279	272	293
Удельная масса БФ, кг/м ²	1.75	1.60	1.5...1.6	1.33...1.40 (~1.0**)
Удельная масса каркаса, кг/м ²	0.6...0.8*	>1.0	0.7	0.4...0.5
Удельная масса СБ (БФ+каркас), кг/м ²	2.35...2.55	>2.6	2.2...2.3	1.73...1.90 (<1.5**)
Удельная масса СБ (БФ+каркас), кг/кВт	8.1...8.8	-	7.58...7.93	5.1
Примечания: Характеристики даны без учета массы узлов раскрытия, зачекочки и транзитных кабелей *-ориентировочное значение **-в случае применения ФЭП толщиной 80 мкм				

В последние годы мы сложили кооперацию такого состава: ОАО «Сатурн», фирма AZUR – ФЭП и фотогенерирующая часть, фирма «Технология» (г. Обнинск) - сотованель, «НПО им. С.А. Лавочкина» – конструкция каркаса СБ. КПД ФЭП до 31 %, масса каркаса 0.4...0.5 кг/м², удельная мощность СБ – 5.1 кг/кВт. Такая удельная масса (мощность) возможна при применении тонких ФЭП толщиной 80...100 мкм. Технология изготовления таких ФЭП в ОАО «Сатурн» близка к освоению. Таким образом масса панелей СБ мощностью 200 кВт будет весить чуть больше 100 кг. Здесь сотованель уже не трехслойная, а по существу двухслойная с ребрами (см. рисунок 5).

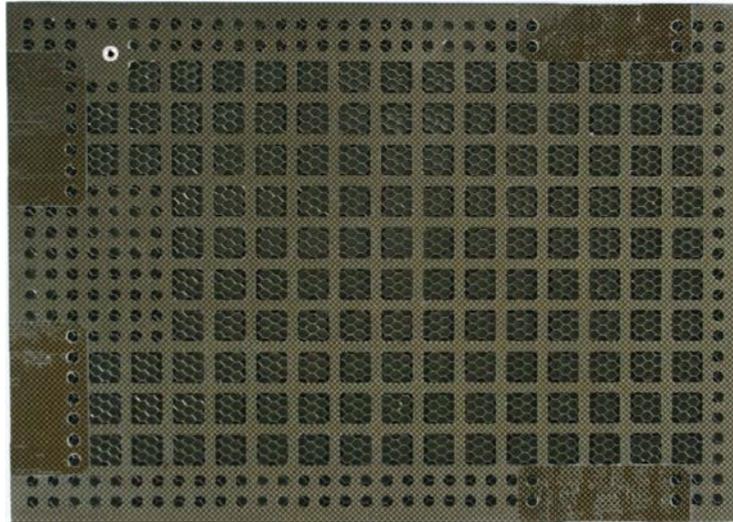


Рис.5. Экспериментальная сотованель

Эти работы материализованы на малом КА АИСТ – разработки Самарского ракетно-космического центра (см. рисунок 6).



Рис.6. МКА «АИСТ»

Его полет в качестве попутного груза на КА «Бийон» должен состояться весной 2013 года. Наиболее сложная задача для СБ на сотованелях обеспечить их стойкость к термоциклическим воздействиям. В феврале 2012 года в ОАО «Сатурн» закончены термоциклические испытания в режимах околоземной орбиты в количестве 60000 циклов. Это означает, что такие батареи пригодны для эксплуатации на околоземных орбитах более 10 лет.

Сфера применения КА с электроракетными двигательными установками это в основном, геостационарная орбита (ГСО), дальний космос, межорбитальные буксиры. Здесь невысоки термоциклические и радиационные воздействия.

Аккумуляторные батареи

Последние два десятилетия в составе СЭС КА в подавляющем большинстве случаев использовались аккумуляторные батареи (АБ) никель-водородной (НВ) электрохимической системы. Они обладают достаточно высокой удельной весовой энергией, исключительно высокой надежностью и живучестью. Наибольших успехов в совершенствовании НВАБ достигла Россия (ОАО «Сатурн»). Достаточно сказать, что суммарная безотказная наработка НВАБ ОАО «Сатурн» достигла 3500 лет, срок службы на низких околоземных орбитах и ГСО достиг или превышает 15 лет. Характерные представители НВАБ представлены на рисунках 7...10.

