

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЁМКОСТЬЮ ДЛЯ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

А.И. Груздев

*Рассмотрены основные типы аккумуляторных батарей (АБ), используемых в электроприводных летательных аппаратах и космической технике. Показаны преимущества, состояние разработок и перспективы использования аккумуляторов с литиевым анодом. Рассмотрены проблемы создания литий-серных аккумуляторов и батарей на их основе, сдерживающие их коммерческое применение. Показано, что прогресс в области создания перезаряжаемых источников тока сегодня связан с развитием технологий литий-ионных аккумуляторов. Предложена концепция построения АБ с повышенной удельной энергоёмкостью на их основе. Показаны преимущества построения таких батарей на базе аккумуляторов типоразмера 18650. На конкретных примерах рассмотрены системные, конструктивные и схемотехнические решения, обеспечивающие создание аккумуляторных батарей с удельной энергоёмкостью более 200 Вт·ч/кг и 500 Вт·ч/л.*

**Ключевые слова:** аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, литий-серные аккумуляторы, система контроля и управления, космический аппарат.

Современные тенденции развития авиационно-космической техники связаны с ростом её энерговооружённости, что ставит в качестве одной из приоритетных задач увеличение удельных энергетических характеристик аккумуляторных батарей (АБ), масса которых может составлять до 50 % от массы всей системы электроснабжения. В статье рассмотрены состояние работ по разработке и совершенствованию литиевых аккумуляторов, а также системные подходы, конструктивные и схемотехнические решения, позволяющие создавать на их основе высокоэнергоёмкие АБ.

Для околоземных космических аппаратов (КА) сегодня нужны АБ с удельной энергоёмкостью более 150 Вт·ч/кг при сроке службы на орбите 5 и более лет. Они наиболее востребованы разработчиками малых космических аппаратов, получивших в последнее десятилетие преимущественное развитие по сравнению с крупногабаритными и тяжёлыми КА [1].

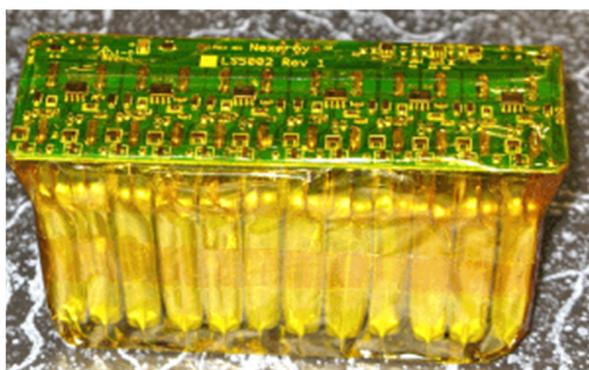
Отсутствие АБ с удельной энергоёмкостью 200 и более Вт·ч/кг (500 и более Вт·ч/л) сдерживает создание различного типа электроприводных летательных аппаратов.

На первом этапе развития ракетно-космической техники использовали серебряно-цинковые АБ. Однако из-за низкого ресурса при циклической работе они были практически полностью вытеснены никель-кадмиевыми АБ, которые, несмотря на относительно низкую удельную энергию (до 30 Вт·ч/кг), до настоящего времени находят достаточно широкое применение в системах электроснабжения различных автоматических и пилотируемых КА, авиационной и наземной технике.

Существенно более высокую энергоёмкость (60 – 80 Вт·ч/кг) и большой ресурс при циклической работе имеют никель-водородные аккумуляторы, разработанные в Советском Союзе в Научно-исследовательском аккумуляторном институте в 1964 г. Из-за большого саморазряда (до 30% в сутки), сложности эксплуатации и высокой цены никель-водородные АБ нашли применение только для электроснабжения необитаемых КА (впервые в 1977 г. в США, и в 1979 г. – в Советском Союзе) [2].

