

УДК 621.7.064.52

К. В. Безручко¹, С. В. Синченко¹, В. С. Рева²

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*,

² *Государственное предприятие «КБ «Южное им. М. К. Янгеля»*

АНАЛИЗ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДОЛГОЖИВУЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

У статті розглянуто аналіз і вибір електрохімічних накопичувачів енергії для енергоустановок космічних апаратів довготривалої експлуатації. Розглянуті космічні апарати за висотою орбіти, умовами експлуатації їх енергоустановок, наведений аналіз різних за типом електрохімічних акумуляторів, що входять до енергоустановок космічних апаратів.

Ключої слова: *космічний апарат, орбіта, енергоустановка, електрохімічний акумулятор.*

В статье рассмотрен анализ и выбор электрохимических накопителей энергии для энергоустановок космических аппаратов длительной эксплуатации. Рассмотрены космические аппараты по высоте орбиты, условиями эксплуатации их энергоустановок, приведен анализ различных по типу электрохимических аккумуляторов, входящих в энергоустановку космических аппаратов.

Ключевые слова: *космический аппарат, орбита, энергоустановка, электрохимический аккумулятор.*

The article describes the analysis and selection of electrochemical energy storage devices for power plants of long-term spacecraft. The space vehicles are examined according to the height of the orbit, the operating conditions of their power plants, and an analysis is made of electrochemical accumulators of various types included in the power plant of space vehicles.

Keywords: *spacecraft, orbit, power plant, electrochemical battery.*

Введение. Большинство современных космических аппаратов, которые работают на высоких и в том числе на геостационарных орбитах, имеют проектный ресурс от 10 до 18 лет (рис. 1).

В результате проведенного анализа [1-8], выяснилось, что запуск долгоживущих спутников предполагает использование высоких орбит (рис.2). И действительно, проведенная оценка всех орбит по основным показателям показала, что наиболее полно отвечает этим требованиям геостационарная орбита.

В число крупнейших мировых производителей коммерческих геостационарных спутников (например, для связи) входят следующие компании и фирмы: «Loral», «Hughes/Boing» (США), «Alkatel» (Франция), «Astrium» (Германия), НПО ПМ (Россия) и др.

