

УДК 629.78.064.5

**А. Л. АЗАРНОВ, К. В. БЕЗРУЧКО, В. И. ЛАЗНЕНКО,
С. В. СИНЧЕНКО, А. А. ХАРЧЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ДЕГРАДАЦИЮ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

В статье рассмотрены деградационные процессы, протекающие в литий-ионных аккумуляторах как при циклировании, так и при хранении. Определен ряд факторов, оказывающих влияние на скорость деградационных процессов, протекающих в литий-ионных аккумуляторах. Проведено экспериментальное исследование влияния ряда факторов (температуры, тока и напряжения) на скорость деградационных процессов в литий-ионных аккумуляторах. Показана возможность использования данных факторов для проведения ускоренных испытаний литий-ионных аккумуляторов.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, деградационный процесс, температура, напряжение, ток, состояние заряда, глубина разряда.

Введение

Основными источниками электроэнергии для объектов аэрокосмической техники в настоящее время являются солнечные и аккумуляторные батареи. Исторически так сложилось, что на космических аппаратах в основном используются аккумуляторы на основе никелевой электрохимической системы (никель-водородные, никель-кадмиевые и никель-металлгидридные аккумуляторы). Однако энергомассовые характеристики данных аккумуляторов достигли своего предела, а возможности улучшения удельных характеристик ограничены. Поэтому, в настоящее время, происходит активный переход на аккумуляторные батареи на основе литиевой электрохимической системы – литий-ионные аккумуляторные батареи. Это связано с тем, что по своим энергомассовым и мощностным характеристикам литий-ионные аккумуляторы значительно превосходят аналоги никелевой электрохимической системы [1].

Основными преимуществами литий-ионных аккумуляторов являются [2]:

- снижение массы аккумуляторной батареи за счет более высокого соотношения энергия/масса, которое для литий-ионных аккумуляторов достигает 40%;

- низкое тепловыделение и высокий КПД по энергии во время цикла заряд/разряда с малым саморазрядом;

- более технологичный процесс изготовления, обеспечивающий хорошую повторяемость характеристик, высокую надежность и низкую себестоимость.

мость.

По оценкам специалистов фирмы SAFT (Франция), применение литий-ионных аккумуляторных батарей на телекоммуникационных спутниках мощностью 15-20 кВт, позволит снизить массу батареи на 300 кг при стоимости вывода на орбиту 1 кг полезной массы равной примерно \$30000 [2].

Однако существует и целый ряд серьезных недостатков литий-ионных аккумуляторов. Самый главный из которых заключается в том, что литий-ионные аккумуляторные батареи неизбежно начинают стареть с момента их производства. Вторым серьезным недостатком является то, что батареи в обязательном порядке требуют наличия встроенных систем безопасности.

Упомянутое ранее старение литий-ионных аккумуляторов связано с протеканием ряда деградационных процессов внутри аккумулятора. Скорость протекания таких процессов сильно зависит не только от внешних факторов, но и от режимов эксплуатации.

Таким образом, подобрав внешние факторы и режимы эксплуатации, можно искусственно ускорить деградационные процессы, протекающие в литий-ионных аккумуляторах. Данное ускорение деградационных процессов позволит проводить ускоренные испытания литий-ионных аккумуляторов, что, в свою очередь, позволит быстрее и точнее делать вывод как о работоспособности новых видов литий-ионных аккумуляторов, так и о длительности и возможности использования существующих аккумуляторов.

На данный момент вопрос ускоренных испыта-

ний литий-ионных аккумуляторов с помощью ускорения деградационных процессов изучен очень слабо. В своей работе мы провели теоретическое исследование деградационных процессов, протекающих в литий-ионных аккумуляторах и факторов, оказывающих влияние на скорость данных процессов, а также провели экспериментальное исследование влияния ряда факторов (температура, ток, напряжение) на скорость деградации характеристик литий-ионных аккумуляторов.

1. Постановка задачи

1.1. Деградационные процессы, протекающие в литий-ионных аккумуляторах

Деградация литий-ионных аккумуляторов это процесс неизбежный, протекающий не только в аккумуляторах, находящихся в эксплуатации, но и в аккумуляторах, находящихся на хранении.

