

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ВОЗВРАЩАЕМОГО АППАРАТА ТРАНСПОРТНОГО ПИЛОТИРУЕМОГО КОРАБЛЯ

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF STORAGE BATTERY OF REENTRY VEHICLE OF TRANSPORT MANNED SPACECRAFT

В. А. Гавриленко

ПАО «РКК «Энергия» имени С. П. Королева», Королёв

V. A. Gavrilenko

PAO "S. P. Korolev RSC "Energia", Korolev

Аннотация. Сложность целевых задач современных транспортных пилотируемых кораблей постоянно растёт, и вместе с этим растут и требования ко всем узлам космического аппарата. Одним из его важнейших элементов является аккумуляторная батарея системы электропитания возвращаемого аппарата, обеспечивающая функционирование специального бортового оборудования, предназначенного для своевременного возвращения экипажа и полезного груза на Землю, что, в свою очередь, накладывает на неё определённые требования по обеспечению электрической энергией с гарантированным сохранением при требуемом ресурсе высоких показателей безопасности, надёжности и живучести к концу срока эксплуатации космического аппарата на околоземной орбите. До настоящего времени с удовлетворением обеспечить требуемые значения по таким критериям, как удельная энергоёмкость, безопасность, надёжность, широкий диапазон рабочих температур, небольшие габаритные размеры, малая масса, низкая стоимость, многоразовость и унифицируемость в применении, было практически невозможно, поэтому для удовлетворения большинства требований в части важнейших критериев при проектировании химических источников тока для ракетно-космической, военно-морской и авиационной отрасли допускалось снижение требований по менее значимым критериям, какими стали: низкая стоимость, многоразовость и унифицируемость в применении. В настоящее время длительность эксплуатации транспортных пилотируемых кораблей на рабочей орбите ограничивается сроками, которые, в свою очередь, зависят от гарантийных сроков хранения химических источников тока, применяемых в системе электропитания возвращаемых аппаратов, поэтому возникла актуальная задача для исследования возможности увеличения сроков сохранности электроэнергии, подкрепляемая возможностью удешевления и упрощения международной программы по транспортно-техническому обеспечению космической станции. Ключевые слова: транспортный пилотируемый корабль, возвращаемый аппарат, система электропитания, аккумуляторная батарея. Для цитирования: Гавриленко В. А. Результаты экспериментальных исследований аккумуляторной батареи возвращаемого аппарата транспортного пилотируемого корабля // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 45–54.

Annotation. The complexity of the target tasks of modern manned transport spacecraft is constantly growing, and with it the requirements for all nodes of the spacecraft are also growing. One of its most important elements is the storage battery of the power supply system of the reentry vehicle, which ensures the functioning of special on-board equipment designed for the timely return of the crew and payload to Earth, which in turn imposes certain requirements on it to provide electric energy with guaranteed preservation at a given resource, high safety, reliability and survivability by the end of the service life of the spacecraft in low-Earth orbit. Until now, it has been almost impossible to provide the required values with satisfaction, according to criteria such as specific energy intensity, safety, reliability, a wide range of operating temperatures, small overall dimensions, low weight, low cost, reusability and uniformity in application, therefore, to meet most of the requirements regarding the most important criteria in the design of chemical power sources for the requirements of the rocket and space, naval and aviation industries were allowed to be reduced according to less significant criteria, which eventually became: low cost, reusability and uniformity in application. Currently, the duration of operation of transport manned spacecraft in operational orbit is limited to time periods, which depend on the warranty periods of storage of chemical current sources used in the power supply system of returned vehicles, therefore, an urgent task has arisen to explore the possibility of increasing the service life of current sources, which will lead to lower costs for the international program on the space station maintenance.

Key words: crew transportation spacecraft, reentry vehicle, power supply system, storage battery.

For citation: Gavrilenko V. A. Results of experimental studies of storage battery of reentry vehicle of manned transport spacecraft // Electromechanical matters. VNIEM studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 45–54.

Введение

Аккумуляторная батарея (АБ) возвращаемого аппарата (ВА) является автономным источником тока и предназначена для длительного (до 230 суток) хранения электрической энергии и эффективного обеспечения бортового оборудования на этапе спуска, с момента разделения транспортного пилотируемого корабля (ТПК) на отсеки до приземления или приводнения, а также электропитания основных потребителей после посадки в режиме ожидания прибытия поисково-спасательной команды (ПСК) [1 – 3].