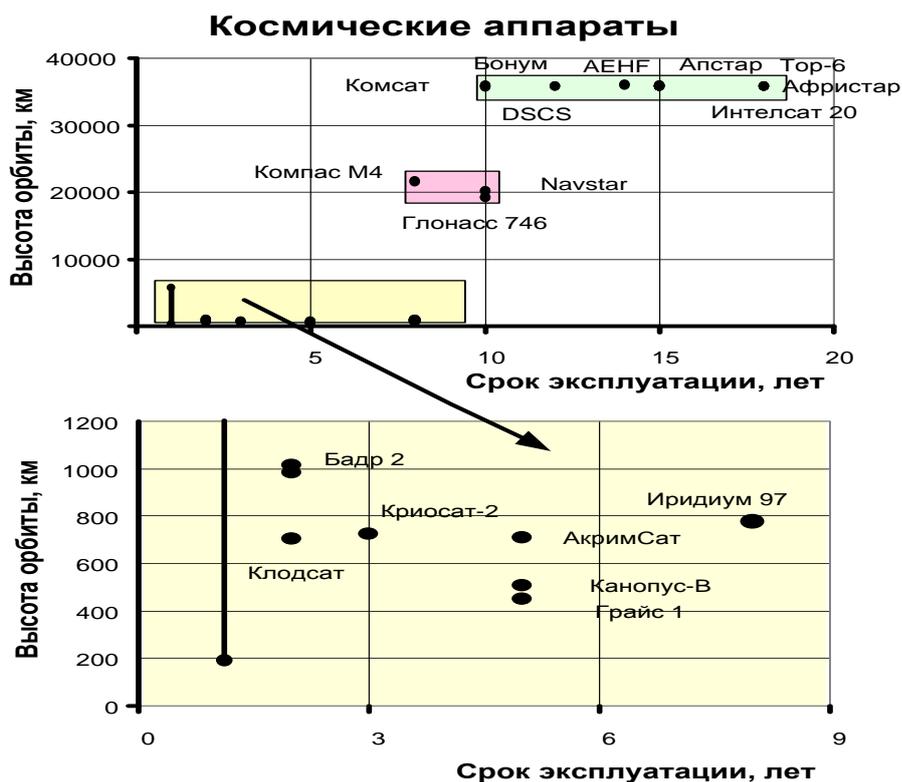


Рис. 1. Ресурс различных космических аппаратов

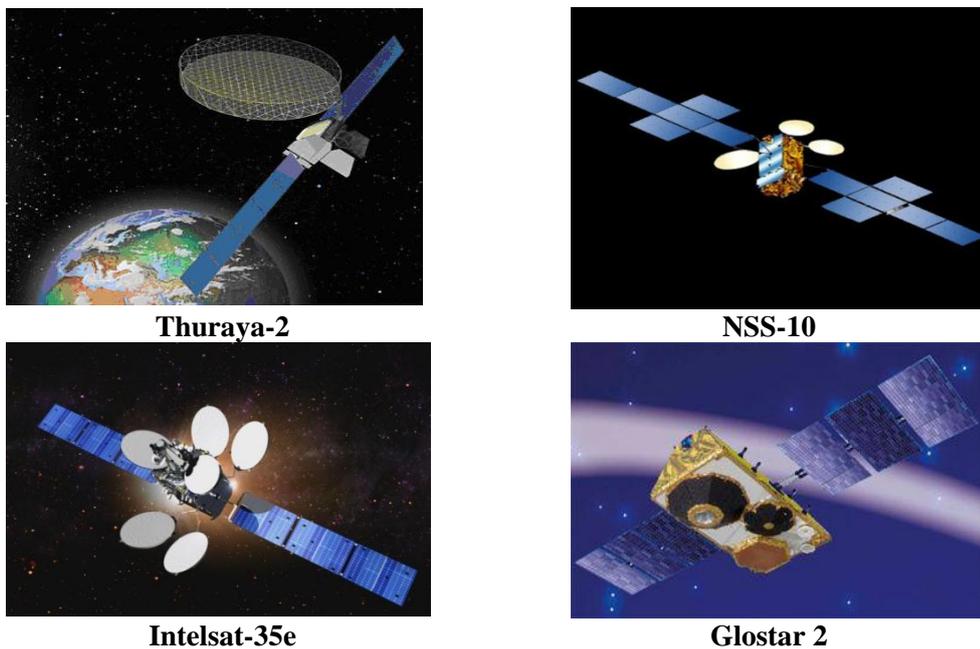


Рис.2. Высокоорбитальные космические аппараты (примеры)

Применение электрохимических накопителей энергии для энергоустановок космических аппаратов

Система энергоснабжения космического аппарата (КА) предназначена для выработки, хранения, регулирования и распределения электроэнергии на

всех этапах работы космического аппарата на орбите. Выход из строя системы энергоснабжения ведет к отказу всего космического аппарата.

Одним из наиболее критичных элементов энергоустановок космических объектов является накопитель энергии. В зависимости от условий работы космического объекта к электрохимическим накопителям, входящим в состав системы электроснабжения, выдвигается следующий ряд требований (табл.1): возможность обеспечения большего количества циклов заряда- разряда, возможность обеспечения длительной сохранности энергии и др.

Таблица 1

Эксплуатация электрохимических аккумуляторов и батарей в составе современных долгоживущих космических аппаратов

Название КА	Страна	Орбита	Масса, кг	Ресурс, лет	Тип аккумуляторной батареи
NSS 6	Netherlands	GEO	4700	14	NiH ₂
NSS 10	USA	GEO	4979	16	Li-ion
Thuraya-2 and3	United Arab Emirates	GEO	5177	12	Li-ion
Hot Bird 8	International	GEO	4875	15	Li-ion
KazSat 2	Kazakhstan	GEO	1330	12	Li-ion
Intelsat 16	International	GEO	2056	15	Li-ion
Nilesat 201	Egypt	GEO	3200	15	Li-ion
Eutelsat KA-SAT 9A	International	GEO	6150	15	Li-ion
Elektro-L 1	Russia	GEO	1740	10	NiH ₂
Kosmos 2471	Russia	19100 км	935	10	NiH ₂
Globalstar 92	USA	1410 км	700	15	Li-ion
Intelsat 22(IS 22)	USA	GEO	6199	18	Li-ion
APSTAR 7	China	GEO	5054	15	Li-ion
Метеор	Россия	Солн.-синхр., круговая	2476	3	NCd
Горизонт	Россия	GEO	2100	5	NiCd