Анализ литературных источников показал, что деградация литий-ионных аккумуляторов происходит в результате протекания следующих процессов:

- деградации кристаллической структуры положительного электрода [3, 4];
- металлизации лития [3, 4];
- образования пассивационных слоев на электродах (SEI и SPI) [3-5];
- изменения механических свойств электродов, вызванное изменениями объема в процессе циклирования [3, 4];
- расхода пригодного для использования лития в результате протекания побочных реакций [4, 5];
- роста разбаланса электродов и аккумуляторов на протяжении всего срока службы [4-6];
- уменьшения площади активной массы электродов, участвующей в токообразующих реакциях [4, 6];
- потери активной массы электрода [4];
- проводимости электрода [4];
- коррозии элементов аккумулятора [4];
- роста внутреннего сопротивления при циклировании большими токами, что приводит к повышению температуры и ускоренной деградации [5, 6];
- разрушения растворителей органических электролитов и солей [5];
- отслоения активной массы электродов от токосъемников [4, 5];
- химического распада активного вещества в электродах в результате протекания побочных реакций [5];
- электронной изоляции активного материала от электролита [5];
- снижения сцепки между частицами активной

массы электродов [5];

- усадки или плавления сепаратора [5];
- внутренних коротких замыканий, вызванных примесями или ростом дендритов [5].

Как видно из вышесказанного, снижение емкости и падение мощности литий-ионных аккумуляторов, является следствием одновременного протекания ряда процессов, а также их взаимодействия [4-7].

1.2. Факторы, оказывающие влияние на деградацию литий-ионных аккумуляторов

По мнению большинства авторов [3, 8-10] наиболее существенными факторами, влияющими на скорость деградации характеристик литий-ионных аккумуляторов, являются следующие:

- температура;
- напряжение;
- ток;
- состояние заряда (SoC) и глубина разряда (DOD) аккумуляторов;
- характеристики используемых материалов.

Некоторые из этих факторов приводят к временной потере емкости, а некоторые приводят к постоянному снижению емкости или даже к поломке аккумуляторов.

Согласно L. Lam [8] температура оказывает очень сильное влияние на емкость литий-ионных аккумуляторов. Литий-ионные аккумуляторы имеют оптимальный диапазон рабочих температур, за пределами которого аккумулятор теряет емкость. Данные потери могут быть временными, а могут быть и необратимыми. Автор также утверждает, что даже в указанном производителем диапазоне рабочих температур аккумулятор может испытывать ускоренную деградацию. Таким образом, диапазон температур оптимального срока службы аккумуляторов, как правило, еще уже, чем указанный производителем в спецификации. Снижение срока службы характерно для высоких и низких температур (рис. 1).

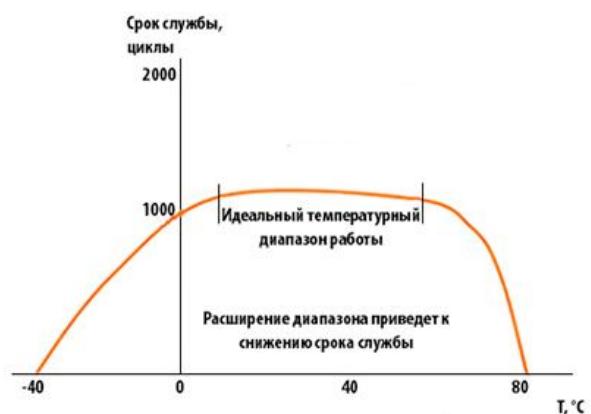


Рис. 1. Пример диапазона температур оптимального срока службы аккумуляторов

Согласно одного из предложенных авторами [8] механизмов влияния высоких температур на характеристики литий-ионных аккумуляторов, слой SEI при высоких температурах начинает постепенно изнашиваться, расщепляться и растворяться в электролите [8]. Данные процессы приводят к тому, что активный материал анода снова начинает контактировать с электролитом и начинается протекание побочных реакций. Слой SEI постепенно восстанавливается, а ранее метастабильные органические компоненты слоя SEI за счет более высоких температур преобразовываются в стабильные неорганические молекулы, которые являются более стабильными и менее пористыми [8]. Кроме того, возможно частичное растворение катода в электролите с включением активных частиц в слой SEI. В результате протекания этих процессов интеркаляция на аноде становится затрудненной и снижается ионная проводимость.

Другой механизм влияния высоких температур связан с деформацией анода [8]. Ионы лития растворяются в электролите, а при более высоких температурах скорость этого процесса увеличивается. Возможна даже интеркаляция всего растворителя [8]. Все это приводит к деформации и растрескиванию анода. Аналогичный процесс протекает на катоде и приводит к нарушению структуры активного материала катода.

