

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

А. И. Груздев

На конкретных примерах рассмотрено применение литий-ионных аккумуляторных батарей в ракетно-космической технике. Двадцатилетний опыт эксплуатации в автоматических и пилотируемых околоземных и межпланетных космических аппаратах, на Международной космической станции, планетоходах и других образцах космической техники показал их высокую надёжность, эффективность и безопасность. Безопасность литий-ионных аккумуляторных батарей обеспечивается многоуровневой системой защиты, реализуемой на стадии проектирования и изготовления единичных аккумуляторов, аккумуляторных сборок, батарейных подсистем и аппаратуры электроснабжения космического аппарата. Современные литий-ионные аккумуляторные батареи работоспособны в экстремальных условиях эксплуатации межпланетных космических аппаратов, их посадочных модулей и планетоходов. На околоземных космических аппаратах реализован срок службы литий-ионных аккумуляторных батарей 15 и более лет на геостационарной орбите и более 50 000 циклов заряда/разряда в системах электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов. На примере собственных разработок показана возможность создания широкого параметрического ряда высокоэнергоемких (до 150 Вт·ч/кг) радиационно-стойких аккумуляторных батарей с повышенной устойчивостью к отказам единичных элементов на основе индустриальных литий-ионных аккумуляторов типоразмера 18650.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, космический аппарат, Международная космическая станция, система электроснабжения, аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор.

Первые образцы ракетно-космической техники использовали серебряно-цинковые аккумуляторные батареи (АБ). Из-за низкого ресурса при циклической работе они были практически полностью вытеснены никель-кадмиевыми и никель-водородными АБ, которые и сегодня, несмотря на относительно низкую удельную энергоёмкость, находят применение в системах электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА).

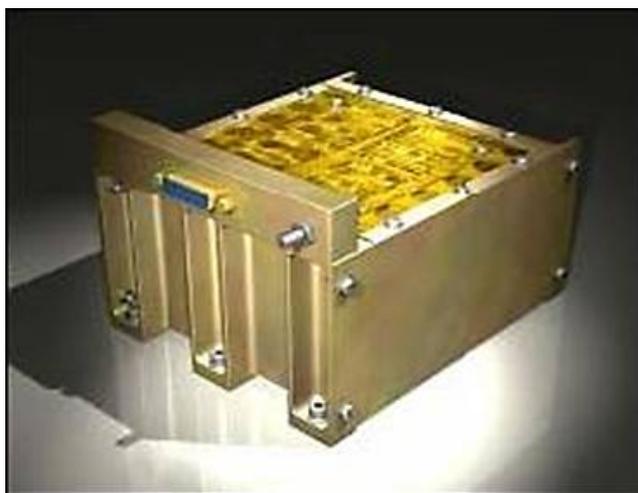
Целью настоящей работы является обзор областей применения, подходов к схемотехническому построению, вариантов конструкций и основных эксплуатационных параметров используемых в ракетно-космической технике литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ), а также анализ перспектив и направлений их совершенствования.

В настоящее время развитие систем электроснабжения космических аппаратов связано с ис-

пользованием литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ), имеющих существенно более высокие технико-эксплуатационные характеристики [1]. Впервые в космосе они были применены США в 1999 году в скафандре, использовавшемся при работах на Международной космической станции (МКС). В 2001 году на околоземную орбиту был выведен КА Европейского космического агентства (ЕКА) Proba-1 с ЛИАБ (рис. 1). Она была изготовлена фирмой ABSL Space Products на базе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) габарита 18650 в конфигурации 6S6P емкостью 9 А·ч [2]. Спроектированный для двухлетней эксплуатации этот КА демонстрирует удивительную долговечность и успешно используется до настоящего времени. В марте 2018 года он стал самой продолжительной миссией ЕКА по наблюдению Земли за все время исследований [3].



а



б

Рис. 1. Космический аппарат Proba-1 (а) и его литий-ионная аккумуляторная батарея (б)

Сегодня ЛИАБ используются не только на автоматических, но и на пилотируемых КА, а также на МКС. В американском сегменте МКС они планомерно заменяют находящиеся в эксплуатации никель-водородные аккумуляторные батареи (рис. 2).

На МКС ЛИАБ успешно используются не только в централизованной СЭС, но и для автономного

питания различных бортовых приборов и установок (рис. 3), а также скафандров для выхода в открытый космос. В частности, в СЭС американского скафандра (Extravehicular Mobility Unit) входят три ЛИАБ различной энергоемкости (рис. 4).

В российских скафандрах «Орлан-МК» и «Орлан-МКС», создаваемых для применения на МКС, ЛИАБ до настоящего времени не использовались.

