

УДК 621.355.1

К.В. Безручко¹, С.В. Губин¹, А.О. Давидов¹, В.П. Фролов², А.А. Харченко¹¹*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*²*Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля*

ПУТИ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Рассмотрены теоретические и практические аспекты продления ресурса щелочных никель-кадмиевых аккумуляторов применяющихся в ракетно-космической технике в режимах длительной эксплуатации. Представлены результаты совместных научных исследований Национального аэрокосмического университета «ХАИ» и Государственного конструкторского бюро «Южное» (ГКБЮ) по развитию методов повышения емкости щелочных аккумуляторов путем восстановления их разрядной емкости после назначенного ресурса.

аккумулятор, емкость, диагностика, восстановление, ресурс, прогнозирование

Введение

Надежность космических аппаратов (КА) и ракет, их обеспечивающих систем и устройств во многом зависит от работоспособности систем энергоснабжения (СЭС) этих объектов. Наиболее важными элементами СЭС, определяющими её ресурс, являются электрохимические накопители энергии (аккумуляторы (АК), батареи (БХ)).

Известно, что со временем, независимо от дежурного или циклического режимов работы, происходит частичная или полная деградация аккумуляторных батарей, основными проявлениями которой является уменьшение фактической емкости, увеличение зарядного и уменьшение разрядного напряжения, изменение физического состояния.

Простая замена деградировавших электрохимических АК и батарей для ракет, находящихся на дежурстве либо хранении, не рациональна из-за высокой стоимости аккумуляторных батарей. Условия эксплуатации КА

вообще исключают возможность замены БХ в процессе работы КА. В связи с этим особую актуальность имеют исследования по продлению и подтверждению ресурса электрохимических АК и БХ, применяющихся на указанных объектах ракетно-космической техники (РКТ).

Известны исследования в области восстановления деградировавших электрохимических АК и продления их ресурса, проводящиеся в организациях Украины (ХАИ [1 – 4], Днепропетровском химико-технологическом университете, ГKB «Южное»), России (НИАИ, г. С.-Петербург), Канаде (фирма Cadex) и др.

1. Концепция исследований

В лаборатории автономной энергетики ХАИ накоплен значительный опыт по определению и продлению ресурса щелочных АК и БХ, работающих в составе систем энергоснабжения космических аппаратов, ракетно-космических комплексов и других автономных объектов. Комплекс

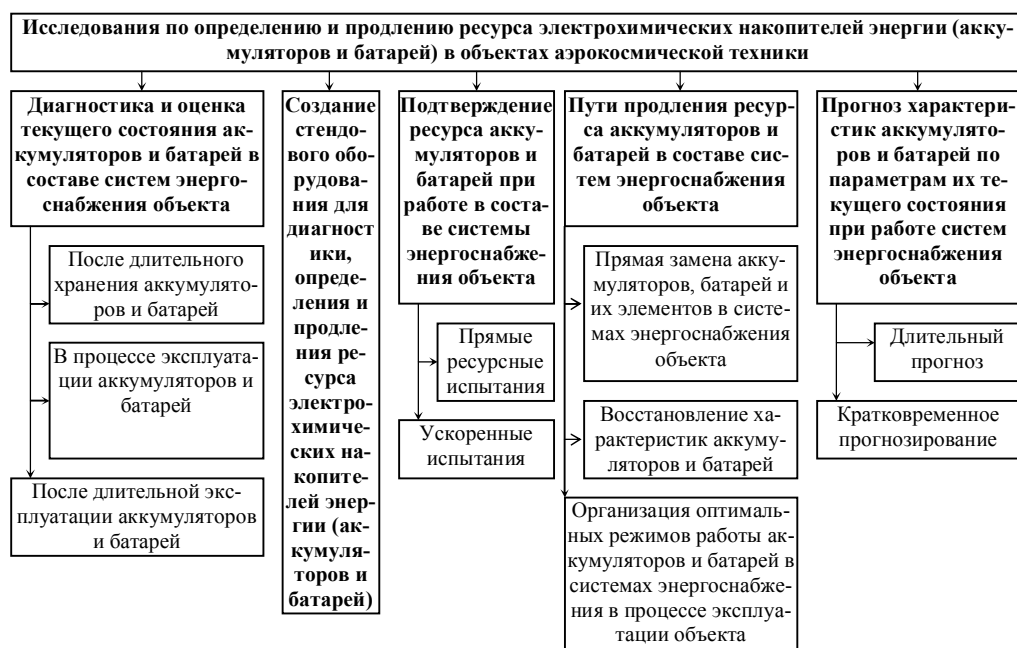


Рис. 1. Основные этапы комплекса исследований по определению и продлению ресурса электрохимических накопителей энергии в объектах аэрокосмической техники

