

УДК 621.355.8.002

# **ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ГЕРМЕТИЧНЫХ НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ**

**В.В. Теньковцев, Б.А. Борисов, И.В. Морозова, Л.С. Надёжина, Ю.Н. Дудина**

*ОАО «НИИАИ "Источник"», Санкт-Петербург, Россия  
Санкт-Петербургский государственный технический университет, Россия*

Поступила в редакцию 28.11.05 г.

Исследовано влияние основных эксплуатационных режимов, типичных для буферных аккумуляторных батарей, работающих в системах питания космических аппаратов, на стабильность и энергоотдачу герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов комплектованных указанными батареями. Показано, что стабильность характеристик буферных аккумуляторных батарей обеспечивается только при достаточно высоких коэффициентах использования их фактических характеристик по ёмкости при глубине циклирования, приближающейся к предельной.

The influence of the main typical exploitation regimes on capacity was investigated for buffer accumulator batteries working in the power system of space shuttles. The influence of the main typical exploitation regimes was investigated for buffer accumulator batteries working in the power systems of space shuttles. Stability of the battery characteristics was shown to exist only at enough high discharge coefficients while charge-discharge cycle should be at around the limit values.

Герметичные никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи на их основе обладают высокими удельными характеристиками и неоспоримыми преимуществами, позволяющими использовать их в системах питания космических аппаратов с обеспечением полной герметичности в течение всего срока службы.

Однако специфика длительной эксплуатации в составе системы электропитания космического аппарата (СЭП КА) требует постоянного наличия в буферной химической аккумуляторной батарее (БХБ) своего рода «неприкосновенного запаса ёмкости» для использования его в случае возникновения непредвиденных аварийных ситуаций. Это требование, как правило, реализуется в составе СЭП КА за счёт комплектации её БХБ, обладающими избыточной по отношению к основному эксплуатационному режиму ёмкостью, практически не используемой в ходе штатной эксплуатации изделия. Фактическая величина этого «запаса» колеблется для разных типов КА от 10 до 80% номинальной ёмкости БХБ.

Таким образом, в реальных условиях эксплуатация БХБ в составе СЭП КА проводится при коэффициентах использования фактической ёмкости БХБ в основном на уровне 10–20% от фактической. Однако практика показывает, что такой режим оказался крайне неблагоприятным для обеспечения стабильности электрических характеристик БХБ при длительной эксплуатации.

Из литературных данных известно, что эксплуатация герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов при низких коэффициентах использования фактической ёмкости «режим мелкого циклирования» ведёт в ряде случаев к значительным изменениям электрических характеристик. Так, в герме-

тичных никель-кадмиевых аккумуляторах с металлокерамическими электродами в этих случаях возникает так называемый «эффект памяти», выражающийся в значительном снижении разрядной ёмкости аккумулятора при переходе к режиму более глубокого циклирования. Последнее связано с образованием на кадмиевом электроде при длительной эксплуатации в режиме мелкого циклирования интерметаллида состава  $\text{Ni}_5\text{Cd}_{21}$  [1]. Потенциал этого соединения при анодном окислении смещен в сторону положительных значений от потенциала кадмиевого электрода на 200 мВ, что ведет к резкому снижению ёмкости, отдаваемой кадмиевым электродом при разряде его в рабочем диапазоне напряжений никель-кадмиевого аккумулятора. Это приводит к появлению на разрядной кривой второй площадки, в диапазоне напряжений 1.1–0.9 В, отвечающей разряду образовавшегося интерметаллида. Появление в активном материале кадмиевого электрода интерметаллида указанного состава и его идентификация методами рентгеновского анализа были впервые зафиксированы В.И. Левиной и С.А. Розенцвейг [2] и подтверждены позднее Т. Кромптоном [3]. Следует отметить, что согласно литературным данным [4] кроме указанного интерметаллида в процессе работы кадмиевого электрода возможно образование в активном материале интерметаллидов ( $\text{NiCd}$ ,  $\text{NiCd}_4$ ,  $\text{NiCd}_5$ ,  $\text{NiCd}_7$  и др.), образование которых происходит в зависимости от условий эксплуатации, типа и характера активного материала. Однако разряды аккумулятора до напряжений ниже 1.0 В ведут к разрушению образовавшихся интерметаллидов и восстановлению формы разрядной кривой [5]. Образование интерметаллида можно избежать при

систематических разрядах аккумулятора ниже 1.0 В или применения в аккумуляторе отрицательных электродов без металлокерамической основы. Последнее в настоящее время реализовано в аккумуляторах типа НКГК, широко используемых при комплектации БХБ КА различного назначения.