Восемь лет назад в практике использования в составе СЭС геостационарного КА впервые появились литий-ионные АБ (ЛИАБ) фирмы SAFT. К настоящему времени около сотни КА эксплуатируются, имея в своем составе ЛИАБ, преимущественно на ГСО. ОАО «Сатурн» также развивает это направление. Основные технические характеристики типичных представителей АБ представлены в таблице 2.

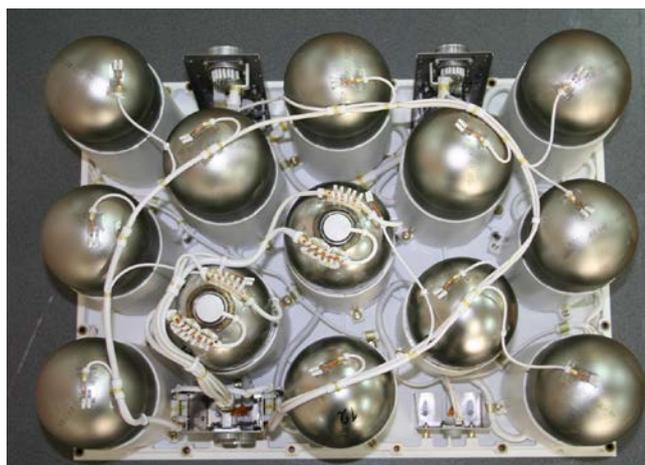


Рис.7. АБ КА «Гонец-М» (25А×ч)



Рис.8. НВАБ КА «Ямал-200»



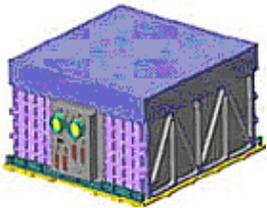
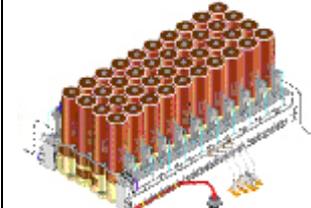
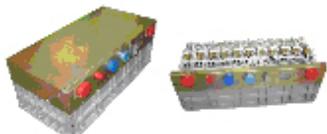
Рис.9. АБ КА «Яогань» (КНР)



Рис.10. НВАБ платформы Spacebus-4000, TAS (Франция)

Таблица 2

Характеристики ЛИАБ ОАО «Сатурн» и фирмы SAFT

Технические характеристики	23ЛИ-50 ОАО «Сатурн»	2P20S VES-180 SAFT	22×2ЛИ-85 ОАО «Сатурн»
Номинальная энергоемкость, Вт×ч	5400	6400	15600
Номинальная емкость, А×ч	65	89	195
Напряжение, В	62...94.3	54...82	66...91.3
Масса АБ, кг	45	60	116
Удельная энергоемкость, Вт×ч/кг	120	107	134
Удельная объемная энергоемкость, Вт×ч/дм ³	162	118	145
Срок активного существования, лет	15		
Тип орбиты КА	геостационарная		
Фото			

Из таблицы следует, что АБ ОАО «Сатурн» обладают более высоким энергомассовым совершенством. Это объясняется принципиально разным подходом к конструкции АБ. АБ ОАО «Сатурн» состоят из призматических аккумуляторов, соединенных последовательно и объединенных в единый монолит внешним корпусом. При этом массовая доля аккумуляторов в массе АБ достигает 90 %. АБ фирмы SAFT состоят из цилиндрических аккумуляторов, помещенных в индивидуальные корпуса, и соединяются последовательно-параллельно. При этом массовая доля аккумуляторов не превышает 75 %.

Таким образом, ведущие производители химических источников тока предоставляют разработчикам КА альтернативные варианты построения СЭС КА.