Кроме того, при высоких температурах происходит разложение электролита и разложение сепаратора в электролите. После растворения сепаратора, возможно внутреннее короткое замыкание электродов внутри аккумулятора [8].

При низких температурах энергия активации, необходимая для протекания химических реакций повышается, и, следовательно, для интеркаляции и деинтеркаляции на электродах требуется большее количество энергии, и меньшее количество ионов лития будет участвовать в активном процессе аккумуляторов [8]. Уменьшение количества актов интеркаляции и деинтеркаляции приведет к снижению напряжения аккумуляторов, а, следовательно, и к уменьшению мощности аккумуляторов. Из-за низкой температуры диффузия ионов лития замедляется. В результате снижаются токи, которые способен обеспечивать аккумулятор, что также приводит к потере мощности. Однако данные эффекты являются временными и при восстановлении нормальных значений температуры, емкость и мощность аккумуляторов восстанавливаются [8].

Интеркаляция ионов лития на аноде во время заряда при низких температурах происходит медленнее, чем происходит передача электрической энергии и диффузия ионов лития к аноду. В результате этого анод достигает потенциала, при котором

происходит восстановление ионов лития до металлического лития [8]. Металлический литий осаждается на аноде и блокирует поры слоя SEI, в результате происходит падение емкости.

В случае влияния напряжения на характеристики литий-ионных аккумуляторов следует отметить, что надо рассматривать как перезаряд (превышение граничного зарядного напряжения), так и перезаряд (превышение граничного разрядного напряжения).

Перезаряд литий-ионных аккумуляторов может привести к проблемам, если напряжение поднимется выше 4,3В на одном аккумуляторе [9]. В случае перезаряда сначала происходит небольшой прирост емкости, однако ресурс при циклировании значительно уменьшается [8]. Во время перезаряда электрическая энергия поступает внутрь аккумулятора, но при этом интеркаляция не протекает, что приводит к резкому увеличению внутреннего сопротивления. Электрическая энергия будет перерабатываться в тепло и температура аккумулятора вырастет, что в свою очередь вызовет протекание разнообразных процессов, протекающих при термической деградации.

Изменения емкости и ресурса литий-ионных аккумуляторов при увеличении граничного зарядного напряжения представлены на рисунке 2 [8].

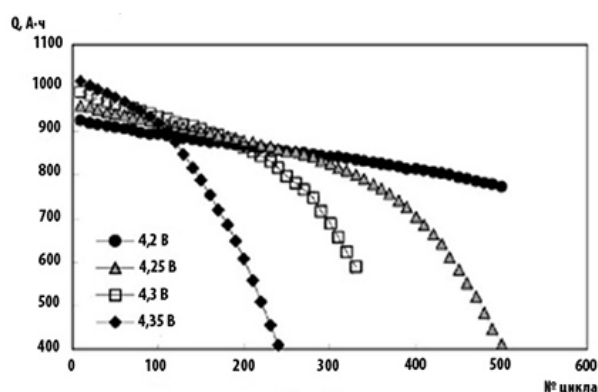


Рис. 2. Снижение ресурса литий-ионных аккумуляторов при увеличении максимального зарядного напряжения

При перезаряде также происходит разложение связующего вещества и электролита. Разложение электролита приводит к образованию нерастворимых продуктов, блокирующих поры электродов и приводящих к газообразованию [8]. Также при перезаряде происходит окисление катода и металлизация лития. При окислении катода уменьшается активная масса катода, а при металлизации лития уменьшается активная масса анода и снижется количество ионов лития в аккумуляторе.

А. Т. Apparillai с соавторами [10] предлагают две основные причины падения емкости при пере-

заряде:

- структурная неустойчивость (микротрещины, вызванные изменением размеров в зависимости от содержания Li);

- неустойчивость поверхности, вызванная реакцией Li_xCoO_2 с электролитом кристаллов LiCoO_2 (например, растворение кобальта).

Согласно P. Ramadass и соавторов [9] перезаряд на 0,1В не только приводит к проблемам с техникой безопасности, но и уменьшает срок службы до 60%.

Падение емкости аккумуляторов при перезаряде вызвано двумя деградационными механизмами:

- коррозией медных токоприемников (на аноде) и их растворением в электролите [8]. Ионы меди при этом не только блокируют активную массу электрода, но и попадут в сепаратор. Это приведет к образованию дендритов и внутреннему короткому замыканию в аккумуляторах. Коррозия также приводит к потере контакта с анодом и потере мощности;

- разложением слоя SEI на аноде [8]. Высокий потенциал анода становится причиной растворения слоя SEI. Таким образом, по окончании заряда, активный материал аккумулятора будет подвержен побочным реакциям, что приведет к снижению числа ионов лития и потере емкости.