Типы электрохимических накопителей в зависимости от назначения космических аппаратов

Обзор источников информации [1-10] показал, что выполнение современных задач, решаемых объектами ракетно-космической техники, требует длительной эксплуатации этой техники.

В зависимости от характеристик орбит, на которых работают космические аппараты, энергоустановки, работают в разных условиях (см. рис.3): так при эксплуатации космических аппаратов на низких орбитах электрохимический аккумулятор за время эксплуатации подвергается значительно большему количеству циклов заряда-разряда (рис. 4, 5, 6), чем при эксплуатации космических аппаратов на высоких орбитах.

Исходя из требований к аккумуляторам по количеству циклов и ресурсу в составе энергоустановок космических аппаратов применяют в основном 3 типа электрохимических аккумуляторов : никель-кадмиевые; никель-водородные и литий-ионные.



Рис. 3. Электрохимические аккумуляторы различных космических аппаратов

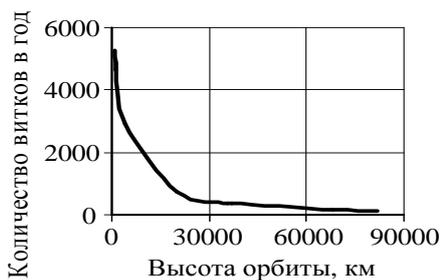


Рис. 4. Изменение количества витков космического аппарата в год в зависимости от высоты орбиты

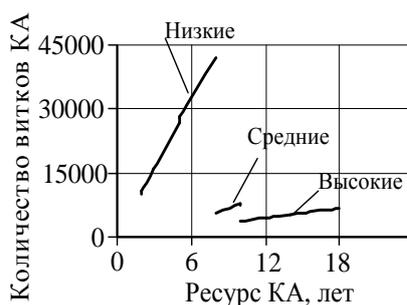


Рис. 5. Изменение количества витков космического аппарата в зависимости от его ресурса и высоты орбиты

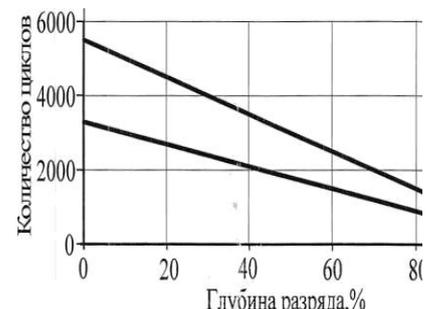


Рис. 6. Изменение количества циклов заряда-разряда никель-кадмиевых аккумуляторов от глубины разряда

В настоящее время не решены вопросы создания и применения эффективных путей и методов обеспечения длительных сроков эксплуатации

электрохимических аккумуляторов энергоустановок современных ракетно-космических объектов.

Так как аккумуляторные батареи являются составляющей частью энергоустановок и в значительной степени влияют на их работоспособность и ресурс, вопрос о применении наиболее оптимального типа электрохимической системы является актуальным.

Выбор конкретных типов накопителей для использования в системе электроснабжения КА определяется несколькими факторами:

- условиями работы в составе энергоустановки;
- режимом работы электрохимического аккумулятора в составе энергоустановки;
- временем функционирования; уровнем и видом циклограммы электропотребления;
- удельными характеристиками электрохимических аккумуляторов;
- стоимостью электрохимических аккумуляторов и энергоустановки в целом.

Для достижения высокой надежности и исключительных требований к производительности в течение продолжительного срока службы аккумуляторной батареи в процессе сборки соблюдаются строгие стандарты. Электрохимические аккумуляторы проходят строгие испытания: максимальная зарядная емкость, пиковое напряжение, внутреннее сопротивление, скорость разряда и конечное напряжение разряда, температура тесно согласованы между всеми аккумуляторами, чтобы гарантировать выполнение всех заявленных при проектировании требований.