**Основные типы и характеристики литиевых аккумуляторов [3]**

Характеристика	Li-ion	Li-S	Li-O <sub>2</sub>
Предельное зарядное напряжение, В	3,6 – 4,2	2,53	3,1
Номинальное напряжение, В	3,2 – 3,7	2,1	2,6 – 2,75
Теоретическая удельная энергия, Вт·ч/кг	500 – 600	2600	5580 (Li <sub>2</sub> O) 3630 (Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
Достигнутая удельная энергия, Вт·ч/кг	180– 250	250 – 350	400 – 500 (?)
Плотность энергии, Вт·ч/литр	400 – 620	350 – 500	(?)
Циклируемость (100% разряд)	500 – 1000	30 – 500(?)	10 – 20
Внутренний механизм защиты от перезаряда	нет	да	нет



Benefit to UAVs of High Energy Lithium Sulfur Batteries  
25.2V, 6.6Ah Pack (167 Wh) Pack

	Li Ion	Li-S
Configuration	7S3P	12S3P
Cell Capacity	2.2 Ah	2.2 Ah
Pack Weight (gms)	1075	640
Wh/Kg (pack level)	155	260

Рис. 1. Внешний вид и параметры Li-S батарей [5]

Дальнейший прогресс в создании перезаряжаемых источников тока связан с разработкой аккумуляторов с литиевым анодом, которые в настоящее время имеют наиболее высокую удельную энергоёмкость, как теоретическую, так и достигнутую на практике. Их основные типы и характеристики приведены в таблице.

В литий-кислородных аккумуляторах ( $\text{Li-O}_2$ ), также часто называемых литий-воздушными аккумуляторами, электрохимически активным веществом является кислород из воздуха. Они обладают большей удельной энергоёмкостью благодаря более лёгкому катоду и тому факту, что кислород доступен в окружающей среде и его не нужно хранить в аккумуляторе. Низкий ресурс при циклировании, а также множество пока не решённых вопросов не только инженерного и технологического, но и научного характера, пока сдерживает создание аккумулятора, готового к выходу на рынок [4].

Первый патент на литий-серный аккумулятор был получен в 1962 г. (US 3,043,896). Однако прототип литий-серного аккумулятора ёмкостью около 2 А·ч, имеющий удельную энергию порядка 350 Вт·ч/кг и допускающий 300 циклов заряда/разряда, был продемонстрирован корпорацией SION Power Corp. только в 2005 г. Практически с этого момента вся техническая информация (в том числе и научного плана) о разработках в этой фирме была засекречена. Демонстрационная батарея, созданная SION Power Corp, успешно прошла натурные испытания на беспилотном летательном аппарате «Zephyr», однако её удельные энергетические параметры существенно ниже (260 Вт·ч/кг), чем у прототипов единичных аккумуляторов (рис. 1), и на порядок отстают от теоретических значений для этой электрохимической системы.

В соответствии с опубликованным в январе 2012 г. пресс-релизом, компания и фирма «BASF» подписала соглашение, по которому BASF инвестирует в Sion Power Corp. 50 млн. долларов на создание промышленного производства литий-серных батарей, появление которых на рынке планировалось в 2014 г.

Вывести на рынок литий-серные батареи в 2013 – 2014 гг. планировала также фирма «Oxis Energy». Их аккумуляторы имеют аналогичную конструкцию, ёмкость от 0,5 до 2 А·ч и удельную энергию 200 – 350 Вт·ч/кг. В качестве недостатка аккумуляторов разработчики отмечают высокую скорость саморазряда – более 15 % за первый месяц хранения, а также относительно низкий ресурс при циклировании (не более 300 циклов) [6].

Несмотря на повышенный интерес потенциальных потребителей к Li-S аккумуляторам сегодня их серийное производство ожидается не ранее 2018 – 2020 гг. [7]. Поэтому источники электропитания с высокой удельной энергоёмкостью сегодня можно создавать только на базе литий-ионных аккумуляторов. Начало использования литий-ионных АБ в системах электроснабжения КА было положено в 2004 г. фирмой «SAFT» [8]. Первая в России литий-ионная АБ, изготовленная ОАО «Сатурн», была установлена на борту КА «Глонасс-М» № 27, запущенном в декабре 2008 г. [9].