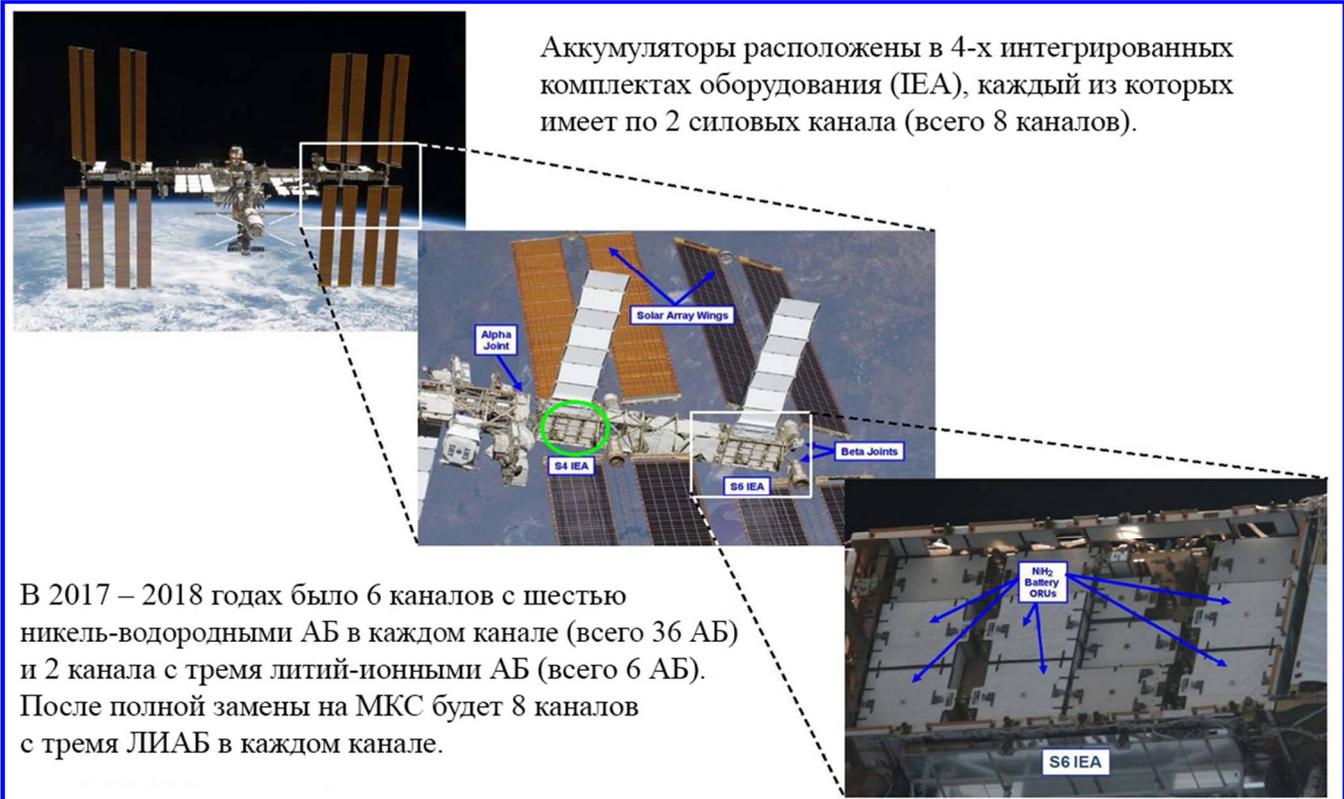


Рис. 2. Расположение и конфигурация аккумуляторной батареи на МКС [4]



Рис. 3. Роботизированный манипулятор с питанием от литий-ионной аккумуляторной батареи на МКС [5]

Безопасность работы ЛИАБ в системах электропитания автоматических и пилотируемых КА обеспечивается многоуровневой системой защиты:

1. На уровне бортовых систем КА:

- Аппаратной защитой АБ от токовых перегрузок и коротких замыканий.
- Поддержание безопасной для эксплуатации температуры АБ системой обеспечения температурного режима КА.
- Контролем и управлением режимами заряда и разряда, исключаящими ее перезаряд, глубокий разряд и перегрев.
- Мониторингом состояния АБ и оптимизацией режимов работы батареи по результатам оценки ее состояния.

2. На уровне АБ:

- Применением негорючих изоляционных материалов, работоспособных в условиях открытого космического пространства.
- Использованием электронных блоков контроля, управления и защиты.
- Применением байпасных переключателей для вывода из силовой цепи отказавших аккумуляторов.
- Нивелированием разбаланса напряжений аккумуляторов системными или аппаратными средствами.

3. На уровне аккумуляторных блоков:

- Применением схмотехнических решений, обеспечивающих устойчивость АБ к отказам аккумуляторов, электротехнических и электронных компонентов.
- Предварительным тестированием и отбором аккумуляторов, использованием оптимального алгоритма их комплектования в блоках.
- Запасом механической прочности конструкции аккумуляторного блока.
- Эффективным отводом выделяющегося в аккумуляторах тепла через конструкционные элементы АБ на посадочную поверхность КА.

4. На уровне единичного аккумулятора:

- Оптимизацией конструкции и материала сепаратора, а также электрохимической группы в целом для снижения вероятности возникновения и тяжести последствий внутренних коротких замыканий электродов при эксплуатации аккумуляторов [7].
- Выбором материалов электродов, сепаратора и электролита, обеспечивающих увеличение температуры начала теплового разгона, повышенную устойчивость к возгоранию, исключение выделения кислорода при их деструкции.
- Использованием встроенных одноразовых или самовосстанавливающихся устройств для ограничения или прерывания тока при токовых перегрузках и внешних коротких замыканиях.