Современные аккумуляторы способны выдержать тысячи циклов заряда-разряда, что позволяет эксплуатировать их в течение десятков лет без замены [4, 5]. Для ракетно-космических объектов, где обеспечение длительного ресурса и высокой надежности являются одним из основных требований, эта особенность весьма важна, и определяет широкое применение аккумуляторов различных электрохимических систем [7, 8].

Никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи (рис. 7а) на их основе являются в настоящее время основным типом накопителей энергии, применяющимся в составе энергоустановок космических аппаратов. Никель-кадмиевые аккумуляторы используются чаще всего в составе энергоустановок космических аппаратов среднего ресурса (до нескольких лет). Никель-кадмиевые аккумуляторы также применяются в составе ракетных комплексов, где они находятся в дежурном режиме длительное время (10...20 лет) (с периодической их заменой).



а) никель-кадмиевый герметичный аккумулятор и батарея

б) никель-водородные аккумуляторы и батарея

в) литий-ионный аккумулятор и батарея

Рис. 7. Внешний вид различных типов электрохимических аккумуляторов и батарей различных ракетно-космических объектов

Никель-водородные аккумуляторы и батареи (рис. 7 б) были изобретены в начале 60-х годов и усилия разработчиков этих аккумуляторов направлены на достижение максимального срока службы, безопасности и значительной глубины разряда [7-10].

Литиевые аккумуляторы и батареи (рис. 7 в) и батареи на их основе представляют собой широкий класс аккумуляторов с различными эксплуатационными характеристиками. Химические батареи на основе литиевых аккумуляторов считаются очень перспективными для использования в составе энергоустановок космических аппаратов. Однако их развитие все еще находится на стадиях исследований.

Срок службы электрохимических аккумуляторов определяется рядом факторов, главным из которых являются: деградация источника электрической энергии, в том числе и для электрохимических батарей.

Критическими факторами для КА являются: деградация солнечных и электрохимических батарей и случайный отказ их блоков.

Анализ рынка аккумуляторов различных электрохимических систем [8-10] (рис. 8) показал, что по удельным характеристикам наиболее предпочтительные для использования в космической технике являются аккумуляторы фирм: The Saft Group (США) – литий-ионной электрохимической системы (удельная энергия достигает значения до 165 Вт·ч/кг) и НПО «ССК» (Россия) – литий-полимерной системы (удельная энергия достигает значения до 178,5 Вт·ч/кг).

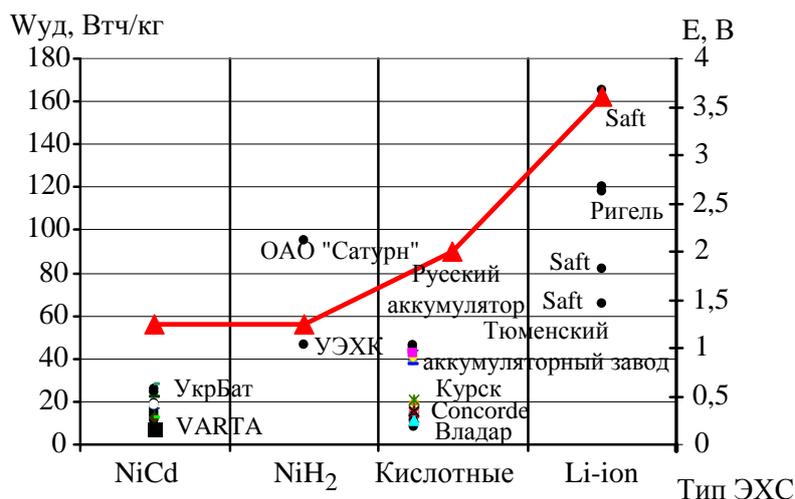


Рис. 8. Достижения различных фирм-производителей электрохимических аккумуляторов

Среди других электрохимических систем выделяются такие фирмы как: ЗАО «УкрБат» (Украина) с аккумуляторами никель-кадмиевой электрохимической системы (удельная энергия достигает значения до 26 Вт·ч/кг); The Saft Group (США) – никель-металлгидридная электрохимическая система (удельная энергия – 66 Вт·ч/кг); Группа компаний «Русский аккумулятор» (Россия); ОАО «Тюменский аккумуляторный завод» – свинцово-кислотные аккумуляторы (удельная энергия – 48 Вт·ч/кг).

