

ЛАМИНИРОВАННЫЕ ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ С ВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Ребров С.Г.^{1*}, Янчур С.В.^{1**}, Фаустов А.В.^{1***}, Филин С.В.^{2****}

¹ Исследовательский центр имени М.В. Келдыша,
ул. Онежская, 8, Москва, 125438, Россия

² Научно-исследовательский институт прикладной акустики,
ул. 9 Мая, 7А, Дубна, Московская область, 141981, Россия

* e-mail: rebrov_sergey@mail.ru

** e-mail: y3862@mail.ru

*** e-mail: artefausto@yandex.ru

**** e-mail: svfilin@yandex.ru

В процессе проведенных исследований найден электродный состав, использование которого при изготовлении ламинированных литий-ионных аккумуляторов с номинальной емкостью в диапазоне 1.6–15.3 А·ч позволяет достичь значений удельной и объемной энергий на уровне 230–268.1 Вт·ч/кг и 520–560 Вт·ч/л соответственно на рассчитанном циклическом ресурсом при 100%-ной глубине разряда токами 0.2 С более 1000 циклов.

Ключевые слова: ламинированный литий-ионный аккумулятор, литированный оксид никель-кобальт-алюминия, высокая удельная энергия, циклируемость, разрядная емкость.

Введение

Современный уровень развития авиационно-космической техники имеет тенденцию к росту ее энерговооруженности, в результате чего задача улучшения удельных энергетических характеристик аккумуляторных батарей является одной из главных [1–4].

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) относятся к самым популярным среди перезаряжаемых химических источников тока для космических применений по причине ряда выдающихся эксплуатационных характеристик, в том числе высоких удельных и объемных характеристик [5–9]. Первой компанией-изготовителем батарей на основе ЛИА (далее— ЛИАБ) для космического применения была английская фирма ABSL [10]. Можно выделить несколько крупных производителей ЛИАБ космического производства — это фирмы-SAFT [11], QUALLION [12], GS YUASA [13].

Максимальные удельные значения энергии для литий-ионных аккумуляторов были получены в ламинированном корпусе [14], представляющем собой многослойную структуру с алюминиевой фольгой, что обеспечивает минимальную массу корпуса в сравнении с другими типами корпусов.

Опыт успешного функционирования ламинированных аккумуляторов в условиях космоса уже имелся [15–17].

ГНЦ «Центр Келдыша» проводит разработку ЛИАБ космического назначения с улучшенными эксплуатационными и удельными характеристиками. Например, авторами из Центра Келдыша уже разрабатывались и прошли наземную экспериментальную отработку ЛИАБ для использования в условиях открытого космоса [18–21].

Целью проводимых исследований является создание ламинированного литий-ионного аккумулятора с высокими удельными характеристиками, большим календарным и циклическим ресурсами и возможностью функционирования в условиях открытого космоса. Задачей на данном этапе исследовательской работы является поиск катодного и анодного составов, позволяющих достичь максимальных удельной и объемной энергий, а также исследование электрических характеристик таких аккумуляторов в нормальных климатических условиях.

Исследования проводились в ходе совместных работ ГНЦ «Центр Келдыша» и НИИ прикладной акустики.

Экспериментальная часть

В качестве активных катодных материалов использовались две марки литированного оксида никель-марганец-кобальта (НМК) и три марки литированного оксида никель-кобальт-алюминия (НКА). Катодный материал и сажа марки SuperP (СП) замешивались в растворе поливинилденфторида в N-метилпирролидоне (ПВДФ) в вакуумном миксере в течение нескольких часов. Нанесение электродного материала на алюминиевую фольгу толщиной 15 мкм производилось на автоматическом аппликаторе Zehntner ZAA 2300. Сушку электродного материала выполняли с помощью галогенового прожектора. После сушки производилась прокатка электродного листа при комнатной температуре с помощью прокаточного пресса MSK-HRP-03, затем — нарезка листа на электроды с помощью лазерной резки. Готовые электроды сушились в вакуумной печи при температуре 120 °С в течение 8 ч.

В качестве активных анодных материалов использовались шесть различных марок графита. Активный анодный материал и сажа замешивались в водном растворе Na-СМС (КМЦ) и стирол-бутадиенового латекса (СБЛ) в вакуумном миксере. Нанесение электродного материала на медную фольгу толщиной 9 мкм, сушка, прокатка, резка и повторная сушка проводились аналогично приготовлению катодного электрода.