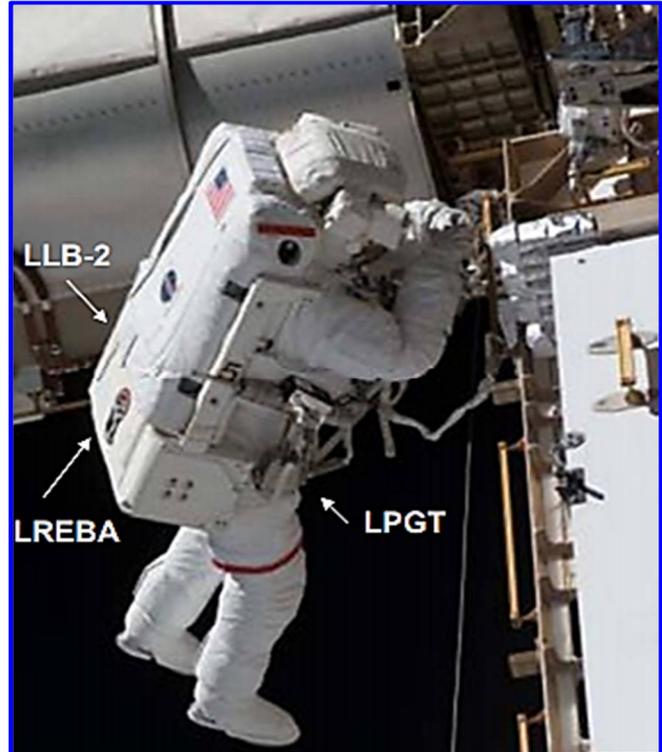


Рис. 4. Литий-ионные аккумуляторные батареи в системах электропитания скафандра: LLB-2 – 670 Вт·ч; LREBA – 400 Вт·ч; LPGT – 89 Вт·ч [6]



Рис. 5. Внешний вид космического аппарата, посадочного модуля и марсохода миссии Exomars 2020

- Наличием одноразовых размыкателей тока, срабатывающих при повышении внутреннего давления при перезаряде или перегреве ЛИА, и (или) газовых клапанов, ограничивающих его дальнейший рост и исключаящих возможность взрыва аккумулятора.

Современные межпланетные космические аппараты, посадочные модули и планетоходы оснащаются ЛИАБ, многие из которых рассчитаны на

эксплуатацию в экстремальных условиях. Например, ЕКА и фирма AIRBUS в рамках реализации программы Exomars 2020 разработала посадочный модуль и марсоход (рис. 5), АБ которого должна работать в широком температурном диапазоне на разных этапах жизненного цикла:

- 1) Хранение 450 дней при $+20^{\circ}\text{C}$.
- 2) Выдержка до запуска 280 дней при $+50^{\circ}\text{C}$.
- 3) Перелет Земля - Марс 280 дней – 140 циклов с 50% глубиной разряда (DOD) при $+40^{\circ}\text{C}$.
- 4) Эксплуатация на поверхности Марса 218 дней – 220 циклов 70% DOD при -20°C .

АБ создана фирмой SAFT на базе призматических ЛИАБ MP176065 XTD в конфигурации 7S8P (8 параллельных цепочек из 7-ми соединенных последовательно ЛИА) [8].

В рамках программы NASA для системы электроснабжения планетоходов Spirit и Opportunity, запущенных в 2003 году и успешно эксплуатируемых на Марсе, фирмой Yardner, сегодня входящей в компанию Eaglepicher Technologies, были разработаны и изготовлены две ЛИАБ LP30289 (рис. 6).

Эта батарея состоит из 2-х идентичных модулей с номинальным напряжением 28,8 В, емкостью 33 А·ч и разрядным током 12 А каждый. В АБ имеется блок электроники, осуществляющий контроль и управление ее зарядом и разрядом, а также балансировку напряжений единичных аккумуляторов.

Этой же фирмой по контракту с Boeing Aerospace для СЭС экспериментального орбитального самолёта Approach and Landing Test Vehicle X-37 (ALTV) (рис. 7) были разработаны и поставлены 6 батарей LP30950 (29 В/43 А·ч) и LP31510 (150 В/12 А·ч).

В настоящее время в СЭС всех новых околоземных КА также используются одна или несколько ЛИАБ. Хотя их работа протекает в достаточно комфортных токовых режимах и умеренных внеш-

них воздействиях, к ним предъявляются высочайшие требования по надежности, отказоустойчивости и сроку службы, который достигает 12 лет для низкоорбитальных применений и 18 и более лет для работы в составе геостационарных КА. При этом ЛИАБ низкоорбитальных КА должны обеспечить ресурс более 30 – 40 тыс. циклов заряда/разряда.

Двадцатилетний опыт эксплуатации ЛИАБ в космосе показал высокую эффективность и практическую безальтернативность их применения в СЭС всех типов автоматических и пилотируемых КА. Единственной реальной перспективой дальнейшего повышения энергетических и эксплуатационных параметров электрических накопителей для КА сегодня является совершенствование ЛИА и батарей на их основе, так как другие типы высокоэнергоемких аккумуляторов, в частности литий-серные аккумуляторы, пока не пригодны для практического использования [10, 11].



Рис. 6. Аккумуляторная батарея LP30289 для марсоходов Spirit и Opportunity



Рис. 7. Экспериментальный орбитальный самолёт X-37 [9]

Подходы к построению СЭС, выбору емкости единичного ЛИА и электрической схемы их соединения в батарею во многом определяются типом КА. В СЭС средних и больших КА, в частности, эксплуатируемых на геостационарных орбитах, требующих мощный электрический накопитель, с целью резервирования используется, как правило, две и более высоковольтных (до 100 В) АБ, построенных в S- или PS-конфигурации на базе ЛИА большой емкости (от 20 до 100 и более А·ч) (рис. 8).

Для обеспечения отказоустойчивости в таких АБ кроме аккумуляторного блока имеются электронные устройства выравнивания (эквалайзеры), блок управления, а также электромеханические

байпасные устройства, обеспечивающие вывод из силовой цепи батареи отказавших аккумуляторов (рис. 9). Такие АБ нельзя подключать параллельно без использования преобразователей напряжения (зарядно-разрядных устройств).