Основные параметры электрохимических аккумуляторов, применяемых в составе энергоустановок ракетно-космических объектов, приведены в табл. 2

Таблица 2

Сравнение основных характеристик электрохимических аккумуляторов, применяемых на длительно эксплуатируемых ракетно-космических объектах

Параметры	Никель-кадмиевые	Никель-водородные	Литий-ионные
Номинальное напряжение, В	1,2	1,5	3,6
Плотность энергии, Вт·ч/кг	30...40	50...90	90...120
Удельная мощность, Вт/кг	150	100	1800
Ресурс, полных циклов	1500	3000	800
Ресурс, при эксплуатации согласно инструкции, лет	7	10	18
Саморазряд в месяц	20%	30%	10%
Надежность (снижение емкости в год на..., %)	20%	30%	10%
Рабочая температура, °С	-20...60	-20...40	-20...60
Стоимость, долл/Вт·ч	7	8	5
Производители, *	2, 3, 4, 6, 7	8, 9	1, 5, 10-18
* Фирмы-производители аккумуляторов:			
1 – The Saft Group (США); 2 – VARTA (США);		10 – SONY (Япония); 11 – SONYO (Япония);	

3 – Concorde (США);	12 – MATSUSHITA (Японія);
4 – ЗАО УкрБат (Україна);	13 – TOSHIBA (Японія);
5 – ОАО «Аккумуляторная компания «Ригель» (Россия);	14 – BYD Battery Co. (Китай);
6 – Курский завод «Аккумулятор» (Россия);	15 – LG Electronics Inc. (Китай);
ОАО «Тюменский аккумуляторный завод» (Россия);	16 – Samsung Electronics Co. (Южная Корея);
7 – Группа компаний «Русский аккумулятор» (Россия);	17 – ООО «Инженерная фирма Орион-ХИТ» (Россия);
8 – НВАБ УЭХК (Россия);	18 – EEMB (Китай);
9 – ОАО «Сатурн» (Россия);	

Анализ значений параметров и характеристик аккумуляторов в зависимости от условий эксплуатации и режимов их работы

Для электрохимических аккумуляторов величиной, определяющей массогабаритные характеристики, является плотность энергии. С этой точки зрения наиболее перспективными являются литий-ионные аккумуляторы. Однако при эксплуатации электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок ракетно-космических объектов ограничивающими факторами является также ресурс аккумулятора – возможность работы аккумулятора не только длительное время, но и возможность аккумулятора выдерживать большое количество циклов заряда-разряда.

Для того чтобы обеспечить длительный срок эксплуатации электрохимических аккумуляторов на борту ракетно-космических объектов необходимо кроме проектных параметров аккумуляторов особое внимание уделить эксплуатационным параметрам этих аккумуляторов (таблица 2) и возможности применения различных типов аккумуляторов на различных ракетно-космических объектах.

Практика показывает, что ресурс электрохимических аккумуляторов определяется не только совершенством конструкции аккумулятора, но и условиями его эксплуатации, поскольку при проектировании энергоустановок, как правило, основное внимание уделяется выходным характеристикам, а не обеспечению оптимального режима эксплуатации аккумуляторов. В таких случаях проявляется снижение технического ресурса за счет ускорения процессов деградации аккумуляторов вследствие неблагоприятных условий эксплуатации, которые необходимо учитывать.

Критерии истечения ресурса также определяются согласно режимам и условиям эксплуатации. Так при эксплуатации в дежурном режиме без подзаряда необходимо учитывать в первую очередь сохраняемость заряда. В большинстве случаев для определения факта истечения ресурса аккумуляторов достаточно оценки по величине разрядной емкости.

