

УДК 629.78.064.5

А.Л. АЗАРНОВ, С. В. ШИРИНСКИЙ, К.В. БЕЗРУЧКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

### ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ИХ РЕСУРС

*Рассмотрены деградационные процессы, приводящие к истечению ресурса аккумуляторов (достижению предельного состояния), а так же ускоряющих факторов, определяющих интенсивность этих процессов. Цель исследования заключается в разработке теоретического обоснования метода ускоренных ресурсных испытаний. В статье решаются задачи определения деградационных процессов, характерных для различных режимов эксплуатации электрохимических аккумуляторов в энергоустановках ракетно-космических летательных аппаратов и выбора способов их управляемого ускорения с помощью внешнего воздействия.*

**Ключевые слова:** электрохимический аккумулятор, ресурс, режим эксплуатации, деградационный процесс, деградация характеристик, фактор внешнего воздействия, ускоренные ресурсные испытания.

#### Введение

Современные аккумуляторы, применяемые в энергоустановках (ЭУ) ракетно-космических летательных аппаратов (РКЛА), способны выдержать сотни и тысячи циклов заряда-разряда, что позволяет эксплуатировать их в течение десятков лет без замены.

Для объектов ракетно-космической техники, где ресурс и надежность являются основными требованиями, эта особенность весьма полезна, и определяет широкое применение аккумуляторов различных электрохимических систем в энергоустановках ракетно-космических комплексов.

Специфика аэрокосмической отрасли накладывает повышенные требования к плотности энергии электрохимических аккумуляторов. С этой точки зрения наиболее перспективными являются литий-ионные аккумуляторы. Однако этот тип аккумуляторов обладает рядом характерных недостатков. В первую очередь применение литий-ионных аккумуляторов ограничивается относительно низкими ресурсом и максимально допустимыми разрядными токами (табл. 1). Никель-кадмиевые аккумуляторы характеризуются меньшей по сравнению с литий-ионными плотностью энергии, но значительно опережают последние по ресурсу и максимальным разрядным токам.

Практика показывает, что ресурс электрохимических аккумуляторов определяется не только совершенством конструкции аккумулятора, но и условиями его эксплуатации, поскольку при проектировании энергоустановок, как правило, основное вни-

мание уделяется выходным характеристикам, а не обеспечению оптимального режима эксплуатации аккумуляторов.

В таких случаях проявляется снижение технического ресурса за счет ускорения процессов деградации аккумуляторов вследствие неблагоприятных условий эксплуатации, которое необходимо учитывать.

Изучение специфических особенностей деградации аккумуляторов при различных режимах эксплуатации позволяет определить факторы, влияние которых необходимо учесть при планировании ускоренных ресурсных испытаний электрохимических аккумуляторов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики аккумуляторов различных типов [1]

Параметры	Никель-кадмиевые	Литий-ионные
Плотность энергии (Вт·час/кг)	45-80	110-160
Внутреннее сопротивление, мОм	100-200	150-250
Ресурс, циклов до 80% номинальной емкости	1500	500 - 1000
Саморазряд за месяц (н.у.)	20%	10%
Нагрузочный ток в единицах емкости: –пиковый –оптимальный	20 1	2 или ниже 1 или ниже

## 1. Особенности эксплуатации электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок ракетно-космических летательных аппаратов

Аккумуляторы в ЭУ РКЛА могут эксплуатироваться как в качестве основного или резервного источника электропитания, так и в буферном режиме (рис. 1) [2-5].



Рис. 1. Области применения электрохимических аккумуляторов

При эксплуатации аккумулятора в качестве основного источника питания режимы эксплуатации различаются в основном мощностью нагрузки, питание которой должен обеспечить аккумулятор.

Аккумулятор в данном случае может эксплуатироваться в режиме малых, больших и средних токов с различной продолжительностью разряда (рис. 2) [2, 4].



Рис. 2. Режимы эксплуатации аккумуляторов в качестве основного источника электропитания

Режим коротких импульсов в чистом виде встречается редко. Наиболее распространенным является режим эксплуатации, сочетающий длительный разряд малыми либо средними токами и кратковременные импульсы больших или средних токов [2 – 5].

Для такого режима эксплуатации, особенно в области больших токов, характерны следующие деградационные процессы [1, 6 – 9]:

1. Прорастание сепаратора, приводящее к увеличению саморазряда и общему сокращению ресурса аккумулятора.

2. Развитие «эффекта памяти», связанного с ростом зерен активной массы и пассивацией поверхности электродов, и приводящего к снижению разрядной емкости.