Устанавливается АБ внутри герметичного контура ВА в заряженном состоянии в период проведения заключительного этапа подготовки ТПК к пуску на техническом комплексе (ТК) и имеет гарантированную ёмкость 100 А·ч в течение всего срока хранения (с учётом запаса ёмкость составляет 150 А·ч), при этом в процессе промежуточного хранения и эксплуатации контроль за электрическими параметрами АБ ВА не ведётся (не предусмотрен), что не позволяет экипажу объективно оценивать текущее энергетическое состояние с целью своевременного

принятия решения по прекращению выполнения программы полёта и подготовке ТПК к срочному спуску.

Электропотребление бортовых систем ВА ТПК приведено на рис. 1.

Рабочий разряд АБ производится токами до 45 А длительно и до 188 А в режиме импульсных (20 мс) нагрузок, однако, в соответствии с требованиями по обеспечению работоспособности бортового оборудования, во время длительной нагрузки напряжение не должно опускаться ниже 24 В, а при импульсной нагрузке допускается просадка напряжения до 15 В.

Циклограмма токовых нагрузок ВА представлена в табл. 1.

АБ является серебряно-цинковой (СЦ) электрохимической системой аккумулирования электроэнергии и конструктивно выполнена из двух параллельно соединённых аккумуляторных секций, которые по электрической схеме имеют общий плюс и гальванически развязаны по минусу, каждая секция состоит из восемнадцати последовательно соединённых аккумуляторов типа СЦД50/6294Б (рис. 2) [4 – 6].

Аккумулятор СЦД50/6294Б – это химический источник тока, в котором за счёт протекания окислительно-восстановительных процессов на электродах происходит преобразование химической энергии в электрическую (разряд), либо электроэнергии в химическую (заряд). Конструктивно аккумулятор представляет собой пластмассовый бачок с крышкой, газыводящим клапаном и токовыводами. Внутри бачка в щелочном электролите расположен электродный пакет, состоящий из чередующихся между собой, разделённых сепарационной плёнкой, положительных и отрицательных электродов, имеющих пористую структуру, небольшую толщину и прямоугольную форму (рис. 3).

От каждого электрода отходят проволоочные токоотводы, которые собираются в отдельные пучки и впаиваются в борны. Положительный электрод (катод) выполняется из серебра Ag, а отрицательный (анод) из цинка Zn. Для предотвращения возможности смещения электродного пакета при воздействии механических нагрузок проволоочные токоотводы электродов имеют дополнительное крепление (противоударное исполнение). В качестве электролита используется раствор химически чистого едкого калия. Токообразующая реакция может быть представлена уравнениями:

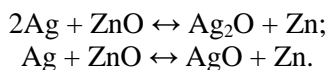


Рис. 1. Электропотребление бортовых систем возвращаемого аппарата



Рис. 2. Внешний вид аккумулятора СЦД50/6294Б

Таблица 1

Циклограмма токовых нагрузок возвращаемого аппарата

Режим	Нагрузка, А	Время работы, с	Ёмкость, А·ч
Разряд	42	480	5,5
	188	0,02	–
	45	96	1,4
	61	0,02	–
	45	216	2,7
	63	0,02	–
	45	24	0,3
	63	0,02	–
	45	48	0,6
	188	0,02	–
	45	24	0,3
	63	0,02	–
	45	24	0,3
	135	0,02	–
	45	60	0,8
	63	0,02	–
	45	60	0,8
	99	0,02	–
	45	168	2,3
	28	240	2,0
	137	0,02	–
	28	48	0,4
	64	0,02	–
	28	72	0,6
	7	1080	2,1

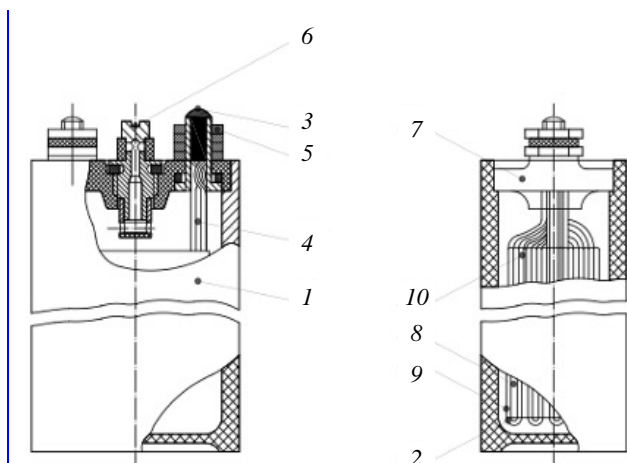


Рис. 3. Устройство аккумулятора СЦД50/6294Б:
1 – корпус аккумулятора; 2 – пакет электродов;
3 – борн; 4 – токоотводы; 5 – гайка; 6 – клапан;
7 – крышка; 8 – положительный электрод (катод);
9 – сепарационная плёнка;
10 – отрицательный электрод (анод)

При заряде аккумулятора на положительном электроде происходит окисление металлического серебра Ag до полуокиси Ag_2O и частично до окиси AgO , а на отрицательном электроде – восстановление окиси цинка ZnO до металлического цинка Zn . При разряде все процессы протекают в обратном направлении.