исследований ХАИ базируется на поиске и разработке эффективных методов восстановления деградировавших АК и БХ, организации рациональных режимов эксплуатации АК и БХ в составе изделия, а также в создании для указанных целей специализированного экспериментального оборудования и исследовательских стендов.

На рис. 1 показаны основные этапы комплекса исследований по определению, подтверждению и продлению ресурса электрохимических накопителей энергии.

2. Объекты исследований

Объектами исследований являются единичные никель-кадмиевые аккумуляторы различных типоразмеров емкостью от 2 до 200 А·ч герметичного и негерметичного исполнения, а также аккумуляторные батареи на их основе (табл. 1 и рис. 2, 3).

Таблица 1

Герметичные и негерметичные никель-кадмиевые АК и БХ

Изделие	Тип	Наименование
Аккумуляторы	Герметичные	НКГЦ-2, НКГ-4СК, НКГ-11, НКГ-30 СА, НКГ-110 КА, НКГ-200.
	Негерметичные	НК-13, НК-14, НК-28, НК-55, НК-80, НК-90.
Батареи	Герметичные	22НКГ-45Б, 22НКГ-4СК, 22НКГ-110СКА.
	Негерметичные	10НК-28, 27НК-28, 27НК-90.



Рис. 2. Герметичные щелочные химические аккумуляторы НКГ-11, НКГ-45, НКГ-110КА, НКГ-110 СКА, НВ-130

Представленные АК и БХ применяются в различных изделиях РКТ как в герметичном состоянии, основанном на замкнутом кислородном цикле, так и в герметизированном состоянии с отводом газов в атмосферу. Разнообразие условий и режимов работы аккумуляторов определило и различные подходы к методам их восстановления и продления ресурса.

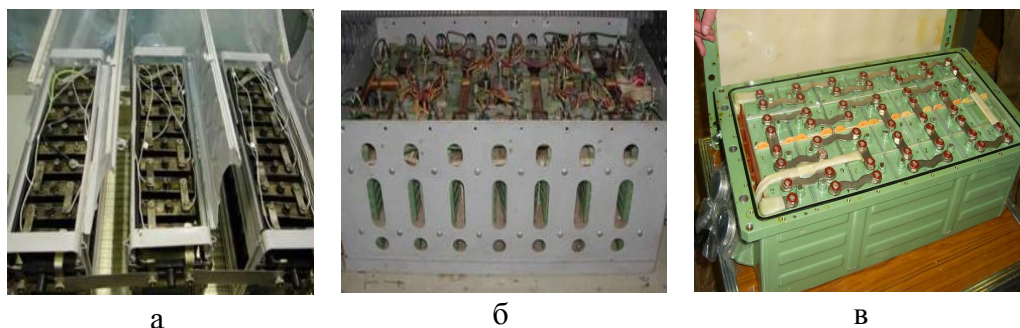


Рис. 3. Химические аккумуляторные батареи:
а – 3 батареи 10 НК-28; б – батарея 22НКГ-110 СКА; в – батарея 27НКГ-90

3. Диагностика электрохимических накопителей энергии

Диагностика электрохимических накопителей энергии проводится при определении их текущего состояния на различных этапах эксплуатации РКТ, при плановых тестированиях, при кратковременном и длительном прогнозировании работы АК и БХ в составе СЭС (см. рис. 1).

В задачу диагностики состояния аккумуляторов входят: определение зарядной и разрядной емкостей, зарядно-разрядных характеристик; определение внутреннего сопротивления АК, качества электролита и др.

Разработанные в ХАИ методики диагностирования АК и БХ основаны на методах математического моделирования и созданном специализированном диагностическом оборудовании (рис. 4).