Очевидно, что для создания высокоэнергетических АБ необходимо использовать аккумуляторы с максимально возможной удельной энергоёмкостью. Сегодня наиболее высокие удельные энергетические характеристики имеют литий-полимерные аккумуляторы фирмы «Kocam» (до 200 Вт·ч/кг) [10] и цилиндрические малогабаритные аккумуляторы типоразмера 18650 японской фирмы «Panasonic» (более 250 Вт·ч/кг, 700 Вт·ч/л) [11] (рис. 2).

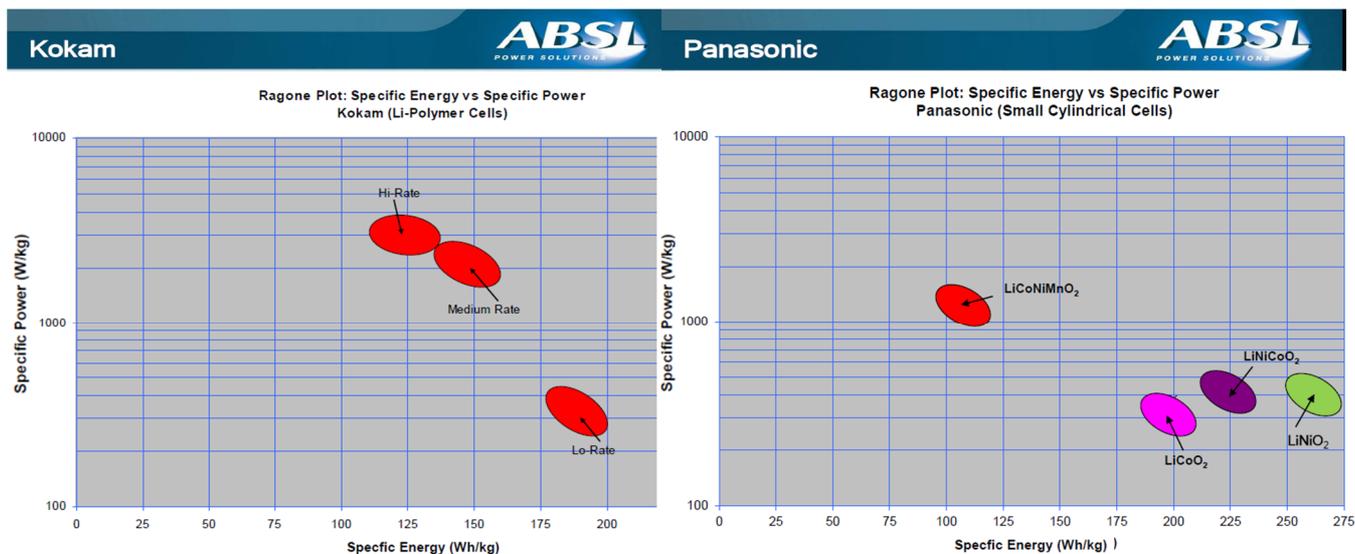


Рис. 2. Удельные параметры аккумуляторов фирмы «Kokam» и «Panasonic» (по данным фирмы «ABSL Power Solutions», 2010 г.)

Наиболее перспективные направления работ по увеличению удельных энергетических параметров литий-ионных аккумуляторов связаны с разработкой Si-компазитных анодов и созданием новых электродных материалов и электролитов с повышенными рабочими напряжениями (>4,5 В).

Одним из важнейших требований при проектировании высокоэнергетических АБ является обеспечение полного одновременного заряда и разряда всех входящих в него аккумуляторов [12]. Это достигается за счёт:

- подбора аккумуляторов по параметрам (ёмкость, внутреннее сопротивление, саморазряд) при комплектовании батареи;
- построения АБ по параллельно-последовательной схеме, и обеспечения идентичности характеристик аккумуляторных сборок за счёт действия статистических факторов при соединении параллельно большого (десятки штук) количества аккумуляторов;
- нивелирования разбаланса напряжений в батарее системными методами или с помощью блока контроля и управления.