Сборка электродов выполнялась вручную. Электроды при сборке «змейкой» перекладывались лентой сепаратора. Наружные токовыводы к аккумуляторным сборкам приваривались с помощью ультразвуковой сварки. Собранный пакет электродов помещался в трехслойную ламинированную упаковку (полиамид-алюминий-полипропилен), где запаивался с двух сторон. Параметры запайки определялись экспериментальным путем. Затем производилась вакуумная сушка при температуре 120 °С в течение 2 ч, после чего элемент помещался в перчаточный бокс (с концентрацией воды и кислорода в среде менее 1 ppm), где происходили его заливка электролитом (1 М раствор гексафторфосфата лития в смеси этиленкарбонат/диметилкарбонат/диэтилкарбонат + 5% винилкарбонат, содержание воды менее 20 ppm) и вакуумное запаивание элемента с третьей стороны.

Для проведения поиска оптимального состава электродных материалов выполнялась сборка аккумуляторов LB286 (с активной поверхностью электродов 55мм×55мм) и LB312 (57мм×57мм); в сборке находилось шесть пар двухслойных и одна пара однослойных электродов. На первом этапе исследованных

подбирался катодный состав, критерием отбора для которого были: максимальные удельная и погонная емкости, высокий циклический ресурс. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют утверждать, что за циклическую деградацию литий-ионного аккумулятора в максимальной степени ответственен активный катодный материал, а поскольку НКА и НМК обладают линейным характером деградации емкости, то оценку падения емкости аккумулятора с циклированием проводили с использованием линейной аппроксимации.

После выбора катодного состава с наилучшими характеристиками производился подбор анодного состава, а также рабочий диапазон напряжений. На следующем этапе, когда оптимальные составы были подобраны, осуществлялась проверка их масштабности, для чего собирались аккумуляторы LB337 (сборка из восьми пар двухслойных и одной пары однослойных электродов с размером активной поверхности 95мм×185мм) и LB600 (сборка из семи пар двухслойных и одной пары однослойных с поверхностью 160мм×150мм). Также был исследован КПД заряд-разрядного процесса (отношение отданной аккумулятором к полученной во время заряда электрической энергии). На рис. 1 приведены фотографии аккумуляторов LB286, LB337 и LB600.

Изготовленный аккумулятор взвешивался и формировался в течение нескольких циклов заряда-разряда током C/20 (здесь и далее за 1 С принимается сила тока, которым аккумулятор разряжается за 1 час) при комнатной температуре с помощью многоканального потенциостата-гальваностата BST8-3 фирмы Neware. После формирования аккумуля-



Рис. 1. Аккумулятор LB286(слева сверху), LB337(справа) и LB600 (снизу)

лятор исследовался в режиме циклирования по схеме: заряд постоянным током—заряд постоянным напряжением—разряд постоянным током. Разряд проводился до напряжения 2.8 В, заряд постоянным током— до 4.3 В и до 4.35 В для аккумуляторов с катодами на основе НКА и НКМ соответственно. Величина удельной и объемной энергий рассчитывалась как энергия, отдаваемая аккумулятором при разряде током 0.2 С от 4.3 В (4.35 В) до 2.8 В, деленная на массу аккумулятора или его объем соответственно. Объем аккумулятора определялся как произведение трех его габаритных размеров. Потеря емкости за определенное количество циклов определялась как отношение разности емкостей между циклами к начальной емкости.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных предварительных исследований были отобраны лучшие катодные и анодные составы. Их характеристики представлены в табл. 1.

Экспериментальные исследования показали, что наилучшими удельными электрическими характеристиками и циклическим ресурсом обладают аккумуляторы с составом К1-А2. Далее будут представлены результаты электрических испытаний для аккумуляторов с этим электродным составом.

На рис. 2 представлены кривые зависимости напряжения разряда и заряда от емкости при различных токах для аккумулятора LB286, а в табл. 2 — измеренные и рассчитанные характеристики для этих токов.

Из рис. 2 видно, что увеличение токов заряда-разряда с 0.2 С-0.2 С до 0.5 С-1 С ведет к уменьшению значения отдаваемой емкости с 1610 мА·ч до 1402 мА·ч.