В СЭС околоземных низкоорбитальных КА обычно используются АБ с напряжением 30 В, которые на КА не резервируются. При этом их заряд и разряд осуществляется через общую шину бортовой сети.

ПАО «Сатурн» для низкоорбитальных КА разработаны две ЛИАБ (рис. 10). Батареи не имеют аппаратной защиты от отказов ЛИА, кроме встроенного трансформаторного блока выравнивания напряжения [12].

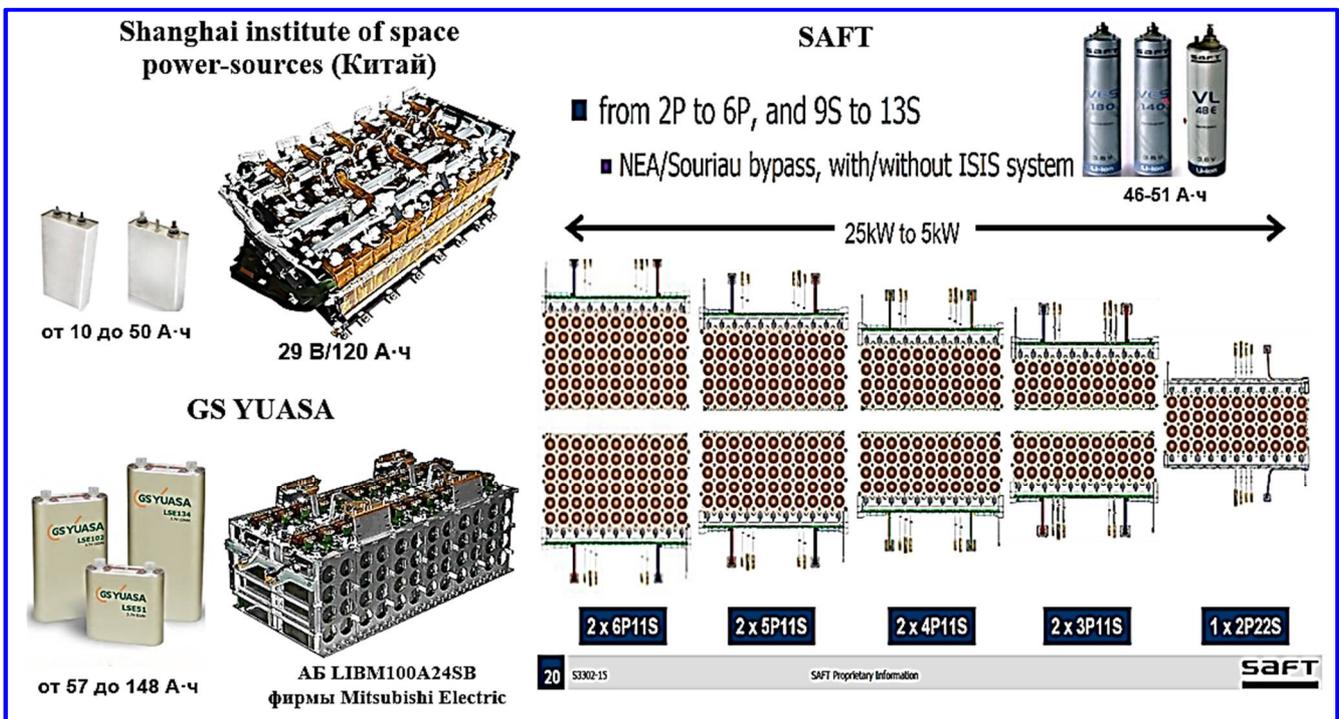


Рис. 8. Литий-ионные аккумуляторные батареи на базе аккумуляторов большой емкости

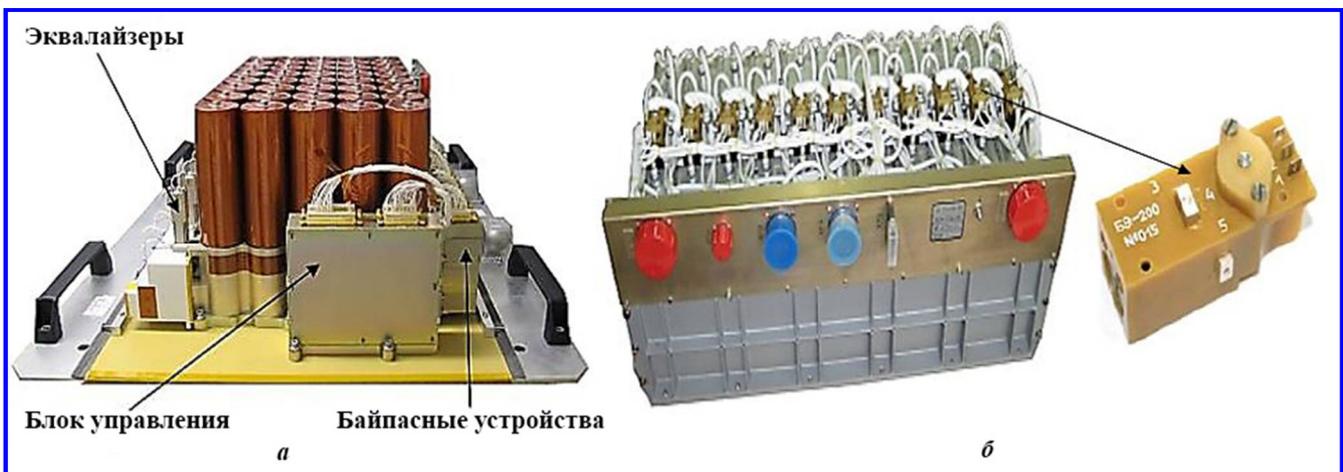


Рис. 9. Литий-ионные аккумуляторные батареи: а – фирмы SAFT (6P8SVES180) с электронными устройствами; б – ПАО «Сатурн» (22 × 2ЛИ-85) с байпасными переключателями БЭ-200