3. Необратимое потребление кислорода, вызванное окислением органических компонентов активных масс и сепаратора и коррозией металлокерамической основы.

4. Разбухание никелевого электрода вследствие изменения его состава, газовой выделения и др., приводящее к повышению величины удельного сопротивления. Скорость разбухания практически постоянна во времени и резко возрастает с увеличением глубины циклирования.

5. Накопление избыточного давления, за счет выделения кислорода и водорода во время циклирования.

В качестве резервного источника электропитания, аккумулятор может эксплуатироваться в дежурном режиме с подзарядом и без него.

Кроме того, подзаряд может осуществляться, как непрерывно – малым («капельным») током, так и периодически (рис. 3).

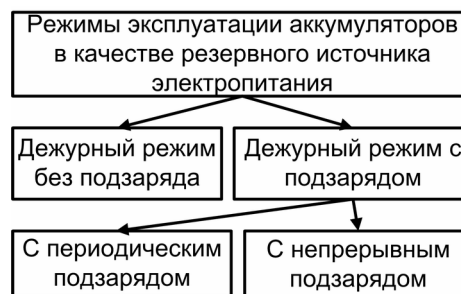


Рис. 3. Эксплуатация аккумуляторов в качестве резервного источника электропитания.

Для эксплуатации аккумулятора в дежурном режиме характерна длительная выдержка аккумулятора в заряженном состоянии, приводящая к развитию деградационного эффекта, аналогичного эффекту памяти. Этот эффект развивается более интенсивно при дежурстве с подзарядом за счет того, что подзаряд обычно осуществляется очень малым («капельным») током на верхнем пределе заряженности [1, 6, 8].

Эксплуатация никель-кадмиевых аккумуляторов в дежурном режиме с подзарядом приводит к развитию следующих деградационных эффектов [7, 10]:

1. Образование интерметаллидов кадмия ( $Ni_5Cd_{21}$ ), которое особенно интенсивно происходит при циклировании аккумуляторов с малой глубиной на верхних уровнях заряженности и при повышенных температурах, приводящее к трансформации разрядной кривой и падению напряжения разряда;

2. Возникновение утечек по мостикам из проводников первого рода с большим омическим сопротивлением, образующимся между электродами за счет загрязнения сепарационного материала соединениями кадмия.

При эксплуатации АК в режиме, непрерывного или периодического подзаряда, а так же при зарядно-разрядном циклировании развивается потеря разрядной емкости АК за счет снижения эффективности использования активной массы электродов, их пассивации и образования неактивных соединений. В ряде случаев, особенно это касается литий-ионных аккумуляторов, потеря емкости может быть вызвана механическим разрушением электродов.

Для эксплуатации аккумуляторов в режиме дежурства без подзаряда наибольшее значение имеет сохраняемость энергии. При дежурстве без подзаряда наиболее интенсивно развивается саморазряд электродов и сопутствующие ему процессы. Так заметное влияние на характеристики аккумулятора оказывает необратимое потребление кислорода, приводящее к окислению токопроводящих компонентов электродов. Таким образом, в результате саморазряда происходит:

1. Снижение заряженности электродов (с возможным разбалансом емкостей электродов);

2. Увеличение внутреннего сопротивления аккумулятора за счет окисления токопроводящих компонентов электродов;

3. Уменьшение количества эффективной активной массы за счет образования соединений, не участвующих в электрохимических реакциях.

Саморазряд электродов щелочных АК уменьшается с увеличением плотности электролита и увеличивается с ростом температуры. Так, при изменении температуры с 20 до 40°C увеличивает саморазряд НК АК приблизительно втрое [7], причем скорость роста тока саморазряда, приводящего к потере емкости, возрастает с увеличением температуры (рис. 5).

Представляется перспективным использование этого эффекта для целей ускоренных испытаний, так как управление температурой среды и термостабилизация при повышенных температурах не представляет сложности для современных испытательных средств, а эффективность ускоренного старения под воздействием повышенных температур, как показывает практика, очень высока.

Деграляция характеристик, развивающаяся в результате саморазряда аккумуляторов, необратима (разумеется, за исключением снижения заряженности электродов) и приводит к снижению технического ресурса аккумуляторов, однако, как показывает практика, скорость протекания необратимых процессов на порядок ниже скорости саморазряда электродов.