Вторым фактором, ограничивающим ёмкость герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов типа НКГК при эксплуатации их в режимах «мелкого циклирования», является пассивация активной массы кадмиевого электрода. Процесс пассивации сводится, как правило, к увеличению внутреннего сопротивления аккумуляторов в связи с образованием в ходе длительного циклирования на поверхности активного материала плотных пассивационных слоёв гидроксида кадмия, препятствующих свободному доступу электролита и кислорода к активной массе кадмиевого электрода с соответствующим сдвигом в сторону положительных значений потенциала и затруднением протекания электрохимических процессов поглощения кислорода из газовой фазы.

Процесс пассивации сопровождается трансформацией зарядной кривой с резким увеличением ее крутизны и ростом конечного зарядного напряжения вплоть до выхода потенциала кадмиевого электрода на величину, отвечающую выделению водорода. В этом случае восстановление нормального хода зарядной кривой требует проведения не менее 2–3 циклов с разрядом аккумулятора при конечном разрядном напряжении в пределах 0.8–0.9 В, что также выходит за пределы разрядных напряжений никель-кадмиевого аккумулятора при эксплуатации его в составе существующих изделий. Следует отметить, что нормальный ход разрядной кривой и нормальные значения разрядной ёмкости полностью восстанавливаются после проведения нескольких зарядно-разрядных циклов на полную глубину.

Представители Саратовской школы электрохимиков предлагают газокинетическую теорию пассивации кадмиевого электрода при использовании его в составе герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов. По их мнению, в данном случае процесс связан с образованием на поверхности электрода локальных участков, заполненных и насыщенных кислородом в условиях недостаточного уплотнения межэлектродного пространства, что приводит к снижению интенсивности процесса окисления кадмия и влечет за собой выход потенциала электрода на уровень разряда водорода [6].

Изменение зарядно-разрядных характеристик герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов типа НКГК в условиях эксплуатации при низких коэффициентах использования фактической ёмкости достаточно детально исследовалось нами на этапах опытно-конструкторских разработок по созданию аккумуляторов типа НКГК и их использования в космической технике [7, 8]. При этом было установ-

лено, что основной вклад, отражающий процесс деградации характеристик при низких коэффициентах использования фактической ёмкости аккумуляторов, вносит отрицательный электрод за счет быстрого увеличения при циклировании в ходе заряда величины поляризационной составляющей внутреннего сопротивления с соответствующим увеличением крутизны зарядной кривой и ростом конечного зарядного напряжения.

На рис.1 представлены изменения потенциалов кадмиевого электрода герметичного никель-кадмиевого аккумулятора в ходе заряда его током  $0.1 C_{\text{ном}}$  при коэффициенте использования фактической ёмкости в пределах 10% от номинальной величины в ходе испытаний на срок службы. Приведенные кривые свидетельствуют о резком увеличении поляризационной составляющей внутреннего сопротивления при эксплуатации, ведущей к значительному сокращению зарядной (а следовательно, и разрядной) ёмкости электрода при длительном циклировании при низких коэффициентах использования фактической ёмкости. Полученные кривые сняты по отношению к размещенному внутри аккумулятора полужаряженному окисно-никелевому электроду сравнения. Выбор такого электрода обусловлен его достаточно стабильным в условиях эксперимента потенциалом, не зависящим от состава газовой фазы при малых количествах электролита.