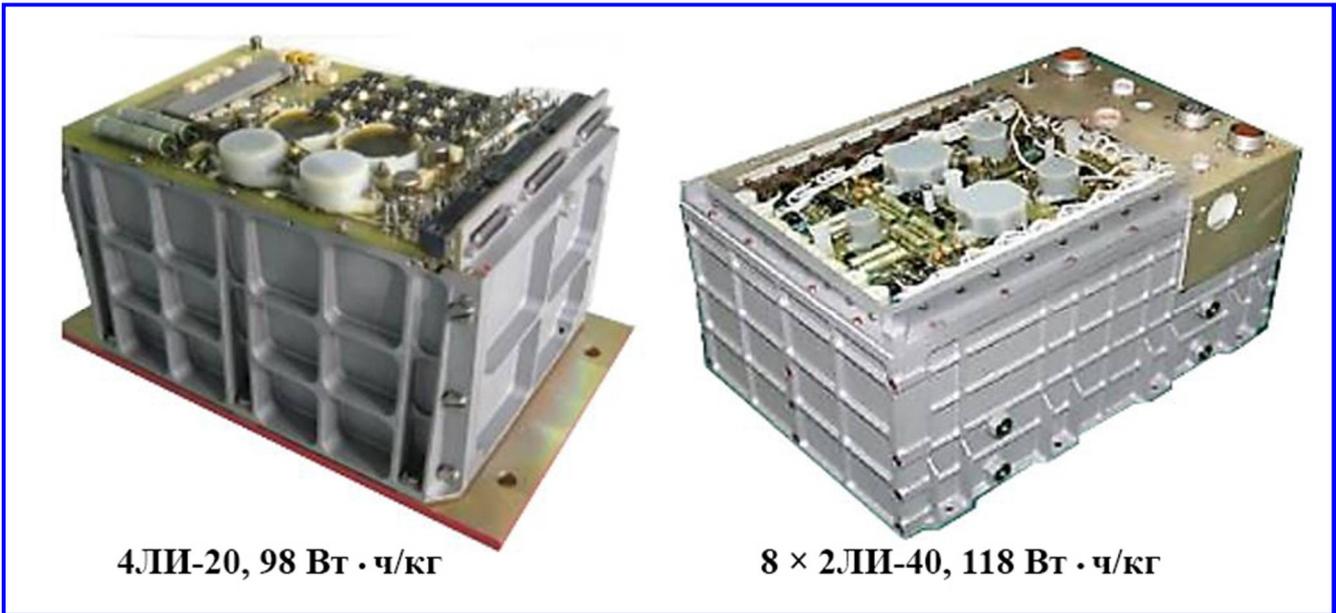


Рис. 10. Литий-ионные аккумуляторные батареи ПАО «Сатурн» для низкоорбитальных КА

Фирма SAFT предлагает широкий параметрический ряд построенных по последовательно-параллельной схеме (SP-конфигурация) АБ на базе ЛИА MP176065 (катод – кобальт лития) и VES16 (катод – смешанный оксид никеля-кобальта-алюминия) (рис. 11). В их состав входят электронные устройства, реализующие пассивный метод аппаратного выравнивания степени заряженности аккумуляторов [13].

В отличие от АБ ПАО «Сатурн» эти АБ автоматически парируют отказ любого ЛИА и лишь незначительно (на величину емкости единичного ЛИА) снижают свою емкость. Их защита от отказов единичных ЛИА основана на использовании встроенных в аккумуляторы одноразовых механических размыкателей CID (current interrupt device – устройство прерывания тока), разрывающих силовую цепь при повышении внутреннего давления из-за перезаряда, переплюсовки или перегрева ЛИА.



Рис. 11. Литий-ионные АБ фирмы SAFT

Один из первых поставщиков ЛИАБ для космической техники – фирма ABSL, в настоящее время входящая в группу компаний Enersys, предлагает АБ емкостью от 18 до 480 А·ч, построенные по блочно-модульному принципу. Для построения АБ используются базовые модули в SP-конфигурации, состоящие из параллельных цепочек из последовательно соединенных ЛИА. Для построения более энергоемких АБ соединяются параллельно несколько базовых модулей (рис. 12) [14].

Для АБ большой емкости могут использоваться аккумуляторные блоки из 2-х или 3-х аккумуляторных модулей, размещенных друг над другом (в 2 – 3 этажа). Теплоотвод с верхних этажей на основание батареи осуществляется через стенки корпуса батареи.

В батареях фирмы ABSL используются промышленные ЛИА US18650HC емкостью 1,5 А·ч, производимые фирмой Sony (Япония), а аппаратное выравнивание напряжений не предусматривается. Работоспособность в условиях открытого космического пространства созданных для наземных применений ЛИА типоразмера 18650 обеспечивается конструкцией батареи.