Из табл. 2 видно, что с увеличением тока разряда происходит уменьшение номинального напряжения, емкости аккумулятора, а также КПД циклирования и циклируемость. При увеличении тока разряда с 0.2 С до 1 С циклируемость уменьшается более чем в два раза (с 1220 до 460), что может быть объяснено связью указанных характеристик с величиной внутреннего теплового перегрева по причине использования минимальных количеств токопроводящей добавки в электродных составах и электролита.

На рис. 3 приведены кривые зависимости разрядной емкости от номера цикла для различных токов для аккумулятора LB286.

Из рис. 3 видно, что деградация емкости с циклированием имеет линейный характер.

Таблица 1

Плотности и ёмкости электродных слоёв в зависимости от составов и давления прессования

Электродный состав (указано в процентном соотношении от массы всей композиции)	НКА - 93%, СП - 4%, ПВДФ - 3%	НМК - 93%, СП - 4%, ПВДФ - 3%	АГП (Сажа АГР-2А)-95%, СП - 1%, КМЦ - 1%, СБЛ - 3%	АГП- 95%, СП- 1%, КМЦ - 1%, СБЛ - 3%
Название состава	К1	К2	А1	А2
Весовая удельная емкость, мА·ч/г	190.6	180	340	340
Усилие прессования, т/(9 см ²)	5	10	3	5
Содержание активного компонента, массовая доля	0.93	0.93	0.96	0.96
Масса электрода, мг	23.8	45.1	87	82
Плотность слоя материала, г/см ³	2.62	2.69	1.21	1.27
Масса активного компонента, мкг/(см ² ·мкм)	243.5	250.6	116	121.5
Ёмкость для электрода, мкА·ч/(см ² ·мкм)	46.4	45.1	39.4	41.3
Масса фольги, мг	38	38	78	77

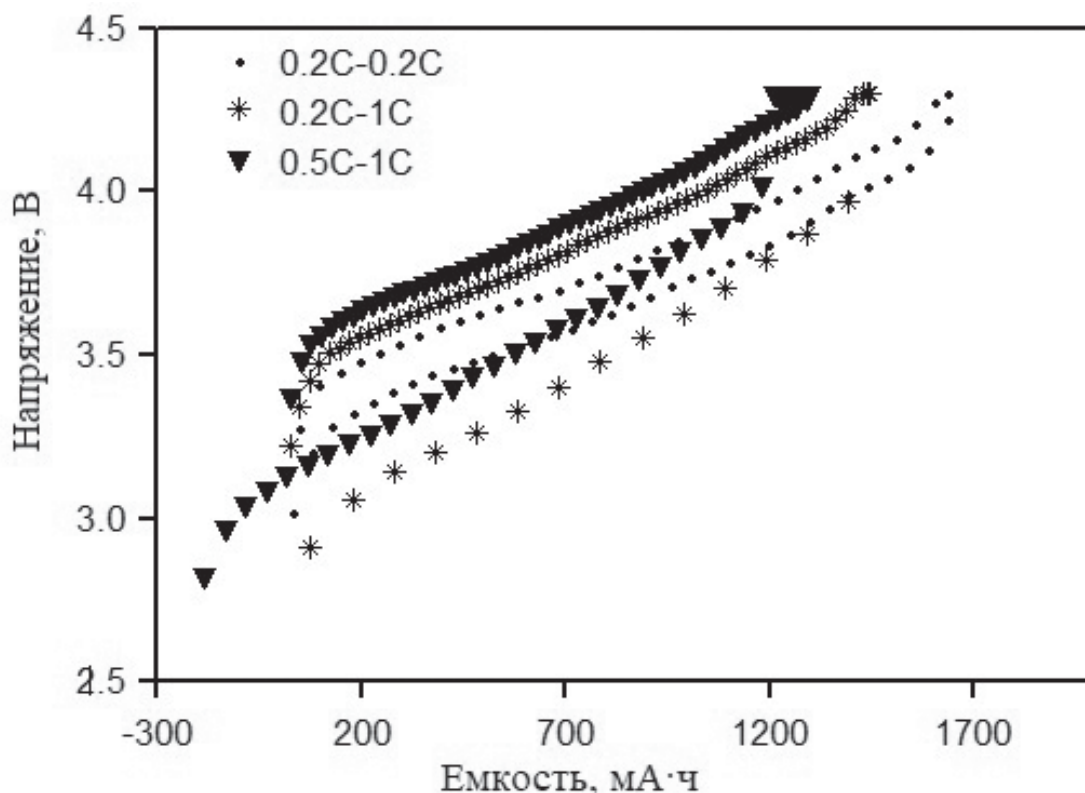


Рис. 2. Зависимости напряжения заряда и разряда от емкости для различных токов

Таблица 2

Энергетические характеристики ламинированного литий-ионного аккумулятора LB286 при режимах циклирования различными токами