## 2. Влияние режимов на скорость деграляции электрохимических аккумуляторов

Как правило, в процессе эксплуатации АК испытывает воздействие отдельных групп факторов внешнего воздействия. Комплекс конкретных факторов, воздействию которых подвержен АК, прежде всего, зависит от специфики задач, для решения которых предназначена ЭУ. Так, решаемая задача определяет способ эксплуатации АК. Факторы воздействие окружающей среды в процессе штатной эксплуатации АК также могут быть различными для различных задач и конструктивных особенностей ЭУ.

Наибольшее влияние на электрохимическую систему оказывает температурный режим. Максимальный ресурс обеспечивается при эксплуатации в диапазоне температур 5...15°C [1,5,7,8]. Эксплуатация при более низкой температуре зачастую приводит к генерации водорода при больших разрядных токах. Эксплуатация при повышенных температурах вызывает увеличение скорости деградиационных реакций. При эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов протекают различные деградиационные процессы, которые и обуславливают фактический срок службы АК и батарей на их основе.

В работах [5, 6] на основе анализа орбитальной работы 36 батарей на геостационарных КА (общая наработка более 70 лет) делается заключение, что хотя и существует некоторая малая вероятность отказов катастрофического характера (т.е. внезапное прекращение функционирования БХ), но в подавляющем большинстве случаев происходит постепенное снижение выходного напряжения БХ с течением времени, особенно в конце разряда. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев, отказ БХ наступает вследствие постепенного накопления факторов негативного воздействия деградиационных процессов.

Пониженные температуры существенно снижают скорость химических реакций, что с одной стороны снижает эффективность электрохимической системы и негативно влияет на характеристики АК (рис. 4), с другой уменьшает интенсивность де-

градационных процессов, имеющих химическую природу.

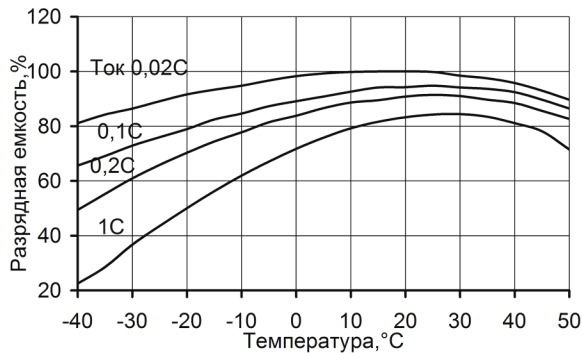


Рис. 4. Изменение разрядной емкости никель-кадмиевых аккумуляторов в зависимости от температуры и разрядного тока

Повышенные температуры оказывает обратный эффект – скорость деградации и токообразующих реакций увеличивается с ростом температуры (рис. 5). Особенностью воздействия колебаний температуры является накопление усталости в материалах конструкции АК [2, 9].

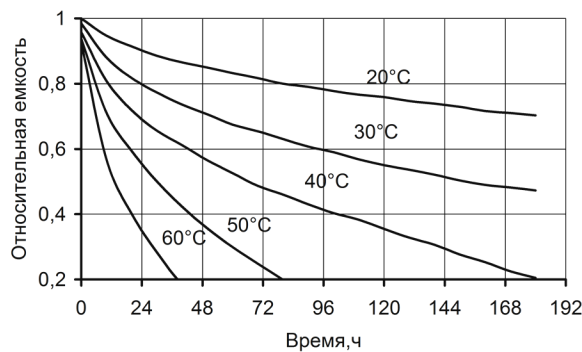


Рис. 5. Саморазряд никель-кадмиевых аккумуляторов при различных температурах [1, 8]

Менее очевидно влияние давления среды в зоне размещения АК на его характеристики. Изменение давления окружающей среды приводит к соответствующему изменению давления в газовом объеме АК. Для негерметичного АК величины изменения внешнего и внутреннего давлений будут одинаковы. Изменение внутреннего давления герметичных АК будет незначительным вследствие компенсации внешнего давления конструкцией корпуса. Изменение давления в газовом объеме АК приводит к изменению конечного напряжения заряда, что в свою очередь отражается на зарядной емкости АК. Сколько-нибудь значительное влияние изменения давления на скорость проте-

кания деградационных процессов замечено не было (рис. 6) [7 – 10].