Достижение заданного ресурса космического аппарата осуществляется за счет увеличения емкости химических батарей, их резервирования и применения новых типов аккумуляторов, что приводит к существенному удорожанию космического аппарата.

К энергетическим установкам для космических исследований предъявляется требование высокой удельной энергии, так как стоимость запуска в космос резко возрастает с увеличением массы. Например, уменьшение массы запускаемого аппарата на 200 кг приводит к экономии 30 млн. долл. США. Поэтому резервирование аккумуляторов в СЭС значительно влияет на стоимость запуска КА. Но не все аккумуляторы подвергаются резервированию. Например, литий-ионные аккумуляторы начинают деградировать уже с момента изготовления, поэтому ставить резервы на борт КА считается нецелесообразным. Такие батареи должны обладать сверхвысокой надежностью, но масса КА с литий-ионными батареями на борту будет значительно ниже. Замена никелевых аккумуляторов на литий-ионный позволяет снизить массу энергоустановки на 35-40%, сократить мощность зарядных устройств благодаря более высокой отдаче по энергии и уменьшить площадь радиатора для отвода теплоты. Объем использованных в космосе в 2000 г. литий-ионных аккумуляторов составил 12 млн шт.

При выборе электрохимических накопителей энергии для энергоустановок долгоживущих космических аппаратов предлагается анализировать стоимость вывода аккумуляторов на заданную орбиту. Стоимость вывода 1 кг груза на низкую орбиту составляет 20 тыс. дол. США, на геостационарную орбиту до 30 тыс. дол. США.

Исходя из проанализированных величин емкости аккумулятора, выберем среднюю емкость, которую может обеспечить любой из предложенных выше типов аккумуляторов – 380 А·ч. Итак, литий-ионная батарея емкостью 380 А·ч будет стоить приблизительно 1000 дол. США. Цена никель-водородных и никель- кадмиевых батарей той же емкости будет несколько дешевле 250-500 дол. США.

Таблица 3

Особенности электрохимических аккумуляторов различных электрохимических систем, их достоинства и недостатки

Никель-кадмиевый	Никель-водородный	Литий-ионный
достоинства		
Накопленный большой опыт производства. Отработанность конструкции. Высокая надежность. Низкая стоимость. Высокая устойчивость к перегрузкам. Возможность восстановления.	Хорошие энергетические емкостные показатели. Низкая удельная масса. Высокая продолжительность времени активной работы. Возможность обеспечения больших разрядных токов	Высокое напряжение. Большая удельная емкость. Высокая плотность энергии. Относительно небольшой саморазряд. Низкая стоимость обслуживания. Отсутствие «эффекта памяти»
недостатки		
Небольшие значения удельных энергетических и емкостных показателей. Экологически загрязнен, так как кадмий является	Относительно большой удельный объем. Нетерпимость к перезаряду и переразряду.	Более высокая первоначальная стоимость. Малая тепловая стабильность, возможность воспламенения лития.

высокотоксичным веществом. Сложность в утилизации и переработке. Подверженность деградации. Небольшая допустимая глубина разряда. Наличие «эффекта памяти».		Необходимость применения встроенной схемы защиты. Подверженность старению. Затруднено быстрое тестирование АК.
---	--	--

Для емкости литий-ионная батарея будет иметь массу приблизительно 25 кг, никель-кадмиевая – 34 кг, никель-водородная – 50 кг. Масса аккумуляторной батареи может варьироваться в диапазоне от 6 до 80 кг в зависимости от типа, количества аккумуляторов в батарее, емкости.

Проведем расчет общей стоимости системы энергоснабжения с учетом стоимости аккумуляторных батарей по формуле (результаты приведены в табл.4):

$$C_{\text{полн.}} = (C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n) + (C_{\text{груза}} M_{\text{сп}}),$$

где C_1, C_2, \dots, C_n – стоимость устройства преобразования мощности, системы управления потоком мощности, аккумулирующий элемент соответственно; а также следует учитывать стоимость удельных энергии, и мощности и систему безопасности, особенно для химических накопителей энергии на основе литий-ионных элементов. Стоимость аккумуляторной батареи следует определять из учета количества элементов, входящих в неё;

$C_{\text{груза}}$ – стоимость груза;

$M_{\text{сп}}$ – масса системы, которая зависит от количества входящих в неё элементов.