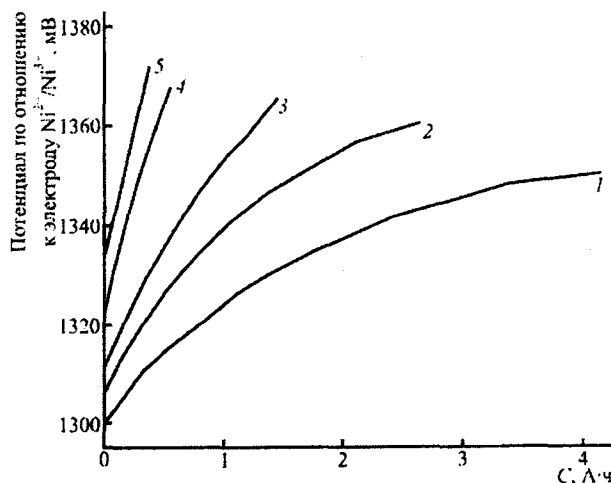


Рис. 1. Зарядные кривые кадмиевого электрода аккумуляторов типа НКГК при разряде на 10–15% его фактической ёмкости 1 – 3-й цикл, 2 – 60-й цикл, 3 – 140-й цикл, 4 – 200-й цикл, 5 – 650-й цикл

При низких коэффициентах использования фактической ёмкости в процесс циклирования включается только сравнительно небольшая часть активного материала электродов, а основная часть находится практически в режиме хранения при достаточно высоком уровне заряженности. Это не может не сказаться на характеристиках и контрольных параметрах процесса при таких режимах. На рис.2

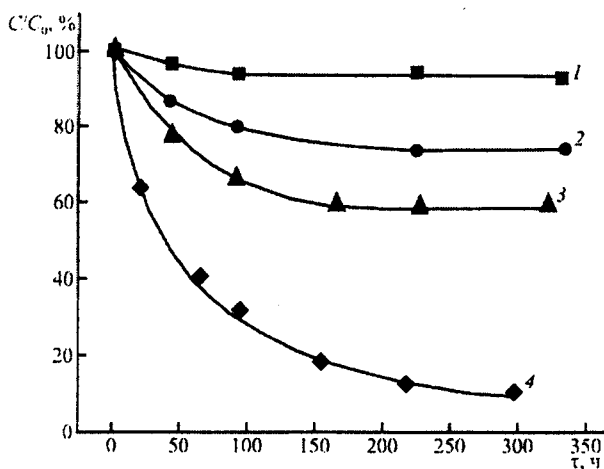


Рис. 2. Снижение ёмкости в процессе эксплуатации аккумуляторов при циклировании на различном уровне использования фактической ёмкости, %: 1 – 95–100, 2 – 75–80, 3 – 55–60, 4 – 10–15

приведены данные по результатам длительной эксплуатации аккумуляторов в режимах СЭП КА при разных коэффициентах использования их фактической ёмкости. Представленные данные свидетельствуют о достаточно стабильных характеристиках по ёмкости при глубине циклирования близкой к 100% фактической ёмкости и сравнительно быстрому снижению ёмкости при уменьшении глубины циклирования. Таким образом, на стабильность характеристик в процессе длительной эксплуатации можно рассчитывать только в случае достаточно глубокого режима циклирования, обеспечивающего задействование в процессе всей основной массы активного материала.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

В реальных системах питания космических аппаратов эксплуатация буферных аккумуляторных батарей ведется, как правило, на верхнем уровне заряженности аккумуляторов, что обеспечивается проведением заряда с ограничением длительности по датчикам давления или напряжения, при максимальном уровне заряженности аккумуляторов, а разряд проводится стабильным током, соответствующим потреблению аппаратуры изделия в основном режиме при длительности разряда в соответствии с графиком нагрузки. В ходе испытаний для оценки влияния на стабильность характеристик батареи глубины циклирования разряд в ходе испытаний производился при различных коэффициентах использования фактически заложенной в аккумулятор ёмкости от 10 до 100%. Как видно из данных, приведённых на рис. 2, стабильность характеристик аккумулятора в существенной степени зависит от коэффициента использования фактически заложенной в аккумулятор ёмкости. Снижение ёмкости за счёт уменьшения глубины циклирования определяется, очевидно, пассивацией части активного мате-

риала, не принимающего участия в циклировании из-за ограничения глубины разряда. Последнее подтверждается практически полным восстановлением характеристик аккумулятора на первом же цикле при увеличении глубины разряда с учетом обеспечения конечного разрядного напряжения батареи на уровне порядка 1.0–1.10 В на аккумулятор (рис. 3).