При заряде большими токами, максимальное конечное напряжение достигается при более низких степенях заряженности. Таким образом, чем выше зарядный ток, тем меньше зарядная емкость [8].

Непрерывный заряд большими токами приведет не только к временному падению емкости, но и к повреждению аккумуляторов и потере емкости. Также большие токи заряда приводят к нагреву аккумуляторов. Также следствием использования высоких токов заряда является металлизация (восстановление) лития, что в свою очередь приведет к падению или потере емкости аккумулятора. Помимо всего вышесказанного заряд высокими токами может вызвать разрушение слоя SEI на аноде [8].

Влияние SoC при циклировании намного сложнее и менее изучено, однако авторы [8] склоняются к отрицательному влиянию SoC на емкость аккумуляторов. Чем выше SoC, тем больше энергии находится в аккумуляторе, т.е. аккумулятор является более реакционноспособным, что может ускорить деградацию аккумулятора [8].

В связи с высоким содержанием энергии в аккумуляторе, растет и скорость саморазряда. При хранении литий-ионных аккумуляторов протекает большее количество побочных реакций и происходит ускоренный рост слоя SEI. В связи с тем, что аккумулятор находится в состоянии термодинамической неустойчивости, может произойти деформация катода [8]. Также, при высоких SoC происходит окисление электролита и увеличение сопротивления.

Все это приводит к потере емкости и мощности.

Ресурс аккумулятора в значительной степени зависит и от DOD [8]. Чем глубже разряд, тем больше актов интеркаляции и деинтеркаляции протекает на электродах, и, следовательно, большее количество ионов лития и активной массы электродов будет потеряно. Это вызовет повышенные потери емкости и уменьшит ресурс аккумулятора.

При циклировании на высоких глубинах разряда появляются дополнительные деградационные механизмы: деформация катода, разложение и растворение материала катода в электролит [8].

P. Ramadass с соавторами [9] исследовали поведение литий-ионных аккумуляторов при различных значениях DOD (20, 40, 60 и 100%) и граничном значении зарядного напряжения равном 4,2В. На рисунке 3 приведены зарядные кривые при различных значениях DOD для первого цикла. Время заряда при постоянном токе уменьшилось для аккумуляторов с более низкой величиной DOD, (20 и 40%) по сравнению аккумуляторами с более высокой величиной DOD (60 и 100%).

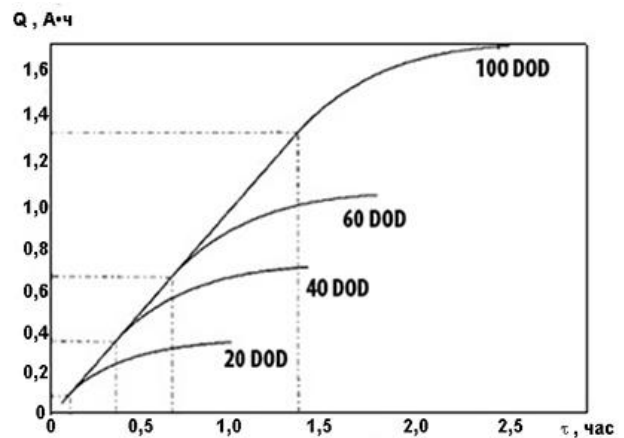


Рис. 3. Зарядные кривые литий-ионных аккумуляторов на первом цикле при использовании разных значений DOD

Поскольку общее время заряда частично заряженных аккумуляторов ниже, чем время заряда полностью разряженных аккумуляторов, потери емкости в результате протекания побочных реакций также уменьшаются.

Как видно из вышесказанного, каждый из перечисленных факторов оказывает влияние на скорость деградационных процессов в литий-ионных аккумуляторах. Далее, с помощью экспериментальных исследований, нами будет изучено не только влияние отдельного фактора, но и влияние комплекса факторов.

2. Результаты

2.1. Программа исследования

Все экспериментальные исследования проводились на литий-ионных аккумуляторах емкостью 1,453 А·ч.