4. Методы восстановления АК и БХ

Установлено, что после многолетней (а иногда и нескольких месяцев) эксплуатации емкость аккумуляторов уменьшается до 30...40 %. В результате выполненных в ХАИ теоретических исследований и анализа процессов, протекающих в щелочных аккумуляторах, выделены основные процес-

сы [3], приводящие к деградации эксплуатационных характеристик отдельных АК и БХ в целом (табл. 2).

Таблица 2

Классификация деградационных процессов,
протекающих в аккумуляторах и возможные методы
восстановления эксплуатационных характеристик аккумуляторов

Причины деградации	Методы восстановления
Кристаллизация активной массы Изменение вторичной структуры электродов Рост зерен активной массы	- замена калиевого электролита на натриевый; - заряд асимметричным током; - воздействие на активную массу ультразвуком.
Образование карбонатов	- замена электролита.
Уменьшение количества электролита	
Вредные примеси в электролите	
Неравномерное распределение электролита по высоте электродов	
Образование интерметаллидов	- глубокий разряд ступенчатым током.
Прорастание сепараторов	- воздействие на активную массу ультразвуком; - глубокая переполусовка в разгерметизированном состоянии.
Пассивация (окисление) поверхности электродов	- глубокий разряд ступенчатым током; - замена калиевого электролита на натриевый.

Предложены возможные методы устранения деградационных процессов в аккумуляторах и восстановления их характеристик (рис. 4). Эти методы апробированы в лаборатории автономной энергетики ХАИ.

Рассмотрим воздействие исследованных методов восстановления (рис. 4) щелочных аккумуляторов, деградировавших в процессе эксплуатации.



Рис. 4. Методы восстановления аккумуляторов и батарей

Метод восстановления аккумуляторов путем заряда асимметричным импульсным током основан на использовании переменного тока с разными величинами амплитуд тока и длительностей импульсов обоих направлений (рис. 5).

Увеличение емкости при заряде аккумулятора асимметричным током происходит благодаря более эффективному окислению положительного (окисно-никелевого) электрода. При проведении импульсных режимов задается частота импульса. При увеличении частоты происходит изменение характера переднего и заднего фронтов импульса тока и соответственно напряжения аккумулятора. Величины амплитуд импульсов тока заряда и разряда определяются таким образом, чтобы получить оптимальное соотношение «время заряда/мощность зарядного устройства» и «время заряда/технико-эксплуатационные характеристики аккумулятора».

Оптимальной величиной соотношения импульсов заряда и разряда ($K_I = I_3 / I_P$) является такая его величина, при которой напряжение на

аккумуляторной батарее в течение паузы после импульса разряда остается постоянным. Оптимизация соотношения величин зарядного и разрядного импульсов приводит к снижению тепловыделения, а, следовательно, к возможности заряда большими токами и ускорению заряда ($K_{Ionm} = 3...10$).



Рис. 5. Форма асимметричных импульсов при восстановлении емкости аккумуляторов

Время паузы между импульсами необходимо определять с учетом окончания переходных процессов в коммутируемой цепи. Оптимальными величинами соотношений длительности зарядного и разрядного импульса является $K_\tau = \tau_з / \tau_р \approx 0,5$; $K_{зТ} = \tau_з / T = 0,1...0,5$.

Метод восстановления аккумуляторов путем глубокого разряда ступенчатым током является эффективным для избавления от наиболее распространенной причины падения емкости никель-кадмиевых аккумуляторов – эффекта "памяти". Эффект "памяти" это результат роста зерен активной массы аккумулятора, который возникает вследствие неблагоприятного для аккумулятора режима работы. Разрядная характеристика аккумулятора при ступенчатом разряде может быть описана выражением:

$$U_{акк} = \left(U_0 - \frac{Q}{Q_0 - Q} I \cdot r \right) - I \cdot r$$

где $U_{акк}$ – текущее напряжение на аккумуляторе;

U_0 – напряжение разомкнутой цепи аккумулятора;

Q – снятая с аккумулятора емкость;

Q_0 – разрядная емкость аккумулятора;

I – текущий разрядный ток;

r – внутреннее сопротивление аккумулятора.

На рис. 6 представлен пример разрядной характеристики никель-кадмиевого аккумулятора при глубоком разряде ступенчатым током (получена в процессе экспериментальной отработки метода).