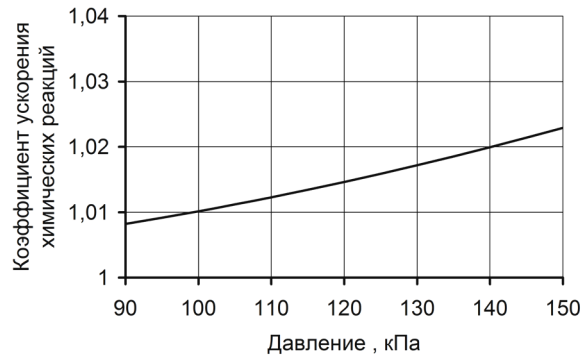


Рис. 6. Влияние давления в области стандартной атмосферы на скорость химических реакций в никель-кадмиевых аккумуляторах

На срок службы аккумуляторов сильное воздействие оказывает режим эксплуатации: режим и глубина разряда, режим заряда, длительность паузы между зарядом и разрядом при непрерывном циклировании, периоды эксплуатации и хранения.

На рис. 7 показано изменение величины наработки в циклах цилиндрических аккумуляторов стандартной серии в зависимости от глубины разряда.

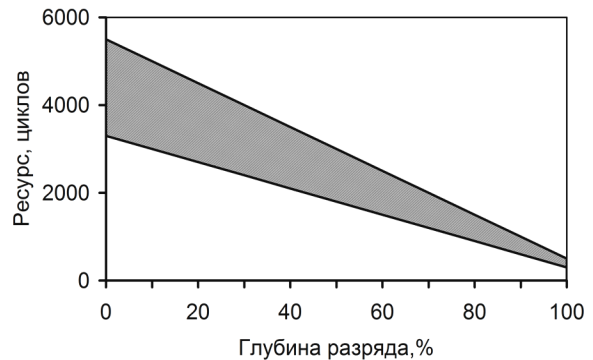


Рис. 7. Влияние глубины разряда при зарядно-разрядном циклировании на ресурс никель-кадмиевых аккумуляторов [8]

Литий-ионные аккумуляторы менее подвержены саморазряду, чем никель-кадмиевые. Количество циклов заряда-разряда также оказывает меньшее влияние на ресурс литий-ионного аккумулятора. Деградационные процессы в литий-ионных аккумуляторах протекают даже когда они находятся в состоянии покоя (например, при хранении).

Перезаряд заметно влияет на ресурс литий-ионных аккумуляторов (рис. 8), особенно при повышенных температурах.

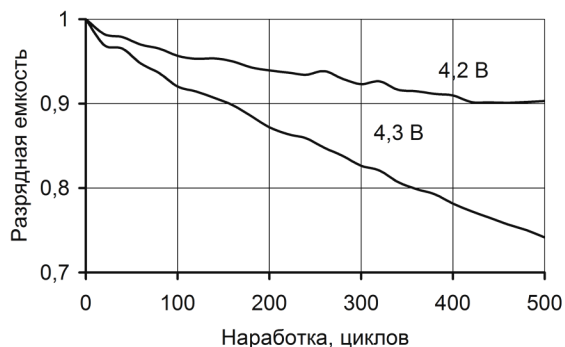


Рис. 8. Влияние граничного напряжения заряда на ресурс литий-ионных аккумуляторов при зарядно-разрядном циклировании [1, 8]

### Заключение

Скорость деградационных процессов зависит от воздействия на них различных факторов, наиболее значимыми из которых являются:

- температура;
- глубина зарядно-разрядного циклирования;
- конечное напряжение заряда;
- ток заряда;
- ток разряда;
- наличие примесей в электролите.

Результатом протекания деградационных процессов (рис. 9) является ухудшение характеристик аккумулятора с наработкой (временем), приводящее к истечению ресурса электрохимического аккумулятора.

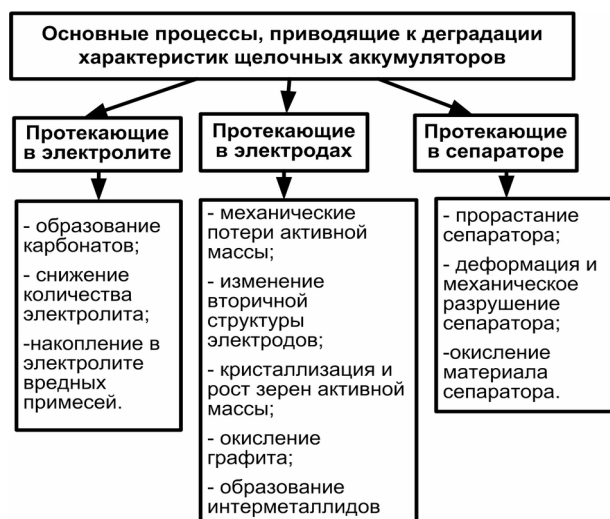


Рис. 9. Основные деградационные процессы, приводящие к истечению ресурса аккумуляторов

При планировании ускоренных ресурсных испытаний электрохимических аккумуляторов необходимо учитывать особенности их эксплуатации и температурный режим.