Необходимо отметить, что экспериментально показано: при хорошо подобранных (идентичных по параметрам) аккумуляторах разбаланс напряжений не возникает и в батареях, не имеющих электронные блоки выравнивания, даже при многолетнем циклировании (рис. 3). Как показано на рисунке, через 87 месяцев за 67 тысяч циклов заряда/разряда разбаланс в батарее из восьми аккумуляторов составил менее 40 мВ.

В общем случае литий-ионные АБ нового поколения представляют собой сложное электротехническое устройство, в состав которого наряду с объединёнными в аккумуляторные блоки аккумуляторными блоками входят: система контроля и управления (СКУ) с функцией выравнивания напряжений, блоки силовой электроники и электротехническая аппаратура токовой защиты. Кроме того, в состав АБ может входить система воздушного или жидкостного термомониторинга, зарядное или зарядно-разрядное устройство, обеспечивающие [13]:

- гарантированное накопление, хранение и получение электрической энергии требуемого потребителем качества по величине и виду напряжения и тока;
- защиту аккумуляторов от возникновения опасных режимов работы при нештатной эксплуатации, хранения и транспортировке;
- прогнозирование возникновения и парирование единичных отказов основных элементов и узлов устройства при эксплуатации;
- предоставление пользователю объективной информации об остаточном заряде, остаточном ресурсе и других текущих и прогнозируемых параметрах АБ.

Однако при создании сверхвысокоэнергетических АБ необходимо максимально сохранить удельные энергетические характеристики единичных аккумуляторов при компоновке батареи на их основе. Для этого необходимо:

- уменьшить массу конструктивных элементов, обеспечив при этом требуемую механическую прочность АБ;

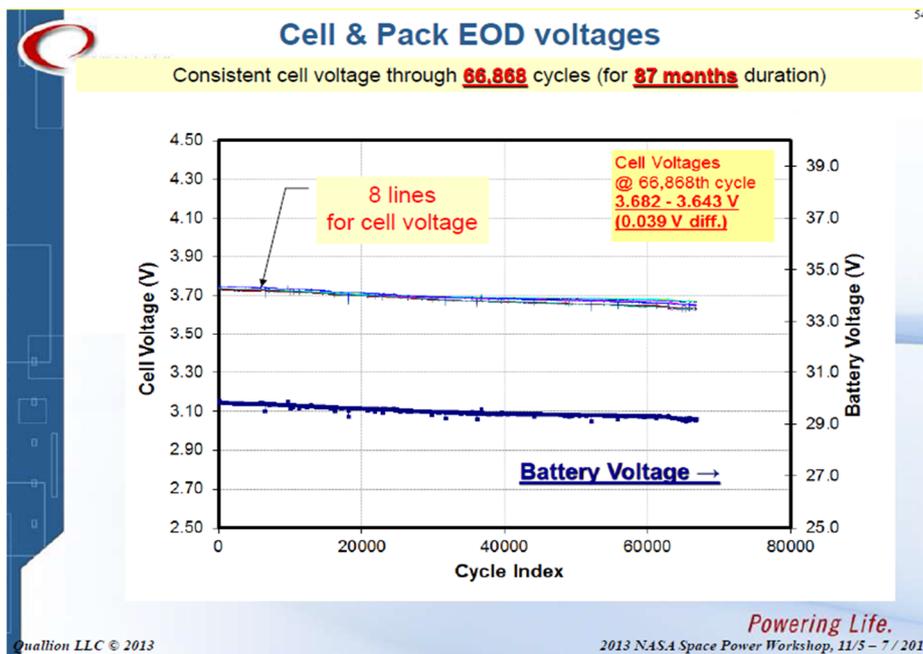


Рис. 3. Разбаланс напряжений аккумуляторов в батарее без блока нивелирования напряжений при длительном циклировании



Рис. 4. Литий-ионная батарея на основе аккумуляторов габарита 18650 в конфигурации 58P6S (208 Вт·ч/кг) [14]

– минимизировать массу СКУ и электротехнических блоков, сохранив в то же время её функциональные возможности и удобство эксплуатации.