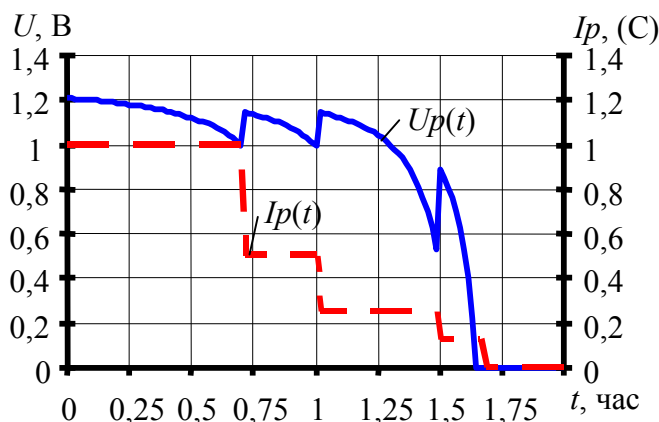
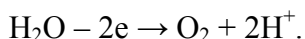
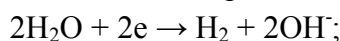


Рис. 6. Разрядная характеристика $U_P(t)$ никель-кадмиевого аккумулятора при глубоком разряде ступенчатым током $I_P(t)$

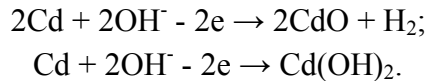
Метод восстановления аккумуляторов путем глубокой переполюсовки в разгерметизированном состоянии основан на процессе окисления кадмия.

При заряде аккумуляторов с переполюсовкой обратным током в аккумуляторах наблюдается несколько параллельно протекающих процессов:

1. Электролиз воды, приводящий к выделению водорода на окисно-никелевом электроде и выделению кислорода на кадмиевом электроде:



2. Окисление кадмия, приводящее, во-первых, к доокислению кадмия на кадмиевом электроде и, во-вторых, к окислению кадмиевых мостиков на сепараторе:



В результате этих процессов образуются окиси кадмия, которые не проводят ток и, следовательно, не способные замыкать электроды. Тем самым происходит разрушение токопроводящих мостиков.

Как видно из приведенных выше уравнений, при таком виде заряда в аккумуляторе происходит выделение газов, что требует разгерметизации корпуса герметичного АК для предотвращения его деформации и разрушения при проведении переполюсовки.

Метод восстановления аккумуляторов путем воздействия на аккумулятор ультразвуковыми колебаниями основан на процессе диспергирования активной массы пластин электродов и разрушении дендритных мостиков на сепараторах аккумуляторов, что приводит к восстановлению емкости аккумуляторов.

При диспергировании активной массы ультразвуковым воздействием имеет место процесс кавитации. Важным является исследование механизма кавитации и теоретическое обоснование основных параметров ультразвукового воздействия. Динамику кавитационной полости с определенными допущениями можно описать уравнением:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left(R \cdot \ddot{R} + \frac{3}{2} \cdot R^2 \right) - \left[\left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R_{\max}} \right)^3 + P_{II} \right] \cdot \left(\frac{R_{\max}}{R} \right)^{3\gamma} + \\ + \frac{2\sigma}{R} + P_0 - P_A \sin(\omega t) = 0; \\ P_A = \rho \cdot c \cdot \omega \cdot A; \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \end{aligned}$$

где ρ – плотность среды;

R – текущий радиус пузырька;

P_0 – гидростатическое давление среды;

P_{II} – давление насыщенных паров среды;

σ – коэффициент поверхностного натяжения среды;

R_0 – начальный радиус пузырька;

R_{\max} – максимальный радиус пузырька;

γ – показатель политропы;

P_A – звуковое давление;

c – скорость звука в среде;

A – амплитуда смещения излучателя – интенсивность звуковой волны;

ω – угловая частота волны;

f – частота звуковой волны;

t – время.

На основе теоретически рассчитанных параметров ультразвукового воздействия проведены экспериментальные исследования воздействия ультразвука на электродные пластины и сепаратор аккумулятора типа НК-14. Получено существенное уменьшение зерна активной массы и одновременно с этим наблюдалось значительное очищение сепараторов от кадмиевых закорачивающих мостиков (рис. 7).