Ток заряда-разряда, С-С	Номинальное разрядное напряжение, В	Номинальная разрядная емкость, МА·ч	Номинальная разрядная энергоемкость, мВт·ч	Удельная номинальная энергия, Вт·ч/кг	Количество циклов до потери 25% ёмкости	КПД циклирования, %
0.2С-0.2С	3.66	1610	6004	230	~1220	97.75
0.2С-1С	3.46	1408	4875	193	~980	89.8
0.5С-1С	3.47	1402	4866	193	~460	89.1

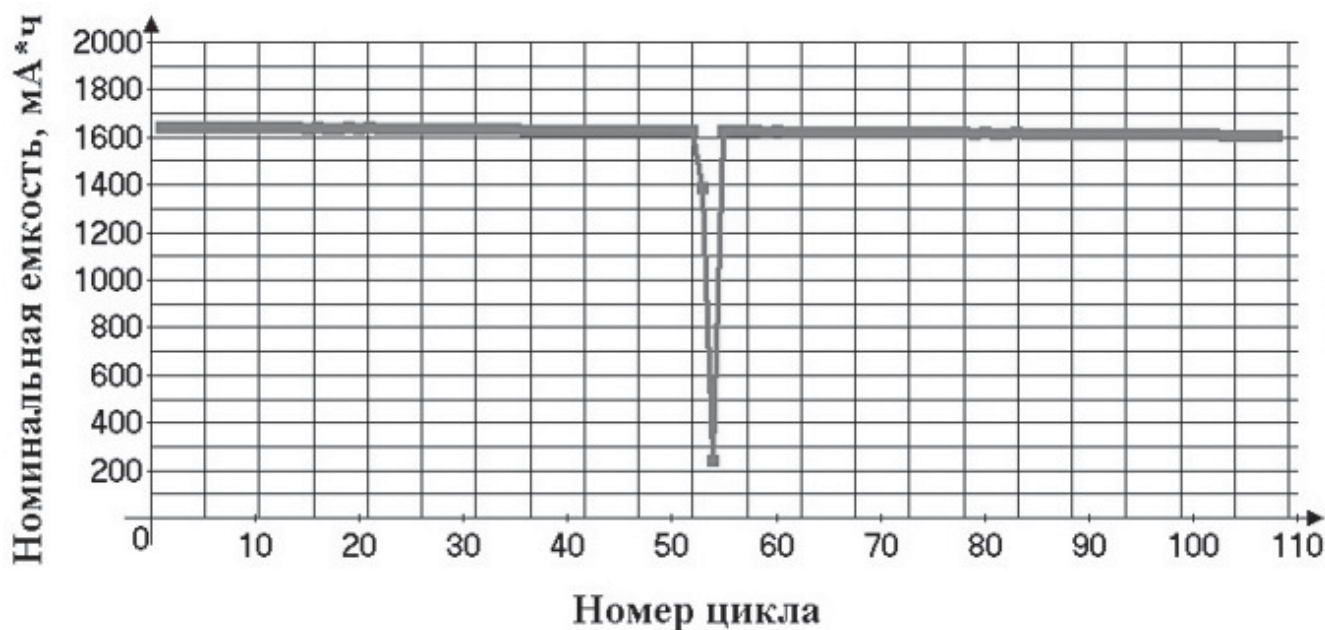
В табл. 3 представлены массогабаритные и электрические характеристики литий-ионных ламинированных аккумуляторов различных типоразмеров для электродных составов К1-А2.