Для уменьшения массы конструктивных элементов при проектировании АБ может использоваться «бескорпусное» исполнение и естественное

конвекционное охлаждение устройства. На рис. 4 представлена высокоэнергетичная литий-ионная АБ, разрабатывавшаяся для замены первичного литиевого источника тока во внутритрубных дефектоскопах нефтепроводов.

Батарея с номинальным напряжением 22 В и ёмкостью 197 А·ч рассчитана на относительно небольшие токи разряда (до 3 А) и токи заряда (до 10 А). Она имеет встроенный микропроцессорный блок контроля и управления, обеспечивающий:

- поэлементный контроль и выравнивание напряжения аккумуляторов;
- контроль температуры с помощью трёх датчиков;
- защиту АБ от перезаряда, переразряда, перегрева, а также от токовых перегрузок на уровне 150 % от максимально допустимых значений токов в выходных цепях АБ для подключения нагрузки и зарядного устройства;
- расчёт остаточного заряда и текущей номинальной ёмкости АБ;
- формирование предупредительных сигналов «Отключение нагрузки», «Отключение ЗУ»;
- вывод информации о состоянии и режимах работы АБ на внешнее устройство по интерфейсу RS-485.

Для минимизации массы и объёма электротехнических блоков может быть целесообразен отказ от включения в состав АБ:

- разрядного устройства для обеспечения требуемого диапазона рабочих напряжений;
- блоков, оптимизирующих заряд аккумуляторов;
- аппаратуры защиты от токовых перегрузок, обеспечивая её путём применения входящих в устройство системы контроля и управления и контактора, а также в качестве второго уровня защиты от токов короткого замыкания перегорающих токопроводов в аккумуляторных сборках;
- исключение из состава АБ блоков контроля и выравнивания напряжения, передавая их функции зарядному устройству и (или) питаемой аппаратуре.

В качестве примера реализации описанной выше концепции создания высокоэнергетических АБ на рис. 5 представлен носимый источник бесперебойного электропитания имплантируемого электромеханического сердца 1.



Рис. 5. Источник бесперебойного электропитания искусственного сердца

В состав источника входят три основных АБ 2 из 12-ти аккумуляторов типоразмера 18650 ёмкостью 3,4 А·ч в конфигурации 3P4S. Одна из этих батарей подключена к блоку управления искусственного сердца 3 и обеспечивает его электропитание совместно с резервной аккумуляторной батареей 4, выполненной из аналогичных аккумуляторов в конфигурации 1P4S. Две другие основные АБ 2 в это время заряжаются с помощью стационарного двухканального зарядного устройства 5.

Контроль за состоянием и нивелирование разбаланса напряжений аккумуляторов, индикацию степени заряженности основных АБ при заряде обеспечивает зарядное устройство 5. Контроль напряжения и светодиодную индикацию степени заряженности основной АБ при разряде осуществляет микропроцессорный блок контроля и управления, конструктивно размещённый в корпусе носимой резервной АБ 4, которая обеспечивает электропитание блока управления искусственного

сердца 3 при замене разрядившейся основной АБ 2 на одну из заряженных.

Таким образом по сравнению с батареями, разработанными ранее на литий-ионных аккумуляторах ёмкостью 10 А·ч [15], удалось повысить энергоёмкость основных АБ в представленном на рис. 5 корпусном исполнении 2 в 1,5 раза со 111 до 170 Вт·ч/кг. При этом в бескорпусном исполнении 6 их энергоёмкость может быть увеличена в 2 раза до 230 Вт·ч/кг и 560 Вт·ч/л.