Примером СЭП, эксплуатируемой в составе космических аппаратов уже более 35 лет, может служить система электропитания на Международной космической станции (МКС), в состав которой входит БХБ – «блок 800А». Блок 800А состоит из 22 герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов ёмкостью 90 А·ч, работающих в режиме непрерывного циклирования совместно с солнечным генератором (заряд БХБ) при параллельном подключении потребляющей аппаратуры (разряд БХБ). СЭП МКС имеет в своем составе 8 блоков 800А, каждый из которых подключён к блоку автоматики, обеспечивающему контроль и управление блоком 800А в системе СЭП в зависимости от уровня напряжения, состояния датчиков давления, значения температуры окружающей среды и токов заряда и разряда. При этом каждый из блоков 800А может работать автономно или параллельно с другими одноименными блоками 800А, обеспечивая высокую надежность и управляемость системой.

Для обеспечения наличия в системе необходимого аварийного запаса ёмкости циклирование БХБ ведется с использованием в цикле (заряд-разряд) 15–20% фактической ёмкости. Суммарный энергоёмкость ежесуточно при 16 зарядно-разрядных циклах составляет, как правило, 250–300 А·ч с каждого блока.

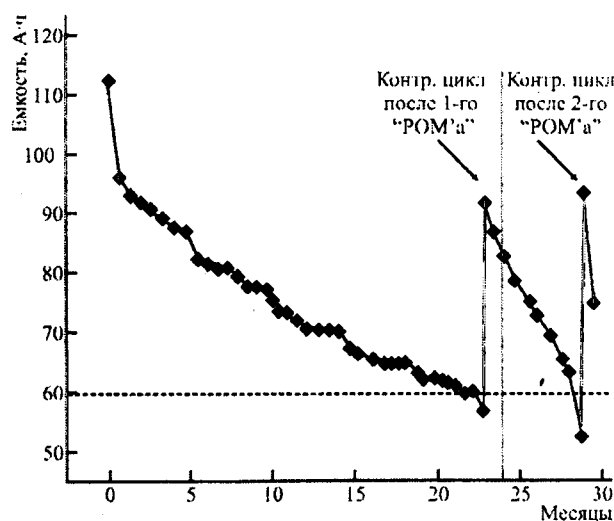


Рис. 3. Ресурсные испытания блока 800А в режиме СЭП МКС: 1-й контрольный цикл (ПОМ) – через 22.5 месяца эксплуатации; 2-й контрольный цикл (ПОМ) – через 29 месяцев эксплуатации. Суммарная наработка за время ресурсных испытаний составила 15000 циклов при суммарном энергоёмкости с блока 187500 А·ч в режиме циклирования по 16 циклов в сутки. Испытания в режиме циклирования СЭП МКС продолжаются

При заданном режиме за два года непрерывного циклирования ёмкость БХБ не должна снизиться более, чем до 60 А·ч на блок.

Специфические требования эксплуатационного режима, низкий коэффициент использования фактической ёмкости БХБ существенно ухудшают эксплуатационные характеристики и требуют проведения специальных реанимационно-восстановительных циклов. Как следует из вышеизложенного, в основу таких циклов в первую очередь рационально поставить увеличение глубины циклирования [7]. Опыт эксплуатации СЭП МКС подтвердил эффективность периодических проведений разрядов БХБ до срабатывания датчика минимального напряжения с целью повышения стабильности их характеристик при длительной эксплуатации. Эти операции в виде двух последовательных циклов с принудительным разрядом блоков до 24.0 В уже введены в действующую документацию с периодичностью два раза в месяц. Кроме того, при снижении ёмкости на блоках ниже 60 А·ч действующей документацией предусмотрено проведение поэлементного глубокого разряда блока 800А (так называемый РОМ – разряд отключенного модуля) на определённое сопротивление и время. Проведение РОМ обеспечивает, кроме восстановления электрических характеристик аккумуляторов, выравнивание за счет глубокого разряда уровня остаточной ёмкости на всех аккумуляторах с приведением ее к предельно низкому значению.