Из таблицы видно, что с увеличением габаритных размеров аккумулятора происходит увеличение удельной и объемной энергий с 230 Вт·ч/кг и 521,2 Вт·ч/л до 268,1 Вт·ч/кг и 562 Вт·ч/л соответственно, что говорит о масштабируемости состава К1-А2 при изготовлении аккумуляторов различных типоразмеров. Поскольку масса литий-ионного аккумулятора состоит из масс электрохимически активной части (сепаратор, электролит, электроды, токосъемники), пропорциональной третьей степени емкости, и массы корпуса (ламинированного

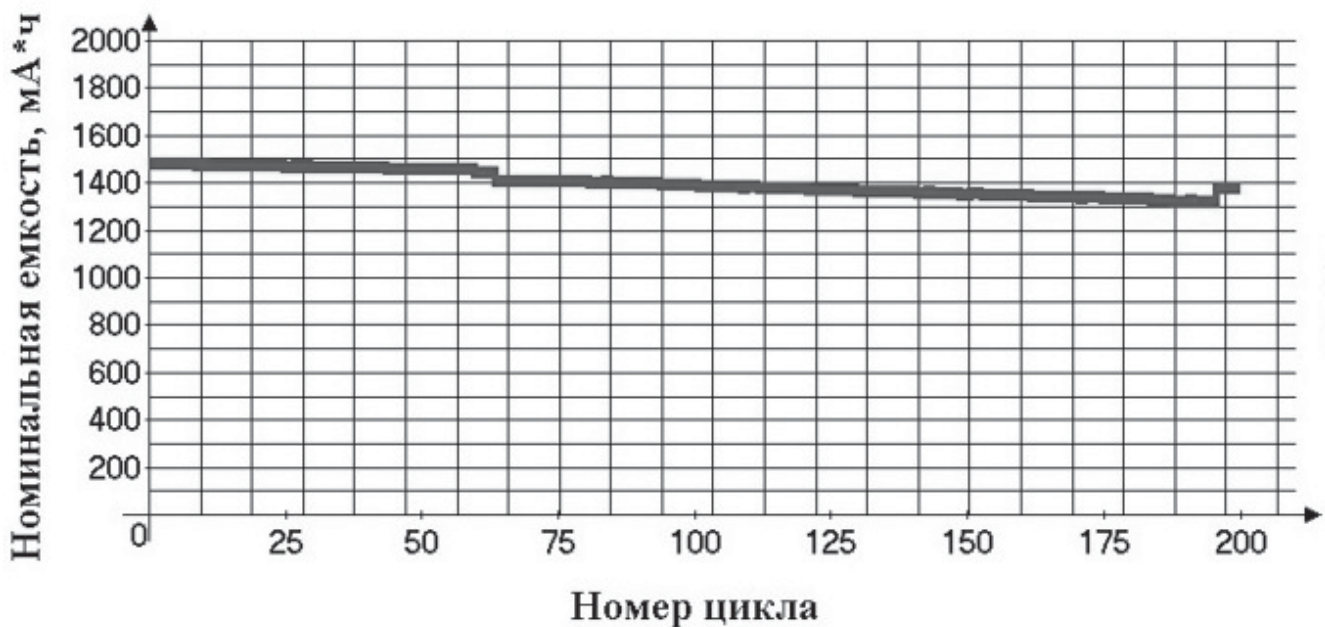
алюминия), пропорциональной второй степени, то наблюдается нелинейный рост удельных значений с увеличением емкости аккумулятора.

Выводы

Проведены оптимизационные исследования по поиску катодного и анодного состава композиций с максимальными удельными и объемными характеристиками. В качестве активного катодного материала наилучшим образом показал себя НКА марки NCA A801-COA; в качестве активного анодного — сажа марки AGP-2A. Найденные катодный и анодный составы позволили достичь для ламинированных литий-ионных аккумуляторов номинальных емкостей от 1.6 А·ч до 15.3 А·ч и величин удель-



a)



б)

Рис. 3. Зависимости номинальной разрядной емкости от номера цикла: а — токами заряда-разряда 0.2 С-0.2 С (53 и 54 циклы — неполный разряд); б — ступенчатым изменением токов (0.2 С-0.2 С — 1-59 циклы; 0.2 С-0.5 С — 60-61 циклы; 0.2 С-1 С — 62-84 циклы; 0.5 С-1 С — 85-192 циклы)

ной и объемной энергий в диапазонах 230-268.1 Вт·ч/кг и 521.2-562 Вт·ч/л соответственно. При этом были продемонстрированы следующие характеристики: для токов заряда-разряда 0.2 С-0.2 С циклируемость составила порядка 1200 циклов при КПД 97.75%; для токов заряда-разряда 0.2 С-1 С — порядка 980 циклов при КПД 87.8%; для токов заряда-разряда 0.5 С-1 С — порядка 460 циклов при КПД 89.1%.