Исследования влияния температуры на характеристики литий-ионных аккумуляторов проводились на стенде, схема и внешний вид которого представлены на рисунке 4. В состав данного стенда входят следующее оборудование и приборы: ИП - программируемый источник питания; АК - литий-ионный аккумулятор; СУ - система управления - компьютер; ТК - термокамера; РТ - регулятор температуры; УМИТ - устройство многоканального измерения температуры; BSTD-300 - прибор контроля состояния аккумуляторов разного типа.

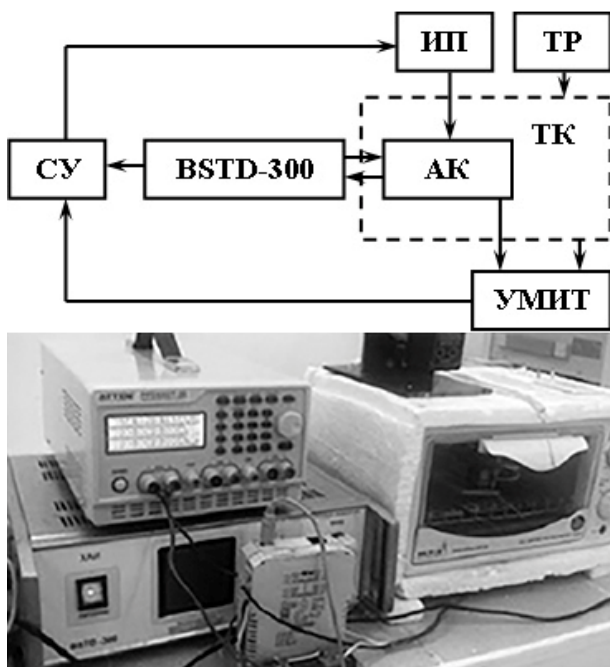


Рис. 4. Структурная схема и внешний вид стенда для исследования влияния температуры

В термокамеру последовательно помещались по одному аккумуляторы. Температура в камере, с помощью терморегулятора, устанавливалась в пределах от 25°C до 60°C с шагом 5°C и точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и контролировалась устройством многоканального измерения температуры. В качестве разрядного устройства использовался BSTD-300. Измерения напряжения и тока проводились внешним интерфейсным модулем. В качестве зарядного устройства использовался трехканальный источник питания ATTEN PPS3203T-3S.

В общем, эксперимент управлялся с помощью персонального компьютера. На него же регистрировались все результаты.

Для исследования влияния других (не температурных) факторов при комнатной температуре использовались стенд, схема, внешний вид которого представлены на рисунке 5. В состав данного стенда входят следующие приборы и оборудование: ИП - программируемый источник питания; РТ - регулятор температуры; УМИТ - устройство многоканального измерения температуры; СУ - система управления - компьютер; АК - литий-ионные аккумуляторы; ТК - термокамера; ПИ - преобразователь интерфейса; РБ - релейный блок; АЦПУ - четырехканальный аналогово-цифровой преобразователь для измерения напряжения; АЦПИ - четырехканальный аналогово-цифровой преобразователь для измерения тока; ЭН - электронная нагрузка; Ш - измерительные шунты.

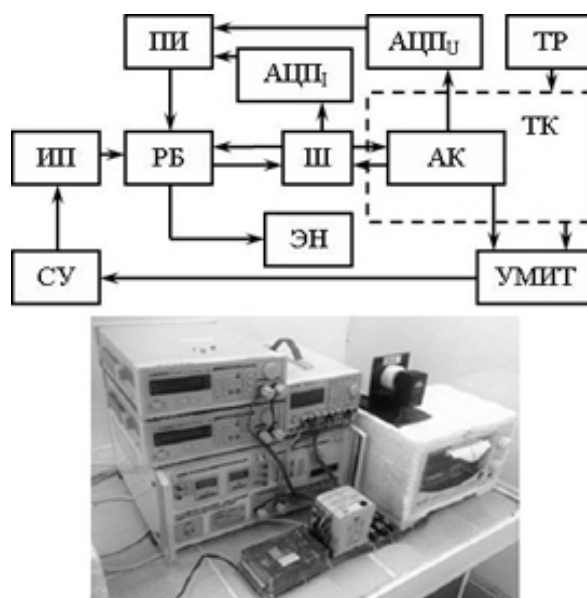


Рис. 5. Структурная схема стенда для исследования влияния нетемпературных факторов

Работа данного стенда аналогична вышеописанному. Отличия заключаются в том, что исследованию подвергаются одновременно три литий-ионных аккумулятора.