На рис.3 представлены результаты ресурсных испытаний блока 800А в режимах эксплуатации батареи в составе СЭП МКС в течение 30 месяцев непрерывного циклирования с проведением первого РОМ через 22.5 месяца испытаний и второго РОМ – через 29 месяцев циклирования. При этом первый реанимационный цикл (РОМ) обеспечил восстановление ёмкостных характеристик блока с 58 до 92 А·ч, а второй РОМ привёл к восстановлению характеристик с уровня 60 до 93 А·ч.

Представленные данные свидетельствуют о достаточно высокой эффективности периодического проведения в ходе циклирования глубоких разрядов батарей и стабильном характере восстановления их рабочих характеристик. Полученные результаты подтвердили возможность продления эксплуатации батарей за пределами гарантированных сроков службы с учетом включения в режим эксплуатации проведения глубоких разрядов блоков буферных батарей (режим РОМ). В настоящее время указанный режим штатно введен в действующую эксплуатационную документацию СЭП МКС. Повышение стабильности разрядных характеристик буферных аккумуляторных батарей при увеличении коэффициента использования заложенной в них емкости (см. рис. 2) позволяет рассчитывать на увеличение их удельных характеристик по ёмкости и стабиль-

ности разрядных характеристик за счет увеличения глубины циклирования в ходе эксплуатации. Основным фактором, препятствующим этому, является требование наличия в системе постоянного запаса ёмкости на случай возникновения аварийных ситуаций. Такой аварийный запас, как указывалось выше, создается, как правило, за счет использования в системе батарей с заведомо завышенной фактической ёмкостью. Однако наличие такого аварийного «запаса» автоматически приводит к циклированию батареи в режимах недоразряда, т.е. к варианту эксплуатации в режиме «мелкого циклирования».

Устранение этого противоречия позволяет решить проблему при использовании модульной схемы эксплуатации БХБ, входящей в состав СЭП основного изделия. Подобная схема опробована и оправдала себя в составе СЭП МКС. Как уже говорилось выше, в состав БХБ СЭП МКС входят 8 блоков 800А, каждый из которых эксплуатируется автономно, что позволяет, не прекращая штатной эксплуатации СЭП, проводить на отдельных модулях (блоках 800А) разряды до минимального напряжения, включая проведение РОМ.

Наиболее удачный вариант такой системы эксплуатации БХБ в составе СЭП КА отражён в [9]. Указанная система предусматривает наличие в ней не менее трёх групп батарейных модулей. При этом первая группа модулей предполагает использовать её при работе в буферном режиме с основным генератором тока с обеспечением работы всей СЭП. Вторая группа модулей в ходе эксплуатации изделия работает в режиме непрерывного подзаряда малым током с возможностью подключения параллельно с первой группой в любое время, обеспечивая соответствующее увеличение потребления электроэнергии в случаях возникновения аварийных ситуаций или запланированного повышения нагрузки. Третья группа модулей является резервной и хранится в изделии в полностью разряженном состоянии с возможностью подключения её к системе по первому сигналу о предполагаемом увеличении нагрузки с учётом проведения заряда модулей, задействованных в системе.

Независимое задействование автономно одного или нескольких модулей создаёт возможность гибкого регулирования работы системы при оптимизации эксплуатационных режимов и возможность проведения в случае необходимости частных программ по системе электропитания изделия.