Рис. 7. Элементы никель-кадмиевого аккумулятора до и после воздействия ультразвуком (а – активная масса окисно-никелевого электрода с увеличением в 100 раз; б – сепаратор с увеличением в 50 раз)

Восстановление аккумуляторов и батарей путем комплексного воздействия несколькими методами (например, методом импульсного заряда аккумуляторов асимметричным током и методом глубокого разряда ступенчатым током) позволяет избавиться от нескольких деградиционных процессов одновременно: от кристаллизации активной массы аккумуляторов, изменения вторичной структуры электродов, роста зерен актив-

ной массы, образования интерметаллидов. На рис. 8 приведены зарядно-разрядные характеристики аккумулятора НК-28, восстановленного рассмотренным выше комплексным методом.

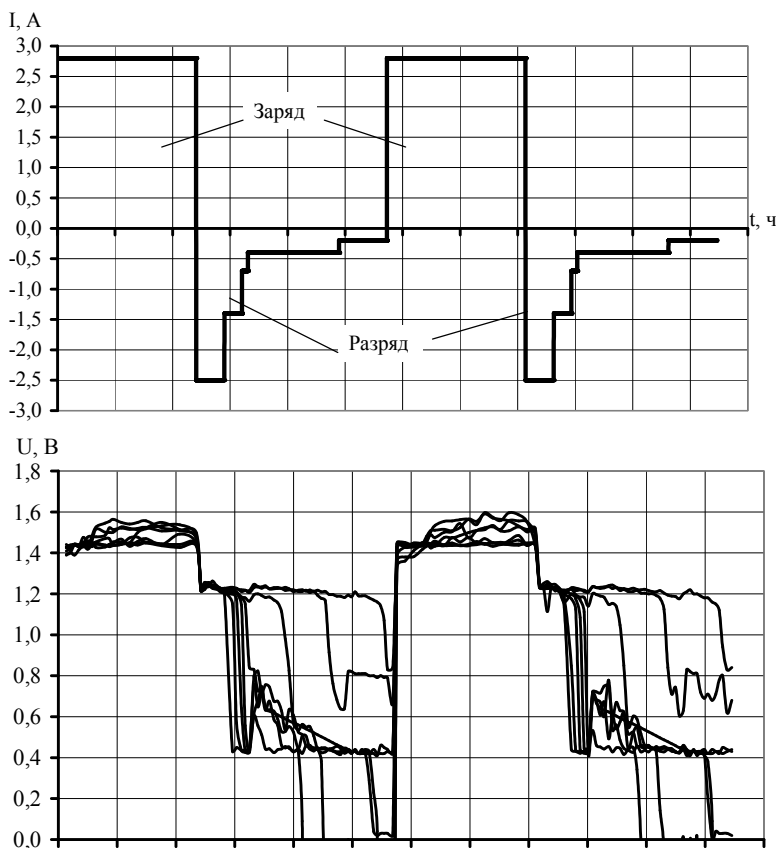


Рис. 8. Зарядно-разрядные характеристики Ni-Cd аккумуляторов при восстановительных циклах (аккумулятор типа НК-28, работающий в составе батареи 10НК-28); восстановление комплексным методом: импульсный заряд асимметричным током и глубокий разряд до 0,4 В ступенчатым током (2,5 А; 1,4 А; 0,7 А; 0,2 А)

4. Стендовая база

Для исследования рассмотренных методов восстановления емкости щелочных АК в лаборатории автономной энергетики ХАИ создан комплекс экспериментальных стендов и уникальное оборудование, предназначенное для диагностики и восстановления аккумуляторов и батарей емкостью от 1 А·ч до 200 А·ч. Стенды оснащены автоматизированными

системами измерения и управления, специализированным программным обеспечением. На рис. 9 представлены стандартные и специализированные устройства для диагностики и восстановления АК и БХ.

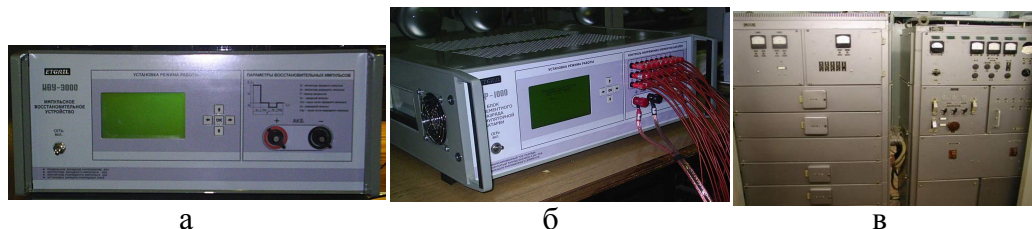


Рис. 9. Оборудование для диагностики и восстановления аккумуляторов и батарей: а – специализированное импульсное зарядное устройство; б – специализированное разрядное устройство; в – стандартное зарядно-разрядное устройство 11Э160 с доработанной системой управления.