Основные технические характеристики НВАБ и ЛИАБ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики АБ для КА

Параметр	НВАБ			ЛИАБ			
	ОАО «Сатурн», Россия		Европа, США	SAFT (Франция, США) на базе			ОАО «Сатурн», Россия
	40НВ-95	40НВ-95Н		VES-140	VES-180	VES-16	22×2 ЛИ-85
Удельная энергия, Вт×ч/кг	72	66	50	100	120	110	134
Предельная глубина циклирования, %							
• на НОО	-	40	30	20	-	20	-
• на ВКО	80	-	75	50	-	-	80
• на ГСО	80	-	75	80	70	70	80
Циклический ресурс, циклов							
• на НОО	-	>50000	30000	~20000	-	~25000	-
• на ГСО	> 4000	-	>1500	>1100	>1100	>1500	≥1150
Реализуемая удельная энергоемкость, Вт×ч/кг							
• на НОО	-	27	15	20	-	22	-
• на ГСО	57	-	37.5	80	84	77	107
Примечания: НОО – низкая околоземная орбита; ВКО – высокая круговая орбита							

Из таблицы 3 видно, что ЛИАБ превосходят НВАБ по начальной удельной энергии, но значительно уступают по циклическому ресурсу. Но наиболее важным показателем качества той или иной АБ для потребителя является значение реализуемой удельной энергоемкости в конце срока службы, получаемой как произведение полной удельной энергоемкости на глубину циклирования. Если рассматривать применение АБ в составе СЭС

геостационарных КА или КА, при эксплуатации которых циклическая нагрузка не превышает 1500 циклов, то преимущества ЛИАБ очевидны.

С точностью до наоборот дело обстоит при применении АБ, когда они подвержены многоцикловой нагрузке, например, для КА на низкой околоземной орбите или при работе на электрическую двигательную установку при ее многократном включении.

Циклический ресурс и глубина циклирования ЛИАБ, в отличие от НВАБ, имеет теоретические ограничения, и изменения их требуют решения серьезных материаловедческих и технологических задач. Более близкой представляется задача увеличения глубины циклирования с 20 до 25 %. В этом случае реализуемая удельная энергия может достигнуть 27...28 Вт×ч/кг. Вместе с тем, есть пути очевидного улучшения характеристик НВАБ до 36...37 Вт×ч/кг. Окончательный выбор той или иной электрохимической системы разработчиком СЭС должен осуществляться на основе анализа комплекса параметров, важнейшие из которых представлены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнительные характеристики систем электропитания автоматических КА, эксплуатирующихся на низких околоземных орбитах, на базе ЛИАБ и НВАБ

№ п/п	Характеристика	НВАБ	ЛИАБ	Влияние на КА
1.	Энергетический КПД, %	75	95	Увеличение площади и массы СБ
2.	Тепловыделение (соотношение)	5	1	Увеличение площади радиатора
3.	Самозаряды, % в сутки	4...5	0.1...0.3	Подзаряд на стартовом комплексе
4.	Саморазряды, % в сутки	4...5	0.1...0.3	Автоматическое поддержание максимальной степени заряда Сложная система блокировки
5.	Реализуемая удельная энергия, Вт×ч/кг	36.4	27.8	Увеличение массы АБ
6.	Устойчивость к перезаряду	не чувствителен	низкая	Высокая надежность блока контроля и управления (>0.999) или резервирование
7.	Устойчивость к переразряду	не чувствителен	нулевая	Высокая надежность блока контроля и управления (>0.9999) или резервирование

Первые четыре строки таблицы свидетельствуют в пользу ЛИАБ. Особую озабоченность при эксплуатации ЛИАБ вызывает возможность реализации аппаратурной защиты АБ от перезаряда и переразряда с надежностью превышающей 0.999 и 0.9999, соответственно. На ГСО и прилежорбитальных перелетах такой проблемы не возникает, так как КА наблюдается в режиме реального времени и аварийную ситуацию можно

предотвратить по радиокоманде. Таким образом, на КА, эксплуатирующихся на низких орбитах, применение ЛИАБ весьма рискованно.

Заключение

Многолетний опыт ОАО «Сатурн» по разработке, производству, а также многолетний опыт их летной эксплуатации показывает, что сегодня уверенно можно создавать энергоустановки КА мощностью десятки кВт с удельной массой 5 кг/кВт на базе многокаскадных ФЭП и накопителями энергии с запасенной энергией в десятки кВт×ч на базе ЛИАБ и НВАБ с удельной энергией в диапазоне 80...135 Вт×ч/кг.

Информация об авторе

ГАЛКИН Валерий Владимирович, заместитель Генерального директора ОАО «Сатурн», к.т.н.

ОАО «Сатурн», ул. Солнечная, дом 6, Краснодар, 350072;

тел.: (861) 252-39-43; e-mail:ikc@zit.kuban.ru