### Заключение

1. В последнее десятилетие прогресс в области перезаряжаемых источников тока связан с развитием технологий литий-ионных аккумуляторов, для которых на серийных изделиях достигнуты значения удельной энергоёмкости, превышающие 250 Вт·ч/кг и 650 Вт·ч/л.

2. Ожидавшаяся в 2014 – 2015 гг. коммерциализация более энергоёмких (300 и более Вт·ч/кг) литий-серных аккумуляторов не состоялась и их серийное производство планируется уже не раньше 2018 г.

3. Создание высокоэнергетических перезаряжаемых источников тока для авиационно-космических применений сегодня может быть ориентировано только на использование литий-ионных аккумуляторов. На их основе в АО «Корпорация ВНИИЭМ» разработаны и успешно прошли испытания батареи с удельной энергоёмкостью 170 – 230 Вт·ч/кг.

### Литература

1. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Ходненко В. П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 114. – № 4. – С. 15 – 26.
2. Груздев А. И. Состояние и перспективы развития производства высокотехнологичных автономных источников электрической энергии в России // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6. – № 1. – С. 3 – 29.
3. Колосницын В. С., Карасева Е. В. Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XI Междунар. конф. / под ред. М.С. Плешакова. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 346 – 349.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.joule-watt.com/energy-news/razrabotaneshe-odin-perspektivnyj-litij-vozdushnyj-akkumulyator/>.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sionpower.com>.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oxisenergy.com>.
7. Колосницын В. С., Карасева Е. В., Кузьмина Е. В. Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XIII

Междунар. конф. / под. ред А. П. Курбатова. – Алматы: Казак университети, 2014. – С. 242 – 245.

8. VcKissock B. I. and el. / Progress of ongoing NASA Lithium-Ion cell Verification testing for aerospace applications. NASA/TM-2008-215154, May 2008.

9. Галкин В. В., Лихонос С. Д., Кулыга В. П. и др. Литий-ионные аккумуляторы космического назначения (проблемы, основные направления работ и полученные результаты). Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XI Междунар. конф. / под. ред М. С. Плешакова. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 278 – 281.

10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kokam.com>.

11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://industrial.panasonic.com>.

12. Ганзбург М. Ф., Груздев А. И. Трофименко В. И. Особенности построения аппаратуры контроля и защи-

ты высоковольтных литий-ионных аккумуляторных батарей для систем электроснабжения космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 123. – № 4. – С. 29 – 34.

13. Груздев А. И., Куликов Н. И., Макаренко А. В., Соколин А. Е. Специализированные источники питания на базе литий-ионных аккумуляторных батарей // Вестник Московского авиационного института. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 152 – 157.

14. Груздев А. И. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений // Инновации. – 2014. – № 3 (185). – С. 12 – 20.

15. Груздев А. И., Куликов Н. И. Источники бесперебойного электропитания для электромеханической системы вспомогательного кровообращения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 41 – 47.

Поступила в редакцию 16. 07. 2015

*Александр Иванович Груздев,*  
канд. физ.-мат. наук, главный конструктор НПП,  
т. (495) 366-20-38, e-mail: [a\\_gruzdev@mail.ru](mailto:a_gruzdev@mail.ru).  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## CONCEPTUAL APPROACH to DEVELOPING of ACCUMULATOR BATTERIES with IMPROVED STORAGE DENSITY for AIRSPACE APPLICATIONS

**A.I. Gruzdev**

*Main types of accumulator batteries (AB) designed for electrically powered aircraft and for space technology are considered in the article. Advantages, state of development and application perspectives of batteries with lithium anodes are demonstrated. Also disadvantages of lithium pyrite batteries and batteries designed on their basis, preventing their commercial use, are considered. It is explained in the article how improvement of rechargeable current power supplies depends on progress of lithium ion battery technologies. ASB concept with improved storage density designed on their basis is offered for consideration. Advantages of such batteries designed on the basis of standard 18650 size accumulator batteries are highlighted. Examples of system and design solutions enabling developing of accumulator batteries with storage density more than 200 watt-hour/kg and 500 watt-hour/kg are considered.*

**Key words:** accumulator battery, lithium ion batteries, lithium pyrite batteries, monitoring and control system, Spacecraft.