При температурных исследованиях, заряд литий-ионных аккумуляторов проводился в три этапа:

- заряд постоянным, стабилизированным током, равным 1,453 А, до конечного напряжения 4,15 В, дозаряд при стабилизированном напряжении, равным 4,15 В, до значения тока равного 1,017 А;

- заряд постоянным стабилизированным током, равным 1,017 А, до конечного напряжения 4,2 В, дозаряд при стабилизированном напряжении, равным 4,2 В, до значения тока 0,872 А;

- заряд постоянным, стабилизированным током, равным 0,872 А, до конечного напряжения 4,3 В, дозаряд при стабилизированном напряжении, равном 4,3 В, до значения тока 0,073 А.

Разряд проводился постоянным, стабилизированным током, равным 1,453 А до конечного напряжения 3 В.

При исследовании влияния токов, заряд аккумуляторов проводился постоянным стабилизированным током, равным 2,906 А, до конечного напряжения 4,3 В, а разряд проводился постоянным стабилизированным током, равным 4,36 А, до конечного напряжения 3 В.

При исследовании влияния комплекса факторов, заряд аккумуляторов проводился постоянным, стабилизированным током, равным 2,906 А, до конечного напряжения 4,35В, а разряд проводился постоянным, стабилизированным током, равным 4,36 А, до конечного напряжения 3 В.

2.2. Результаты исследования

Первоначально было проведено исследование влияния температуры на скорость деградационных процессов и характеристики литий-ионных аккумуляторов. Результаты данного исследования приведены на рис. 6.

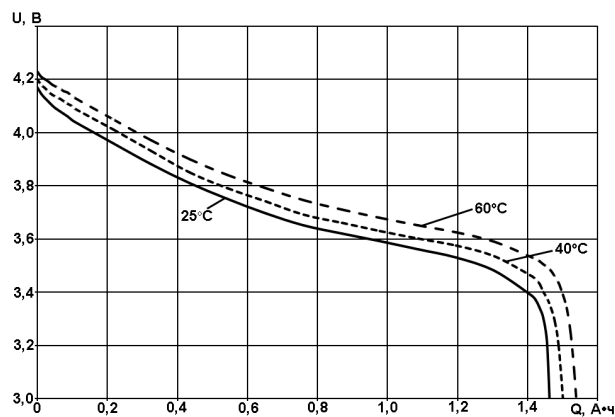


Рис. 6. Разрядные характеристики аккумуляторов при различных температурах

Далее было проведено экспериментальное исследование влияния токов (заряда и разряда) на скорость деградационных процессов и характеристики литий-ионных аккумуляторов. Результаты данного исследования приведены на рис. 7.

Также нами было проведено экспериментальное исследование влияния комплекса факторов (токов заряда и разряда и перезаряда). Результаты данного исследования приведены на рис. 7.

2.3. Обсуждение результатов исследования

Как видно из рисунка 6, при воздействии температуры на литий-ионные аккумуляторы, емкость и напряжение аккумуляторов при повышении температуры увеличиваются. Таким образом, экспериментальное исследование влияния температуры на деградационные процессы показало, что при повышении температуры вплоть до 60°C, падения характеристик литий-ионных аккумуляторов не наблюдается. В тоже время, воздействие на литий-ионные аккумуляторы температуры выше 60°C приводит к резкому выходу аккумуляторов из строя, связанному, скорее всего, с разрушением контактов.

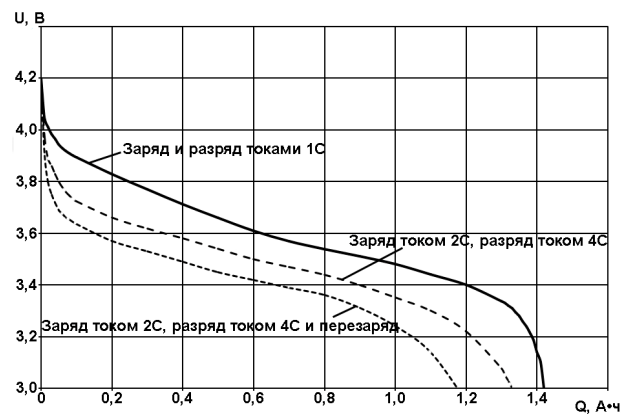


Рис. 7. Разрядные характеристики аккумуляторов при воздействии больших токов заряда и разряда и комплекса факторов

Результаты исследования, приведенные на рис. 7 показывают, что при использовании больших токов заряда и разряда происходит ухудшение характеристик литий-ионных аккумуляторов, однако оно не является существенным для использования в качестве ускоряющих факторов при ускоренных испытаниях литий-ионных аккумуляторов.