Специализированное импульсное зарядное устройство (рис. 9, а) реализует метод восстановления АК с помощью заряда импульсным асимметричным током (рис. 5).

Глубокий разряд ступенчато уменьшающимся током осуществляется специализированным разрядным устройством (рис. 9, б). Необходимость такого устройства обусловлена тем, что для восстановления аккумуляторов стандартные разрядные устройства не позволяют получить требуемые характеристики снижения тока. Глубокий разряд осуществляется токами от 20 до 0,05 А и минимального напряжения на аккумуляторе 0,2 В с широким диапазоном задания ступеней тока (при существенном ограничении времени разряда). Управление устройствами (рис. 9) автоматизировано с использованием специального разработанного программного обеспечения.

Для восстановления аккумуляторов ультразвуковыми колеба-

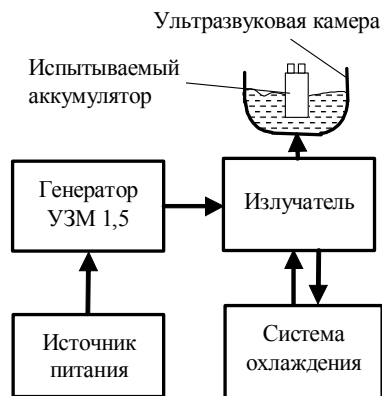


Рис. 10. Структурная схема стенда для восстановления аккумуляторов ультразвуковыми колебаниями

ниями использовался экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 10.



Рис. 11. Многоцелевой стенд для восстановления АК и БХ различными методами



Рис. 12. Стенд для ресурсных испытаний электрохимических аккумуляторных батарей

Стенд позволяет проводить ультразвуковую обработку единичных аккумуляторов в диапазоне частот 15...30 кГц с амплитудами 0,5...2 мкм. На метод и конструкцию устройства получен патент [1].

Многоцелевой стенд восстановления АК и БХ, представлен на рис. 11.

Стенд обеспечивает длительную работу с аккумуляторами при стабильных тепловых режимах АК и БХ и комфортных условиях для обслуживающего персонала.

Стенд для ресурсных испытаний аккумуляторов и батарей предназначен для проведения испытаний в реальном масштабе времени и при заданных условиях работы. На рис. 12 представлены структурная схема и общий вид стенда для ресурсных испытаний аккумуляторных батарей.

5. Результаты исследований

Исследования различных типоразмеров никель-кадмиевых АК позволили реализовать и оценить эффективность рассмотренных методов восстановления характеристик. На рис. 13 представлены результаты восста-

новления никель-кадмиевых АК различных типоразмеров полученные в ходе исследований; показаны гистограммы, отображающие эффективность восстановления емкости аккумуляторов при экспериментальной отработке различных методов.