Для решения задач ускоренных ресурсных испытаний особенно полезной является сильно выраженная зависимость скорости деградации от температуры, позволяющая добиться существенного сокращения продолжительности испытаний.

### Литература

1. Buchmann I. *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. 2nd edition / I. Buchmann. – Cadex Electronics Inc. (PRD)/Cadex Electronics Inc., 2001. – 300 p.
2. Patel M.R. *Spacecraft power systems* / M.R. Patel // CRC Press, Boca Raton, New York, Washington D.C., 2008. – 734 p.
3. Захаров Л.Ф. Современная концепция построения систем электропитания [Электронный ресурс] / Л.Ф. Захаров // Специальная Техника. – 1999. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ess.ru/publications/articles/zahar/elpit.htm>.
4. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное» / Под общей ред. С.Н. Конохова. – Д.: ООО «КолорГраф», ООО РА «Тандем-У», 2001. – 240 с.
5. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей / Н. В. Белан, [и др.]: в 2 т. – Х.: ХАИ, 1992. – 451 с.
6. Malohn D.A. *1,5-kw solar dynamic space power system* / D.A. Malohn // Space power system engineering. – New York: Acad.Press. – 1966. – P.733-741.
7. Гинделис Я.Е. *Химические источники тока* / Я.Е. Гинделис. – Саратов: Изд-во Саратовского унта, 1984. – 264 с.
8. Таганова А.А. *Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник* / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. – СПб.: Химиздат, 2005. – 264 с.
9. Безручко К.В. *Влияние режимов работы НКГ-аккумулятора на его эффективность* / К.В. Безручко, И.В. Бычков, П.Ф. Бушманов // Конструирование и производство летательных аппаратов и двигателей: сб. науч. тр. – Х.:ХАИ, 1986. – С. 34-44.
10. Романов В.В. *Химические источники тока* / В.В. Романов, Ю.М. Хашев; 2-изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.

Поступила в редакцию 1.06.2009

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина,

**ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ  
У СКЛАДІ ЕНЕРГОУСТАНОВОК РАКЕТНО-КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ  
НА ЇХНІЙ РЕСУРС**

*О.Л. Азарнов, С.В. Ширінський, К.В. Безручко*

Розглянуті деградаційні процеси, що приводять до закінчення ресурсу акумуляторів (досягненню граничного стану), а так само прискорювальних факторів, що визначають інтенсивність цих процесів. Ціль дослідження полягає у розробці теоретичного обґрунтування методу прискорених ресурсних випробувань. У статті вирішуються задачі визначення деградаційних процесів, характерних для різних режимів експлуатації електрохімічних акумуляторів в енергоустановках ракетно-космічних літальних апаратів і вибору способів їхній керованого прискорення за допомогою зовнішнього впливу.

**Ключові слова:** електрохімічний акумулятор, ресурс, режим експлуатації, деградаційний процес, деградація характеристик, фактор зовнішнього впливу, прискорені ресурсні випробування.

**INFLUENCE OF ELECTROCHEMICAL ACCUMULATORS OPERATIONAL MODES  
IN POWER UNITS OF SPACE CRAFTS AND ROCKETS  
ON THEIR LIFETIME**

*A.L. Azarnov, S.V. Shirinsky, K.V. Bezruchko*

The processes of degradation leading to the resource expiration of accumulators (achievement of a limiting condition), and as the accelerating factors defining intensity of these processes are considered. The research objective consists in working out of a theoretical substantiation of a method of the accelerated resource tests. In article definition problems degradation processes, characteristic for various modes of operation of electrochemical accumulators in энергоустановках space-rocket flying machines and a choice of ways of their operated acceleration by means of external influence are solved.

**Keywords:** the electrochemical accumulator, a lifetime, an operation mode, degradation process, degradation of characteristics, the factor of the external influence, the accelerated resource tests.

**Александр Леонидович Азарнов** – старший научный сотрудник лаборатории автономной энергетики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [AutonomEnergy@khai.edu](mailto:AutonomEnergy@khai.edu).

**Ширинский Семен Владимирович** – научный сотрудник лаборатории автономной энергетики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [neuromaner@list.ru](mailto:neuromaner@list.ru).

**Безручко Константин Васильевич** – доктор технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории автономной энергетики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [AutonomEnergy@khai.edu](mailto:AutonomEnergy@khai.edu).