Результаты исследования, приведенные на рис. 7 также показывают, что использование комплекса факторов (большие токи заряда и разряда и перезаряд) приводит к значительному снижению характеристик литий-ионных аккумуляторов. Таким образом, комплекс предложенных авторами факторов может быть использован в качестве ускоряющего фактора для ускоренных испытаний литий-ионных аккумуляторов.

Выводы

Проведенные авторами теоретические исследования показали, что в литий-ионных аккумуляторах протекает ряд деградационных процессов, которые приводят к тому, что в независимости от того, эксплуатируется ли аккумулятор или нет, характери-

ки аккумулятора снижаются. Скорость данного снижения характеристик зависит от ряда внешних и внутренних факторов, таких как температура, сила тока, напряжение и др. Однако экспериментальные исследования показали, что температура не может быть использована в качестве ускоряющего фактора, так как вместо ожидаемого падения характеристик аккумуляторов, авторами было получено увеличение характеристик. В тоже время использование больших токов заряда и разряда, а особенно комплексное использование факторов (большие токи заряда и разряда и перезаряд) позволит проводить ускоренные исследования литий-ионных аккумуляторов после проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Литература

1. Кедринский, И. А. Литий-ионные аккумуляторы [Текст] / И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. – Красноярск : ИПК «Планета», 2002. – 266 с.
2. Лукьяненко, М. В. Источники электроэнергии космических аппаратов [Электронный ресурс] / М. В. Лукьяненко. – Режим доступа: http://www.professors.ru/A_Lukyanenko.html. – 28.03.2016.
3. González, D. D. Accelerated life testing and life prediction of lithium ion batteries connected to wind turbine [Text] / D. D. González, R. Diosi. – Aalborg : Department of energy technology Aalborg University, 2011. – 101 p.
4. Groot, J. State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods [Text] / J. Groot. – Gøteborg : Division of Electric Power Engineering Department of Energy and Environment Chalmers University Of Technology, 2012. – 150 p.
5. Dane, N. Degradation analysis and health monitoring of lithium ion batteries [Text] / N. Dane. – Maryland : Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2011. – 104 p.
6. Smith, K. Modeling of Nonuniform Degradation in Large-Format Li-ion Batteries [Text] / K. Smith, G.-H. Kim, A. Pesaran // 215th Electrochemical Society Meeting, San Francisco, CA, May 24-29, 2009. – San Francisco, CA, 2009. – 255 p.
7. Lefley, P. Rechargeable batteries – Part 3: Lithium-ion batteries [Text] / P. Lefley, A. Soge, J. Starkey // Energize. – Nooitgedacht, Gauteng, South Africa, April 2012. – P. 49-52.
8. Lam, L. A. Practical Circuit-based Model for State of Health Estimation of Li-ion Battery Cells in Electric Vehicles [Text] / L. A. Lam. – Delft, Nederland : Faculty Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Department Electrical Power Engineering Delft University of Thechnology, 2011. – 174 p.
9. Development of First Principles Capacity Fade. Model for Li-Ion Cells [Text] / P. Ramadass, B. Haran, P. M. Gomadam, R. E. White, B. N. Popov // Journal of the Electrochemical Society. – Pennington, New Jersey, USA, 2004. – No. 151(2). – P. 196-203.
10. Microstructure of LiCoO₂ with and without “AlPO₄” Nanoparticle Coating: Combined STEM and XPS Studies [Text] / A. T. Appapillai, A. N. Mansour, J. Cho, Y. Shao-Horn // Chemistry of Materials. – Washington, DC, USA, 2007. – No. 19. – P. 5748-5757.