В настоящий момент авторами проводятся долгосрочные циклические испытания литий-ионных

аккумуляторов при различных глубинах разряда, термофизические испытания, а также исследуется их поведение в условиях вакуума. По результатам проведенных исследований планируется проведение конструкторских работ по разработке образцов литий-ионной аккумуляторной батареи на основе ламинированных аккумуляторов для работы в открытом космосе с их последующей наземной экспериментальной отработкой.

Таблица 3

Характеристики литий-ионных ламинированных аккумуляторов различных типоразмеров (заряд двухступенчатым режимом: 1— постоянным током 0.2 С до 4.3 В; 2 — постоянным напряжением 4.3 В до тока 0.02 С)

Параметр	LB286	LB312	LB337	LB600
Габариты электродов, мм·мм·мм	55·55·3.8	57·57·3.8	80·170·4.3	166·152·4
Масса, г	25.2	25.7	129.5	210.1
Напряжение разряда, В	4.3 - 3.0	4.3 - 2.8	4.3 - 2.7	4.3 - 2.7
Емкость при разряде током 0,2С, мА·ч	1610	1770	9030	15343
Отданная энергия, мВт·ч	5991	6479	32900	56337
Удельная энергия, Вт·ч/кг	230	252	255	268.1
Объемная энергия, Вт·ч/л	521.2	524.8	562	557.8

Библиографический список

1. *Груздев А.И.* Концептуальные подходы к разработке аккумуляторных батарей с повышенной удельной энергоёмкостью для авиационно-космических применений // Вопросы электромеханики. 2015. Т. 147. С. 38-44.
2. *Hyder A.K., Wiley R.L., Halpert G., Flood D.J., Sabripour S.* Spacecraft Power Technologies. — Imperial College Press. 2000. Vol. 1. — 498 p.
3. *Jha A.R.* Next-Generation Batteries and Fuel Cells for Commercial, Military, and Space Applications. — CRC Press, 2012. — 368 p.
4. *Patel M.R.* Spacecraft Power Systems. — CRC Press, 2005. — 691 p.
5. *Gulbinska M.K.* Lithium-ion Battery Materials and Engineering. Current Topics and Problems from the Manufacturing Perspective. — Springer-Verlag London, 2014. — 205 p.
6. *Pistoia G.* Satellite Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. — Elsevier, 2014, pp. 311-344 (664 p.).
7. *Franco A.* Rechargeable Lithium Batteries. — Woodhead Publishing, 2015, pp. 369-383 (412 p.).
8. *Bugga R., Smart M., Whitacre J. and West W.* Lithium Ion Batteries for Space Applications // IEEE Aerospace Conference. 2007. 7 p. DOI: 10.1109/AERO.2007.352728
9. *Надараина Ц.Г., Селиванов А.И., Шестаков И.Я., Фадеев А.А., Виноградов К.Н.* Гибридный накопитель в системе электропитания перспективных космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 202-209.
10. *Buckle R., Roberts S.* Review of Commercial Cells For Space Applications // Environment, Energy and Earth Sciences Web of Conferences. 2017. URI: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/04/e3sconf_espc2017_17006.pdf DOI: 10.1051/e3sconf/20171617006
11. Saft Batteries, Aerospace & Defence. URI: <https://www.saftbatteries.com/market-sectors/aerospace-defense/space>
12. EnerSys, Satellites & Launch Vehicles. URI: https://www.enersys.com/Satellites_and_Launch_Vehicles.aspx?langType=1033#application-content
13. GS Yuasa Lithium Power. URI: <http://www.gsyuasa-lp.com/>
14. Kokam Co. Ltd, Kokam Li-ion/Polymer Cell. URI: http://kokam.com/data/Kokam_Cell_Brochure_V.3.pdf
15. *Clark C.* Evaluation of Lithium Polymer Technology for Small Satellite Applications, It's the Mission that Matters // 21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2007. URI: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1499&context=smallsat>
16. *Uno M., Ogawa K., Takeda Y., Sone Y. Tanaka K., Mita M., Saito H.* Development and on-orbit operation of lithium-ion pouch battery for small scientific satellite «REIMEI» // Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196. Issue 20, pp. 8755-8763. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.051
17. *Sone Y., Uno M., Takeda Y., Hirose K., Tajima M.* Application of the Lithium-Ion Secondary Batteries to the Space Crafts for the Scientific Missions // Nasa Aerospace Battery Workshop. 2005. URI: https://batteryworkshop.msfc.nasa.gov/presentations/WedAM_04_Applications_Li-Ion_Secondary_Batteries_Space_Crafts_Scientific_Missions_Ysone.pdf
18. *Мансуров В.С., Московкин С.А., Ребров С.Г., Янчур С.В.* Результаты разработки и наземной отработки литий-ионной аккумуляторной батареи космического назначения // Труды МАИ. 2014. № 77. URI: <http://trudymai.ru/published.php?ID=52967>
19. *Ребров С.Г., Янчур С.В., Мансуров В.С., Зернов О.Д.* Литий-ионная аккумуляторная батарея. Патент RU 127253 U1. Бюлл. №11, 20.04.2013.
20. *Кирюшин Е.Н., Мансуров В.С., Московкин С.А., Попов С.А.* Литий-ионная аккумуляторная батарея. Патент RU 103675 U1. 2011. Бюлл. №11, 20.04.2011.
21. *Ребров С.Г., Янчур С.В., Мансуров В.С., Московкин С.А.* Исследование ионных аккумуляторов космического назначения на пожаровзрывобезопасность // Труды МАИ. 2014. № 72. URI: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47567>