Данный тип аккумулятора нежелательно перезаряжать (превышать уровень зарядного напряжения выше 2,1 В), так как при перезаряде кислород, выделяющийся на серебряном электроде, окисляет сепарационную плёнку и снижает её прочность, а на цинковом электроде может образовываться цинк в виде дендритов, что, в свою очередь, может повредить сепарационную плёнку и вызвать короткое замыкание. Возникновение данного вида короткого замыкания маловероятно для случая штатной эксплуатации аккумулятора в режиме циклирования (многократное повторение зарядно-разрядных циклов), когда зарядное устройство автоматически отключается по срабатыванию датчика максимального уровня зарядного напряжения, регистрирующее общее напряжение аккумуляторной секции АБ, выбранное из расчёта эффективного напряжения заряда каждого аккумулятора в секции на уровне от 2,0 до 2,02 В. Преждевременный выход из строя одного или нескольких аккумуляторов в одной из параллельных секций не приводит к выходу из строя всей АБ, а лишь снижает общее значение напряжения в пределах допустимого. Следует также

отметить, что до настоящего времени аккумуляторы эксплуатировались только в режиме разряда [7 – 9].

В первые два месяца хранения аккумулятора данного типа в заряженном состоянии наблюдается потеря электрохимической ёмкости (саморазряд) до 7% от номинальной ёмкости с последующим замедлением до 3% в месяц. Саморазряд аккумулятора данного типа обусловлен термодинамической возможностью самопроизвольного протекания электрохимических процессов и сопряжённых им электродных реакций, которые приводят к снижению количества электрохимически активных материалов, накопленных в процессе рабочего заряда. Совокупность таких процессов называют также рекомбинацией активных масс аккумулятора. А вот в процессе длительного хранения аккумулятора при нормальных климатических условиях на поверхности цинкового электрода неизбежно образуется оксидная плёнка (пассивационная плёнка), которая с одной стороны значительно снижает (как положительное явление) саморазряд, а с другой стороны, кратковременно снижает (как отрицательное явление) разрядное напряжение в первоначальный момент подключения на нагрузку. Степень пассивации электродов зависит от длительности хранения аккумуляторов в залитом состоянии, а разрушение оксидной плёнки возможно посредством периодического активирования.

Экспериментальная отработка

Экспериментальная отработка проводилась с целью определения возможности штатной эксплуатации АБ ВА в течение более годового хранения в заряженном состоянии в составе системы электропитания (СЭП) ВА при совместном полёте ТПК с космической станцией (КС). Для реализации эксперимента было изготовлено 72 аккумулятора (СЦД50/6294Б). Полученные характеристики изготовленных аккумуляторов представлены в табл. 2.

После окончания рабочего заряда аккумуляторов (начало сохранности в заряженном состоянии) сформированы две одинаковые АБ ВА (АБ1 и АБ2).

Таблица 2

Характеристики изготовленных аккумуляторов

Наименование аккумулятора	Общее количество, шт	Напряжение разомкнутой цепи (НРЦ), В	Зарядная ёмкость	
			Величина, А·ч	Количество, шт.
СЦД50/6294Б	72	1,86	103,5	26
			105,0	22
			106,0	8
			106,5	16

Далее АБ1 и АБ2 установили на наземное хранение в течение 45 суток при нормальных климатических условиях (испытание на сохраняемость, соответствующее режиму наземного хранения, начиная с окончания рабочего заряда до момента установки на изделие).

По окончании 45 суток наземного хранения выполнена диагностика состояния АБ1 и АБ2 контрольным разрядом каждой секции током нагрузки 21 А, длительностью включения 10 с (имитация проверочных включений бортовых систем изделия). Полученные результаты диагностики состояния АБ1 и АБ2 после 45 суток наземного хранения приведены в табл. 3.

Далее АБ1 и АБ2 установили на хранение в течение 370 суток при нормальных климатических условиях (испытание на сохраняемость, соответствующее режиму годового хранения в заряженном состоянии в составе изделия до первоначального включения на нагрузку). Данные по фактическим срокам хранения приведены в табл. 4.

Так как в первые два месяца хранения для аккумуляторов данного типа характерен саморазряд до 7% от номинальной ёмкости с последующим замедлением до 3% в месяц, для поддержания максимального уровня заряженности АБ1 и АБ2 предусмотрено проведение посекционного подзаряда током 3 А до уровня зарядного напряжения 36 В (максимальный уровень заряженности) на 100, 200, 300 и 370-е сутки. Для диагностики состояния АБ1 и АБ2 запланировано проведение контрольного разряда каждой секции током нагрузки 21 А, длительностью 10 с на 200, 300 и 370-е сутки промежуточного хранения.