References

1. Kedrinskij, I. A. Litij-ionnye akkumuljatory [Lithium-ion batteries]. Krasnojarsk, IPK «Planeta» Publ., 2002. 266 p.
2. Luk'janenko, M. V. Istochniki jelektroenergii kosmicheskikh apparatov [Sources of electric power of space vehicles]. Available at: http://www.professors.ru/A_Lukyanenko.html (accessed 28.03.2016).
3. González, D. D., Diosi, R. Accelerated life testing and life prediction of lithium ion batteries connected to wind turbine. Aalborg, Department of energy technology Aalborg University Publ., 2011. 101 p.
4. Groot, J. State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods. Gøteborg, Division of Electric Power Engineering Department of Energy and Environment Chalmers University Of Technology Publ., 2012. 150 p.
5. Dane, N. Degradation analysis and health monitoring of lithium ion batteries. Maryland, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2011. 104 p.
6. Smith, K., Kim, G.-H., Pesaran, A. Modeling of Nonuniform Degradation in Large-Format Li-ion Batteries. 215th Electrochemical Society Meeting, San Francisco, CA, May 24-29, 2009, San Francisco, CA, 2009. pp. 255.
7. Lefley, P., Soge, A., Starkey, J. Rechargeable batteries – Part 3: Lithium-ion batteries. Energize, Nooitgedacht, Gauteng, South Africa, 2012, April, pp. 49-52.
8. Lam, L. A. Practical Circuit-based Model for State of Health Estimation of Li-ion Battery Cells in Electric Vehicles. Delft, Nederland, Faculty Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Department Electrical Power Engineering Delft University of Thechnology Publ., 2011. 174 p.
9. Ramadass, P., Haran, B., Gomadam, P. M., White, R. E., Popov, B. N. Development of First Principles Capacity Fade. Model for Li-Ion Cells. Journal of the Electrochemical Society, Pennington, New Jersey, USA, 2004, no. 151(2), pp. 196-203.
10. Appapillai, A. T., Mansour, A. N., Cho, J., Shao-Horn, Y. Microstructure of LiCoO₂ with and without “AlPO₄” Nanoparticle Coating: Combined STEM and XPS Studies. Chemistry of Materials, Washington, DC, USA, 2007, no. 19, pp. 5748-5757.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ДЕГРАДАЦІЮ
ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ**

О. Л. Азарнов, К. В. Безручко, В. І. Лазненко, С. В. Сінченко, А. А. Харченко

В статті розглянуто деградаційні процеси, які протікають в літій-іонних акумуляторах як при циклюванні, так і при зберіганні. Визначено ряд факторів, які впливають на швидкість деградаційних процесів, які протікають в літій-іонних акумуляторах. Проведено експериментальне дослідження впливу ряду факторів (температури, струму та напруги) на швидкість деградаційних процесів в літій-іонних акумуляторах. Показано можливість використання таких факторів для проведення прискорених випробувань літій-іонних акумуляторів.

Ключові слова: літій-іонний акумулятор, деградаційний процес, температура, напруга, струм, стан заряду, глибина розряду.

**RESEARCH OF FACTORS, HAVING INFLUENCE ON DEGRADATION
LITHIUM-IONIC ACCUMULATORS**

A. L. Azarnov, K. V. Bezruchko, V. I. Laznenko, S. V. Sinchenko, A. A. Kharchenko

Degradation processes, flowing in lithium-ionic accumulators both at cycling and at storage, are considered in the article. The row of factors, having influence on speed degradation processes, flowing in lithium-ionic accumulators is certain. Experimental research of influence of row of factors (temperature, current and voltage) is conducted on speed of degradation processes in lithium-ionic accumulators. Possibility of the use of these factors is rotined for the lead through of speed-up tests of lithium-ionic accumulators.

Key words: lithium-ionic accumulator, degradation process, temperature, voltage, current, state of charge, depth of discharge.

Азарнов Александр Леонидович – старший научный сотрудник кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: azarnoff@mail.ru.

Безручко Константин Васильевич – доктор техн. наук, профессор кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kvbezruchko@mail.ru.

Лазненко Виктор Иванович - старший научный сотрудник кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: laznenko.vitya@mail.ru.

Сінченко Светлана Владимировна - старший научный сотрудник кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: s.sinchenko@gmail.com.

Харченко Андрей Анатольевич - старший научный сотрудник кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: a_kharchenko2004@ukr.net.

Azarnov Alexander L. - Senior Researcher of Department of the Space system engineering and untraditional energy sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: azarnoff@mail.ru.

Bezruchko Konstantin V. - Doctor of Technical Science, Professor of Department of the Space system engineering and untraditional energy sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: kvbezruchko@mail.ru.

Laznenko Viktor I. - Senior Researcher of Department of the Space system engineering and untraditional energy sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: laznenko.vitya@mail.ru.

Sinchenko Svetlana V. - Senior Researcher of Department of the Space system engineering and untraditional energy sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: s.sinchenko@gmail.com.

Kharchenko Andrey A. - Senior Researcher of Department of the Space system engineering and untraditional energy sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a_kharchenko2004@ukr.net.