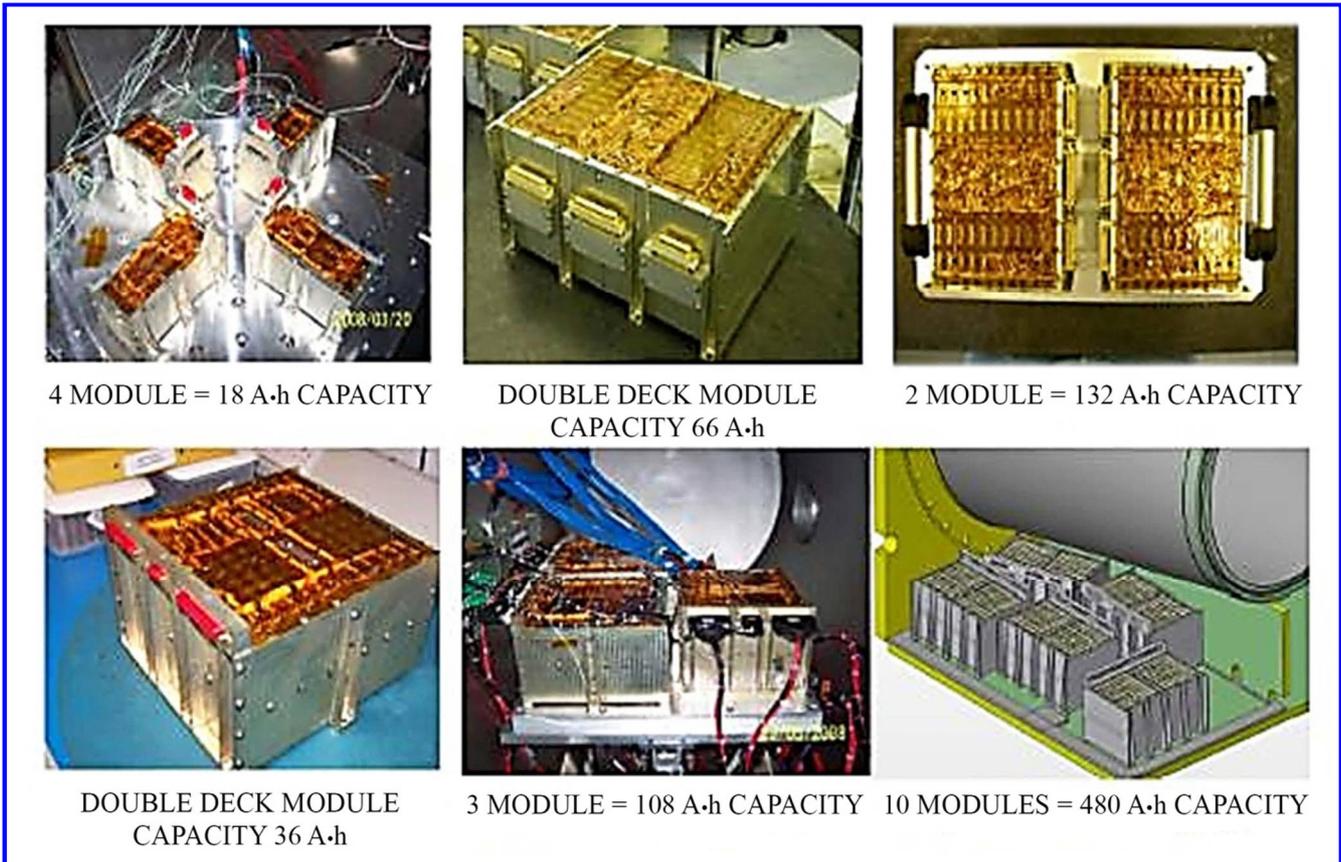


Рис. 12. Аккумуляторные модули фирмы ABSL

Несмотря на отсутствие в этих АБ электронных выравнивающих устройств, опыт их эксплуатации в СЭС различных КА, в том числе и созданных АО «Корпорация «ВНИИЭМ», подтверждает их работоспособность в течение 5 и более лет [15].

Разработки АО «Корпорация «ВНИИЭМ» также показали перспективность подхода к созданию высокоэнергоемких АБ с большим сроком службы при работе вне гермоотсека КА, заключающемся в использовании ЛИА габарита 18650 промышленного назначения в сочетании с оптимальными конфигурациями АБ [16]. Сегодня благодаря развитию литий-ионных технологий емкость таких аккумуляторов достигает 3 и более А·ч. На их базе можно создавать конкурентоспособные с лучшими зарубежными аналогами АБ с удельной энергоемкостью до 150 Вт·ч/кг со сроком службы более 5 лет (таблица).

Заключение

1. Двадцатилетний опыт эксплуатации ЛИАБ в космосе показал высокую эффективность и практическую безальтернативность их применения в СЭС всех типов автоматических и пилотируемых орбитальных и межпланетных

космических аппаратов, посадочных модулей и планетоходов.

2. Единственной реальной перспективой дальнейшего повышения энергетических и эксплуатационных параметров электрических накопителей для КА сегодня является совершенствование ЛИА и батарей на их основе, так как другие типы литиевых аккумуляторов пока не пригодны для практического использования.

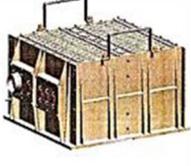
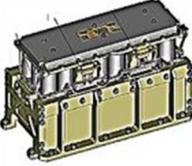
3. АО «Корпорация «ВНИИЭМ» на базе ЛИА типоразмера 18650 для КА разработаны батареи по своим технико-эксплуатационным параметрам конкурентоспособные с лучшими отечественными и зарубежными аналогами.