LAMINATED LITHIUM-ION CELLS WITH HIGH SPECIFIC CHARACTERISTICS

Rebrov S.G.^{1*}, Yanchur S.V.^{1**}, Faustov A.V.^{1***}, Filin S.V.^{2****}¹ Keldysh Research Centre,
8, Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia² Research Institute of Applied Acoustics,
7A, 9th of May str., Dubna, Moscow region, 141981, Russia

* e-mail: rebrov_sergey@mail.ru

** e-mail: y3862@mail.ru

*** e-mail: artefausto@yandex.ru

**** e-mail: svfilin@yandex.ru

Abstract

Lithium-ion batteries are widely employed for space applications due to a number of advantages compared to other electrochemical systems, especially due to their high specific energy and volume values. Laminated lithium-ion cells possess maximum specific characteristics among lithium-ion cells of other types (cylindrical and prismatic). Besides, they allow use available space more effectively. Despite skeptical attitude towards the laminated Lithium-ion batteries, however, there is information on their successful application in space conditions.

Keldysh Research Center is developing the space oriented Lithium-ion batteries with improved operational and specific characteristics. For example, Keldysh Research Center has already developed and tested the Lithium-ion battery for application in outer space conditions. The objective of the studies being performed is creation of the laminated Lithium-ion battery with improved specific characteristics, large calendar and cyclic life and a possibility to function in conditions of outer space. The task at this stage of the research work consists in searching for cathode and anode compositions allowing achieve maximum specific and volumetric parameters, as well as study electrical characteristics of these batteries under normal climatic conditions.

The studies conducted by Keldysh Research Center with cooperation of the Research Center of Applied Acoustics aiming at searching for cathode and anode composition allowed obtain maximum specific and volumetric parameters for laminated lithium-ion cells (often also called polymer Li-ion by mistake).

Two types of Lithiated oxide of Nickel-Manganese-Cobalt (NMC) and three types of Lithiated oxide of Nickel-Cobalt-Aluminum (NCA) were used as active cathode materials. Six different types of battery-grade carbons were used as active anode materials. N-methylpyrrolidone was used as a solvent for cathode slurries manufacturing, and water was used for anode manufacturing. As the studies revealed, the brand NCA

A801-COA was the best choice as an active cathode material and carbon black brand AGP-2A was the best choice as an active anode material. The mass fraction of the active cathode material in the cathode mass was improved up to 93%; the fraction of the active anode material was improved up to 95%. Specific characteristics increase while manufacturing laminated batteries of high capacity. It indicates the batteries manufacturing flexibility while transferring from small-sized laboratory cells to large-sized experimental cells.