Окончательную стоимость системы энергоснабжения можно определить, если стоимость вывода 1 кг груза на орбиту (стоимость может изменяться в зависимости от типа орбиты) умножить на общую массу спутника (без учета системы энергоснабжения). Таким образом, сумма двух выше упомянутых составляющих даст стоимость системы энергоснабжения.

Таблица 4

Расчет общей стоимости системы электроснабжения с различными типами аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	Масса аккумуляторной батареи (с учетом резервирования), кг	Стоимость 1 кг выводимого груза, тыс. дол. США	Общая стоимость системы энергоснабжения, тыс. дол. США
Литий-ионная	A (без резервирования)	15*A	15*A
Никель-водородная	2*(1,5A)	15*(2*1,5A))	15*3A
Никель-кадмиевая	3*(2A)	15*3(*2A))	15*6A

* Стоимость 1 кг выводимого груза принимаем равной 15 тыс.дол. США, при необходимости расчета для GEO орбит значение увеличивается в 2 раза.

Выводы. В результате проведенного анализа современных перспективных типов электрохимических аккумуляторов энергоустановок

высокоорбитальных космических аппаратов (см. рис.8, табл.1,2; табл. 4,5) можно заключить, что на выбор типа электрохимического аккумулятора влияют в первую очередь условия эксплуатации и режимы работы аккумулятора при учете значений сравнительных параметров приведенных в данной работе.

Библиографические ссылки

1. Mukund R. Patel, *Spacecraft power systems* / R. Patel Mukund - New York, Washington D.C.: CRC Press, Boca Raton. -2008. - 734p.
2. Конюхов С. Н. Научно-технические направления разработок космических аппаратов КБ "Южное" им. М. К. Янгеля/ С. Н. Конюхов // *Космічна наука і технологія*. - 1995. - №1. - С. 12 - 34.
3. Ванке, В. А. Космические энергосистемы / В. А. Ванке и др. М.: Машиностроение. 1990. – 144 с.
4. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К.В. Безручко, Н.В. Белан, Д.Г. Белов и др. / Под ред. акад. НАН Украины С.Н. Конюхова. – Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000 г. – 515 с.
5. Johnson P.J. *Battery Performance OfThe Skynet 4a Spacecraft. Final Report* / P.J.Johnson, N.R.Francis - Hertfordshire, SGI 2AS: England Marta Marconi Space UK Ltd, 1999.-650p.
6. Даниев, Ю. Ф. Космические летательные аппараты. Назначение, структура и основные этапы создания: Учеб. пособие для студ. инж. спец. вузов / Ю. Ф. Даниев, А. В. Демченко, В. С. Зевако, А. М. Кулабухов, В. В. Хуторный; ред.: А. Н. Петренко; Нац. косм. агентство Украины. - Д. : Систем. технологии, 2005. - 123 с.
7. Безручко, К.В. Научно-технические аспекты разработки, изго-товления и эксплуатации систем электроснабжения космических аппаратов / К.В. Безручко, В.Н. Борщов, А.О. Давидов, Н.В. Замирец, О.Н. Замирец, А.М. Листратенко, И.Т. Перекопский, И.Б. Туркин, Ю.А. Шовкопляс // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2011. – №5 (82) – С.8-13.
8. Каталог продукции. Никель-кадмиевые аккумуляторы [Электрон. ресурс] / ОАО «НИАИ «Источник», 2008. – Режим доступа: <http://www.niai.ru/catalog.php?id=10> – 20.12.2018.
9. Литий -ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов / А.В. Хромов // *Вопросы электромеханики* Т. 152, 2016, С.20-28. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/152/20-28.pdf> – 20.12.2018.
10. Выбор структуры системы электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов/Ю.А. Шиняков, А.С. Гуртов, К.Г. Гордеев, С.В. Ивков/ *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета* №1(21), 2010. – С.103-113.

Надійшла до редколегії 25.03.2019