Литература

1. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений / А. И. Груздев // Инновации, № 3 (185). – ООО «Трансфер-Инновации», 2014. – С. 112 – 120.
2. Proba-1// eoPortal Directory [Сайт] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/proba-1> (дата обращения 01.07.2019).
3. Proba-1 sets new record. // ESA [Сайт] // http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Proba-1/Proba-1_sets_new_record (дата обращения 01.07.2019).

Таблица

Сравнение ЛИАБ АО «Корпорация «ВНИИЭМ» с ближайшими аналогами

Аккумуляторная батарея					
	8 × 2ЛИ-40	VNIIEM Li-ion Battery	8S6P VES16	30 В/40 А·ч	30 В/60 А·ч
Изготовитель	ПАО «Сатурн»	Фирма ABSL	Фирма SAFT	АО «Корпорация «ВНИИЭМ»	
Напряжение, В	24,0 – 32,0	24,0 – 33,6	25,0 – 32,8	24 – 32,4 (33,6)	24 – 32,4 (33,6)
Емкость, А·ч	75	86	27	42 (51)	65 (79)
Конфигурация	2P8S	8S60P	8S6P	16P8S	2S24P4S
Ip ном/макс, А	15/25	9/25	15/15	8/20	10/25
Масса, кг	23,3	25	8,7	8,4	12,6
Д × Ш × В, мм	385 × 257 × 195	382 × 325 × 180	340 × 162 × 166	290 × 195 × 150	380 × 170 × 156
Удельная энергия, Вт·ч /кг	118	98	84	142 (173)	148 (181)
Аппаратное выравнивание	Есть	Не требуется	Есть	Не требуется	Не требуется

4. Dalton P. I., Bowens E., North T., Balcer S. International Space Station Lithium Ion Battery Status. // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iss_liion_batt_status_ebowens_0.pdf (дата обращения 01.07.2019).

5. Dalton P. I., Bowens E., North T., Balcer S. International Space Station Lithium Ion Battery Start Up and Cycling. NASA Aerospace Battery Workshop. November 2017 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iss_liion_batt_start-up_cycling_ebowens.pdf (дата обращения 01.07.2019).

6. Russell S., Darcy E. Lessons Learned Maturing Thermal Runaway Tolerant Lithium Ion Battery Designs. NASA Aerospace Battery Workshop. November 2017 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/lessons_learn_mat_therm_run_tol_li-ion_batt_designs_srussell.pdf (дата обращения 25.07.2019).

7. Huang S., Du X., Cavalheiro G. M., Richter M., Iriyama T., Zhang G. Characterizing Lithium ion Battery Internal Short Circuit with Slow penetrating Micro Sensing Nails // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/char_liion_batt_int_shrt_cir_slow_pen_micro_nails_gzhang_0.pdf (дата обращения 25.07.2019).

8. C. Ma, Y. Borthomieu, C. Lepiller, J-P Peres. Saft's Experience in Space Exploration // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/saft_exp_space_explrtn_cma_0.pdf (дата обращения 25.07.2019).

9. Boeing_X-37 // Википедия. Свободная энциклопедия : [сайт]. – 2019. – URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_X-37 (дата обращения: 01.07.2019).

10. K. Bugga, J-P. Jones, C. Krause and el. Performance Assessment of Prototype Lithium Sulfur Cells from Oxis Energy // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/perf_assess_proto_li-s_cells_oxis_energy_kbugga.pdf (дата обращения 25.07.2019).

11. Y. Mikhaylik, I. Kovalev, C. Scordilis-Kelley and el. Sion Power. 650 Wh/kg, 1400 Wh/L Rechargeable Batteries for New Era of Electrified Mobility // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/650_wh_kg_1400_whl_recharg_batt_new_era_elect_mobility_ymikhaylik_1.pdf (дата обращения 25.07.2019).

12. Литий-ионные аккумуляторные батареи // ПАО «Сатурн»: [сайт]. – 2019. – URL : <http://saturn-kuban.ru/produktsiya/akkumulyatornye-batarei/litiy-ionnye-akkumulyatornye-batarei> (дата обращения: 01.07.2019).

13. Borthomieu Y. VES16 Cell and Battery Design / Y. Borthomieu, D. Reulier // Nasa Battery Workshop. – Huntsville, 2012. – S3094-12. // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ves16_cell_batt_design_yborthomieu.pdf (дата обращения: 01.07.2019).

14. Kevin Schrantz, Chris Pearson, Nick Russel. Experiences From the Early Evolution of the Lithium-ion Space Battery Sector. // 000074.A.Presentation Template Proprietary Information. ABSL Space Products. – 2008.

15. «КАНОПУС-В» и БКА – пять лет на орбите // АО «Корпорация «ВНИИЭМ»: [сайт]. – 2017. – URL : http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=812:lr-&catid=36:2008-03-09-13-50-48&Itemid=50 (дата обращения: 01.07.2019).

16. Системные подходы и тенденции создания аккумуляторных батарей для космических аппаратов

дистанционного зондирования Земли / А. И. Груздев, Г. А. Жемчугов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2017 год. Материалы пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – С. 220 – 224.