The obtained optimal electrodes compositions for Li-ion cells with rated capacity in the range of 1.6-15.3 A·h allow achieving the specific and volumetric values at the level of 230-268 W·h/kg and 520-560 W·h/l respectively. The following characteristics were demonstrated herewith: for charge-discharge currents of 0.2C-0.2C the cyclability was about 1200 cycles with 97.75% efficiency; for charge-discharge currents of 0.2C-0.1C it was about 980 cycles with 87.8% efficiency, and for charge-discharge currents of 0.5C-1C the cyclability was about 460 cycles with efficiency of 89.1%.

Keywords: laminated lithium-ion cell, lithiated nickel-cobalt-aluminum oxide, high specific energy, cyclability, discharge capacity.

References

1. Gruzdev A.I. *Voprosy elektromekhaniki*, 2015, vol. 147, pp. 38–44.
2. Hyder A.K., Wiley R.L., Halpert G., Flood D.J., Sabripour S. *Spacecraft Power Technologies*, Imperial College Press, 2000, vol. 1, 498 p.
3. Jha A.R. *Next-Generation Batteries and Fuel Cells for Commercial, Military, and Space Applications*, CRC Press, 2012, 368 p.
4. Patel M.R. *Spacecraft Power Systems*, CRC Press, 2005, 691 p.
5. Gulbinska M.K. *Lithium-ion Battery Materials and Engineering. Current Topics and Problems from the Manufacturing Perspective*, Springer-Verlag London, 2014, 205 p.
6. Pistoia G. *Satellite Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Elsevier, 2014, pp. 311-344 (664 p.).

7. Franco A. *Rechargeable Lithium Batteries*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 369-383 (412 p.).
8. Bugga R., Smart M., Whitacre J. and West W. Lithium Ion Batteries for Space Applications. *IEEE Aerospace Conference*, 2007, 7 p. DOI: 10.1109/AERO.2007.352728
9. Nadaraia Ts.G., Selivanov A.I., Shestakov I.Ya., Fadeev A.A., Vinogradov K.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 202-209.
10. Buckle R., Roberts S. Review of Commercial Cells For Space Applications. *Environment, Energy and Earth Sciences Web of Conferences*, 2017. URI: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/04/e3sconf_espc2017_17006.pdf DOI: 10.1051/e3sconf/20171617006
11. *Saft Batteries, Aerospace & Defence*. URI: <https://www.saftbatteries.com/market-sectors/aerospace-defense/space>
12. *EnerSys, Satellites & Launch Vehicles*. URI: https://www.enersys.com/Satellites_and_Launch_Vehicles.aspx?langType=1033#application-content
13. *GS Yuasa Lithium Power*. URI: <http://www.gsyuasa-lp.com/>
14. *Kokam Co. Ltd, Kokam Li-ion/Polymer Cell*. URI: http://kokam.com/data/Kokam_Cell_Brochure_V.3.pdf
15. Clark C. Evaluation of Lithium Polymer Technology for Small Satellite Applications, It's the Mission that Matters. *21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*. 2007. URI: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1499&context=smallsat>
16. Uno M., Ogawa K., Takeda Y., Sone Y. Tanaka K., Mita M., Saito H. Development and on-orbit operation of lithium-ion pouch battery for small scientific satellite "REIMEI". *Journal of Power Sources*, 2011, vol. 196, issue 20, pp. 8755-8763. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.051
17. Sone Y., Uno M., Takeda Y., Hirose K., Tajima M. Application of the Lithium-Ion Secondary Batteries to the Space Crafts for the Scientific Missions. *Nasa Aerospace Battery Workshop*, 2005. URI: https://batteryworkshop.msfc.nasa.gov/presentations/WedAM_04_Applications_Li-Ion_Secondary_Batteries_Space_Crafts_Scientific_Missions_Ysone.pdf
18. Mansurov V.S., Moskovkin S.A., Rebrov S.G., Yanchur S.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URI: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=52967>
19. Rebrov S.G., Yanchur S.V., Mansurov V.S., Zernov O.D. *Patent RU 127253 U1*, 20.04.2013.
20. Kiryushin E.N., Mansurov V.S., Moskovkin S.A., Popov S.A. *Patent RU 103675 U1*, 20.04.2011.
21. Rebrov S.G., Yanchur S.V., Mansurov V.S., Moskovkin S.A. *Trudy MAI*, 2014, no. 72. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=47567>