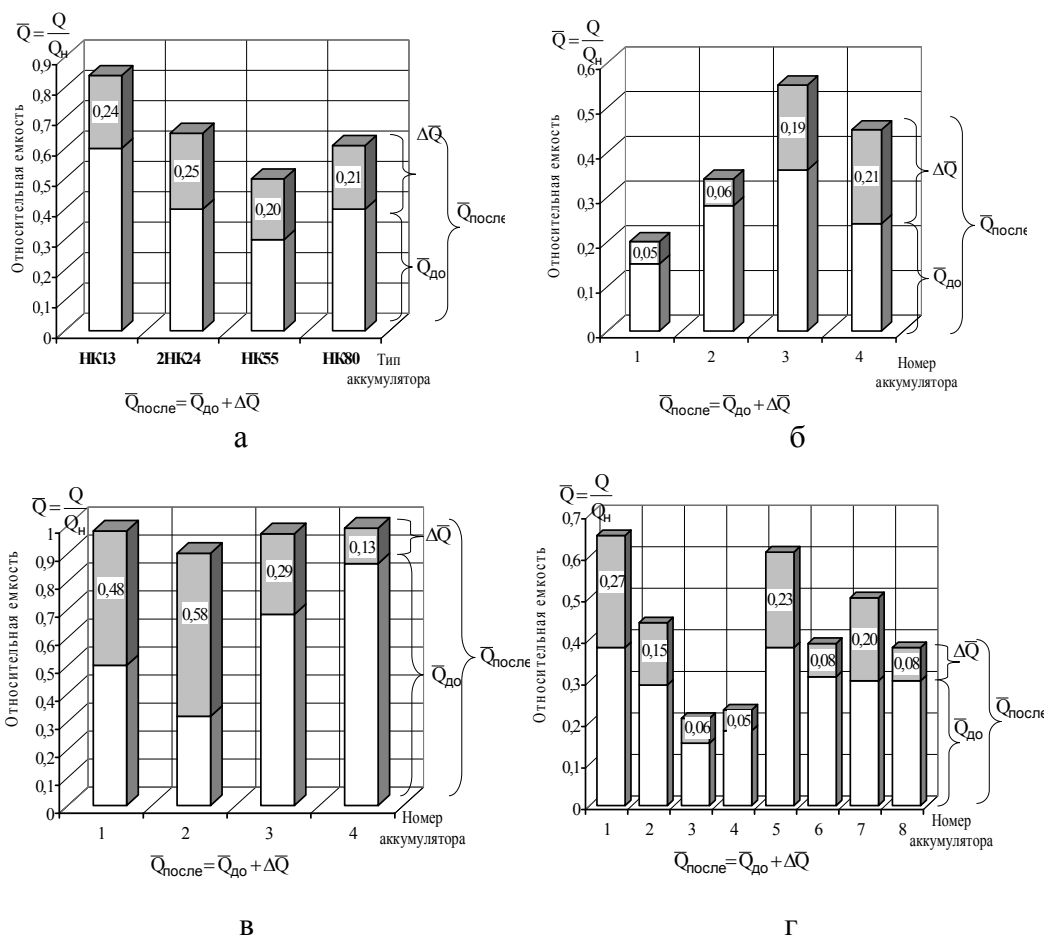


Рис. 13. Результаты восстановления щелочных аккумуляторов:

- а – изменение емкости после восстановления асимметричным импульсным током;
- б – изменение емкости после воздействия ультразвуком (НК-28);
- в – изменение емкости после глубокой переполусовки в разгерметизированном состоянии (НКГ-110 КА);
- г – изменение емкости после импульсного заряда и последующего глубокого разряда (НК-28)

Выводы

Результаты работ ХАИ по продлению ресурса щелочных электрохимических АК и БХ путем восстановления их емкости в полном объеме востребованы ведущими проектными и эксплуатационными организациями Украины и ближнего зарубежья. Предложенные методы восстановления позволяют существенно улучшить характеристики и продлить ресурс АК, а в перспективе на их основе возможно изменение подходов к обеспечению больших ресурсов и длительного прогнозирования характеристик АК и БХ. Некоторые методы восстановления АК и восстановительное оборудование защищены патентами Украины.

Литература

1. Патент на винахід №51554 Україна МПК Н01М10/42, Н01М10/44, Н01М10/54, В08В3/12. Спосіб збільшення ємності лужного акумулятора шляхом впливу ультразвуковими коливаннями // К.В. Безручко, А.С. Василенко, С.В. Губін, А.О. Давидов, О.Л. Азарнов, А.А. Харченко // №2002064958. Опубліковано 15.10.2004 р. Бюл. №10, 2004.
2. Методи діагностування акумуляторів / К.В. Безручко, А.С. Василенко, А.О. Давидов, А.А. Харченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – 2002. – Вип. 31. – С. 221 – 224.
3. Аналіз методик відновлення ємностних характеристик нікель-кадмієвих акумуляторів з метою підвищення ресурса енергоустановок летательних апаратів / К.В. Безручко, А.С. Василенко, А.О. Давидов, А.А. Харченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – 2002. – Вип. 29. – С. 46 – 51.
4. Безручко К.В., Василенко А.С., Давидов А.О., Харченко А.А. Теоретическіе і експериментальні аспекти ультразвукового відновлення щелочних акумуляторів. // Матеріали ІV міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". Космічна наука і технологія, додаток до журналу. – К. – 2003. – Т. 9, № 1. – С. 45 – 48.

Поступила в редакцію 8.04.2005