Поступила в редакцию 06.07.2019

Александр Иванович Груздев, кандидат физико-математических наук, главный конструктор, т. (495) 365-20-38, e-mail: a_gruzdev@mail.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

EXPERIENCE OF OPERATION AND PROSPECTS FOR USE OF LI-ION STORAGE BATTERIES IN ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

A. I. Gruzdev

The use of Li-ion storage batteries in rocket and space equipment is considered using specific examples. A 20-year experience of operation of Li-ion batteries in automatic and manned, near-Earth and interplanetary spacecraft, in the International Space Station, planetary rovers and other space applications demonstrates their high reliability, efficiency and safety. The safety of Li-ion batteries is ensured by a multi-level protection system implemented at the stage of design and manufacturing of single cells, battery packs, battery subsystems and power supply equipment of a spacecraft. The modern Li-ion batteries remain operable under extreme conditions of operation of interplanetary spacecraft, their landing modules and planetary rovers. The lifetime of Li-ion batteries on board near-Earth spacecraft is 15 and more years in GEO and more than 50 000 charge/discharge cycles in power supply systems of LEO spacecraft. An example of proprietary developments is used to demonstrate the possibility of creation of a wide parametric range of radiation-resistant batteries with high energy storage capacity (up to 150 W·h/kg) and enhanced single-failure tolerance on the basis of 18650 industrial Li-ion cells.

Key words: rocket and space equipment, spacecraft, International Space Station, power supply system, storage battery, Li-ion cell.

References

1. Innovative electrical accumulators based on lithium current sources for mobile and stationary applications / A. I. Gruzdev // Innovations, No. 3 (185). – JSC ‘Transfer-Innovations’, 2014. – Pp. 112 – 120.
2. Proba-1// eoPortal Directory [web-site] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/proba-1> (access date: 01.07.2019).
3. Proba-1 sets new record. // ESA [web-site] // http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Proba-1/Proba-1_sets_new_record (access date: 01.07.2019).
4. Dalton P. I., Bowens E., North T., Balcer S. International Space Station Lithium Ion Battery Status. // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iss_liion_batt_status_ebowens_0.pdf (access date: 01.07.2019).
5. Dalton P. I., Bowens E., North T., Balcer S. International Space Station Lithium Ion Battery Start Up and Cycling. NASA Aerospace Battery Workshop. November 2017 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iss_liion_batt_start-up_cycling_ebowens.pdf (access date: 01.07.2019).
6. Russell S., Darcy E. Lessons Learned Maturing Thermal Runaway Tolerant Lithium Ion Battery Designs. NASA Aerospace Battery Workshop. November 2017 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/lessons_learn_mat_therm_run_tol_li-ion_batt_designs_srussell.pdf (access date: 25.07.2019).
7. Huang S., Du X., Cavalheiro G. M., Richter M., Iriyama T., Zhang G. Characterizing Lithium Ion Battery Internal Short Circuit with Slow Penetrating Micro Sensing Nails // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/char_liion_batt_int_shrt_cir_slow_pen_micro_nails_gzhang_0.pdf (access date: 25.07.2019).
8. C. Ma, Y. Borthomieu, C. Lepiller, J-P Peres. Saft’s Experience in Space Exploration // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/saft_exp_space_explrtm_cma_0.pdf (access date: 25.07.2019).
9. Boeing X-37 // Wikipedia. Free Encyclopedia : [web-site]. – 2019. – URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_X-37 (access date: 01.07.2019).
10. K. Bugga, J-P. Jones, C. Krause and el. Performance Assessment of Prototype LithiumSulfur Cells from Oxis Energy // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/perf_assess_proto_li-s_cells_oxis_energy_kbugga.pdf (access date: 25.07.2019).

11. Y. Mikhaylik, I. Kovalev, C. Scordilis-Kelley and el. Sion Power. 650 Wh/kg, 1400 Wh/L Rechargeable Batteries for New Era of Electrified Mobility // NASA Aerospace Battery Workshop. November 2018 // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/650_whkg_1400_whl_recharg_batt_new_era_elect_mobility_ymikhaylik_1.pdf (access date: 25.07.2019).
12. Li-ion storage batteries // JSC 'Saturn': [web-site]. – 2019. – URL : <http://saturn-kuban.ru/produktsiya/akkumulyatornye-batarei/lityi-ionnye-akkumulyatornye-batarei> (access date: 01.07.2019).
13. Borthomieu Y. VES16 Cell and Battery Design / Y. Borthomieu, D. Reulier // Nasa Battery Workshop. – Huntsville, 2012. – S3094-12. // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ves16_cell_batt_design_yborthomieu.pdf (access date: 01.07.2019).
14. Kevin Schrantz, Chris Pearson, Nick Russel. Experiences From the Early Evolution of the Lithium-ion Space Battery Sector. // 000074.A.Presentation Template Proprietary Information. ABSL Space Products. – 2008.
15. Canopus-V and BKA: 5 years in orbit // 'VNIIEM Corporation' JC : [web-site]. – 2017. – URL : http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=812:l-r-&catid=36:2008-03-09-13-50-48&Itemid=50 (access date: 01.07.2019).
16. System approaches and trends in development of storage batteries for Earth remote sensing satellites / A. I. Gruzdev, G. A. Zhemchugov // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. Appendix of 2017. Proceedings of Vth International Scientific Conference 'Critical Issues in Designing of Earth Remote Sensing Systems'. – M. : 'VNIIEM Corporation' JC. – Pp. 220 – 224.

*Aleksandr Ivanovich Gruzdev, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Chief Designer,
tel.: +7 (495) 365-20-38, e-mail: a_gruzdev@mail.ru.
(JC «VNIIEM Corporation»).*