### List of References

1. Makridenko L. A., Volkov S. N., Khodnenko V. P. Concepts for Developing and Application of Small Spacecraft// Matters of Elektromechanics. VNIEM Works. – 2010. – Vol. 114. – No. 4. – Pp. 15 – 26.
2. Gruzdev A. I. Current State and Development Trends of High-Technology Autonomous Electric Power Sources in Russia // Electrochemical Energetics [Elektrokhimicheskaya Energetika] Jour. – 2006. – Vol. 6. – No. 1. – Pp. 3 – 29.
3. Kolosnitsyn V. S., Karasyova E. V. Basic Issues of Energy Conversion in Lithium Electrochemical Systems : Proceedings of the XI. International Conference / Under the Editorship of M. S. Pleshakov. – Novocherkassk : URGTU (NPI) [South-Russian State Polytechnic University (NPI) Named after M. I. Platov], 2010. – Pp. 346 – 349.
4. [Digital Resource] – Available at: <http://www.joule-watt.com/energy-news/razrabotaneshe-odin-per-spektivnyj-litij-vozdushnyj-akkumulyator/>.
5. [Digital Resource]. – Available at: <http://sionpower.com>.
6. [Digital Resource]. – Available at: <http://www.oxisenergy.com>.
7. Kolosnitsyn V. S., Karasyova E. V., Kuzmina E. V. Basic Issues of Energy Conversion in Lithium Electrochemical Systems: Proceedings of the XIII. International Conference / Under the Editorship of A. P. Kurbatov. – Almaty : Kazak Universiteti, 2014. – Pp. 242 – 245.
8. VcKissock B. I. and el. / Progress of Ongoing NASA Lithium-Ion Cell Verification Testing for Aerospace Applications. NASA/TM – 2008-215154, May 2008.

9. Galkin V. V., Likhonosov S. D., Kulyga V. P. et al. Space-Related Lithium Ion Batteries (Issues, Basic Development Trends and Obtained Results). Basic Issues of Energy Conversion in Lithium Electrochemical Systems: Proceedings of the XI. International Conference / Under the Editorship of M. S. Pleshakov. – Novocherkassk: URGTU (NPI) [South-Russian State Polytechnic University (NPI) Named After M. I. Platov], 2010. – Pp. 278 – 281.
10. [Digital Resource]. – Available at: <http://kokam.com>.
11. [Digital Resource]. – Available at: <http://industrial.panasonic.com>.
12. Ganzburg M. F., Gruzdev A. I., Trofimenko V. I. Special Aspects of Developing, Monitoring and Protection Equipment for High Voltage Lithium Ion Accumulator Batteries Designed for Spacecraft Power Supply Systems // Matters of Elektromechanics. VNIIEM Works. – 2011. – Vol. 123. – No. 4. – Pp. 29 – 34.
13. Gruzdev A. I., Kulikov N. I., Makarenko A. V., Sorokin A. E. Spatial Purpose Power Supplies Designed on the Basis of Lithium Ion Accumulator Batteries // Bulletin of Moscow Aviation Institute. – 2012. – Vol. 19. – No. 5. – Pp. 152 – 157.
14. Gruzdev A. I. Innovative Electrical Accumulators Designed on the Basis of Lithium Current Supply Sources for Mobile and Stationary Applications // Innovatsii [Innovations]. – 2014 – No. 3(185). – Pp. 12 – 20.
15. Gruzdev A. I., Kulikov N. I. Uninterruptible Power Supplies for Electromechanical Circulatory Support Systems// Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [Mechatronics, Automation, Control] Jour. – 2007. – No. 8. – Pp. 41 – 47.

*Alexandr Ivanovich Gruzdev,*  
*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,*  
*Design Manager of the SPC.*  
*Tel.: (495) 366-20-38. E-mail: a\_gruzdev@mail.ru.*  
*(JC 'VNIIEM Corporation').*