Особо следует отметить идентичность конструкции и электрических характеристик всех модулей системы и возможность их взаимозаменяемости. Длительность проведения РОМ со снятием остаточной ёмкости при закорачивании борнов аккумуляторов не превышает, как правило, одного часа при конечном разрядном напряжении порядка 0.1–0.2 В на аккумулятор. Однако указанная длительность

соответствует закорачиванию аккумуляторов по борнам непосредственно на 0.75 Ом. В реальных условиях фактическая длительность должна корректироваться с учетом суммарного сопротивления коммуникационных цепей. Как показывает опыт, при РОМ в условиях проведения ресурса для достижения уровня разряженности аккумуляторов до напряжения 0.1–0.2 В в реальных условиях эксплуатации длительность доразрядов должна быть увеличена как минимум до 1 суток.

Следует отметить, что приведенные выше положительные результаты по восстановлению при РОМ ёмкости буферных батарей в системе энергоснабжения космических аппаратов могут быть реализованы только при условии отсутствия в батареях отдельных дефектных аккумуляторов, ёмкость которых заметно отличается от ёмкости основного комплекта аккумуляторов. Такие аккумуляторы могут оказаться в составе батареи из-за недостаточно тщательного подбора аккумуляторов при сборке батареи, а также в результате появления в ходе длительной эксплуатации межэлектродных утечек по проводникам первого рода [10], возникшим из-за диспергирования активного материала. В связи с этим контроль на отсутствие межэлектродных утечек при сборке батарей, рассчитанных на большой срок службы, должен быть резко ужесточён. Существующие методы контроля основаны, как правило, на контроле восстановления НРЦ, глубоко разряженных путём короткого замыкания токовыводов аккумуляторов определённым омическим сопротивлением на достаточно длительное время. Спонтанное восстановление НРЦ после удаления замыкающего сопротивления до уровня 1.15–1.20 В в течение 2–3 суток свидетельствует об отсутствии межэлектродных утечек, особенно, если величина НРЦ не имеет тенденции к снижению в течение 10 суток.

Таким образом, предложенные и проверенные на практике меры – периодическое проведение в ходе эксплуатации РОМ и ужесточение контроля межэлектродных микроутечек – позволяют рассчитывать на стабилизацию характеристик аккумуляторов при длительной эксплуатации их в составе СЭП космических аппаратов при значительном увеличении срока службы каждого комплекта аккумуляторных батарей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о высоком уровне стабильности характеристик герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов при длительной эксплуатации их в буферном режиме в качестве накопителей энергии в системах автономного питания космических аппаратов. Временное снижение стабильности их характеристик за счёт вынужденного отступления от оптимальных условий эксплуатации легко устраняется проведением одного–двух восстановительных циклов в оптимальном зарядно-разрядном режиме. 30 месяцев эксплуатации в режиме непрерывного циклирования при 16 циклах в сутки и практической неизменности электрических характеристик на контрольных циклах позволяют рассчитывать на значительное увеличение срока службы каждого комплекта аккумуляторных батарей и высокий уровень надёжности при выполнении буферных батарей в модульном варианте, обеспечивающем периодическое увеличение глубины циклирования до максимума в течение одного–двух циклов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теньковцев В.В., Болдин Р.В., Акбулатова А.Д., Слободская Т.Д. // Сб. работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия, 1969. Вып.4. С.56.
2. Левина В.И., Розенцвейг С.А. // Материалы межвуз. науч. совещ. по электрохимии. Новочеркасск, 1966. С.53.
3. Кромптон Т. Вторичные источники тока. М.: Мир, 1985.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. М.: Машиностроитель, 1996. Т.1.
5. Болдин Р.В., Акбулатова А.Д., Карпова Ф.Ф. // Сб. работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия, 1975. Вып.10. С.177.
6. Хамская Е.А. Макрокинетика кислородного и водородного циклов герметичных аккумуляторов: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Саратов, 2001. 33 с.
7. Теньковцев В.В., Борисов Б.А., Ткачёва А.Ш. // Исследования в области электрохимической энергетики. Л.: Энергоатомиздат, 1989. С.59.
8. Теньковцев В.В., Центер Б.И. Основы теории и эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
9. А.с. 1050503 СССР. Способ эксплуатации системы аккумуляторов батарей.
10. Теньковцев В.В., Борисов Б.А., Надёжина Л.С. // ЖПХ. 1995. Т.68, вып.7. С.1126.