В процессе проведения испытаний после 100 су-

ток хранения при выполнении подзаряда АБ1 и АБ2 зафиксировано практически мгновенное возрастание зарядного напряжения на секциях до уровня 36 В, для каждого аккумулятора в секции уровень зарядного напряжения, соответственно, составил 2,0 В, при этом аккумуляторы практически не принимали зарядную ёмкость.

Мгновенное повышение напряжения на секциях до уровня 36 В приводило к автоматическому отключению зарядного устройства (срабатывание датчика максимального уровня напряжения, регистрирующее общее напряжение аккумуляторной секции), что свидетельствует критерию уровня полного заряда секций. Таким образом, после 100 суток промежуточного хранения АБ1 и АБ2 при попытке проведения подзаряда секций было зафиксировано образование пассивационного слоя (оксидная плёнка) на электродах аккумуляторов, в результате чего подзаряд не проводился.

На 200-е сутки хранения АБ1 и АБ2 из-за выявленной пассивации аккумуляторов подзаряд секций также не проводился, однако по плану экспериментальной отработки выполнена диагностика состояния секций. В процессе проведения диагностики зафиксировано, что выявленная пассивация начинает оказывать влияние на разрядные характеристики секций при первоначальном включении на нагрузку. Таким образом, установлено, что после 200 суток промежуточного хранения пассивационная плёнка на цинковых электродах препятствует как проведению подзаряда, так и снижает уровень напряжения в момент первоначального включения на нагрузку. Полученные результаты диагностики состояния АБ1 и АБ2 после 200 суток промежуточного хранения представлены в табл. 5

Таблица 3

Результаты диагностики состояния АБ1 и АБ2 после 45 суток наземного хранения

Аккумуляторная батарея	Секция	Нагрузка, А	НРЦ, В	Напряжение, В	Ёмкость, А·ч
АБ1	1	21	33,46	27,74	104,5
	2		33,46	27,54	105,0
АБ2	1		33,43	27,60	105,5
	2		33,55	27,70	106,0

Таблица 4

Фактические сроки хранения установленных на испытание аккумуляторных батарей

Аккумуляторная батарея	Режим хранения	
	Температура, градус	Продолжительность, суток
АБ1	20	415
АБ2	20	415

Таблица 5

Результаты диагностики состояния АБ1 и АБ2 после 200 суток промежуточного хранения

Аккумуляторная батарея	Секция	Нагрузка, А	НРЦ, В	Напряжение, В
АБ1	1	21	33,14	26,42 (25,54*)
	2		33,18	26,16 (25,50*)
АБ2	1		33,23	25,20 (25,10*)
	2		33,25	26,10 (25,50*)

* Напряжение в первоначальный момент включения на нагрузку.

Выявление пассивации электродов потребовало корректировки программы проведения экспериментальной отработки в части разработки мероприятий по репассивации (разрушения оксидного слоя). Наиболее эффективное разрушение оксидной плёнки на электродах происходит за счёт протекания разрядных токов, а скорость разрушения пропорциональна величине тока разряда.

С целью продолжения программы испытаний предложены варианты воздействия на пассивационную плёнку разрядными токами 3, 10 и 21 А, где критерием определения разрушения пассивационного слоя послужит окончание возрастания уровня напряжения в процессе протекания разрядного тока. Однако для выявления момента полной репассивации электродов необходимо увеличение времени воздействия разрядным током 3 А до 30 мин, током 10 А до 15 мин и током 21 А до 10 мин.

На 300-е сутки промежуточного хранения АБ1 и АБ2 были разделены на отдельные секции и проведён подзаряд каждой секции током 3 А до уровня зарядного напряжения 36 В с предварительным подзарядом током 3 А длительностью 30 мин секции 2 АБ1, током 10 А длительностью 15 мин секции 1 АБ2 и током 21 А длительностью 10 мин секции 2 АБ2. Для определения влияния пассивации на разрядные характеристики после годового хранения подзаряд с предварительным подзарядом на секции 1 АБ1 не проводился. Значения за-

рядно-разрядных токов и время воздействия представлены в табл. 6.

В результате проведения мероприятий по репассивации электродов токами длительного разряда после 300 суток хранения экспериментальным путём определено, что для выявления точного момента полного разрушения пассивационной плёнки необходимо дополнительное увеличение продолжительности воздействия разрядным током 3 А до 170 мин, током 10 А до 100 мин и током 21 А до 70 мин. Наибольшая продолжительность подзаряда относительно остальных секций током 3 А обусловлена тем, что при такой нагрузке сложно точно определить момент окончания разрушения оксидной пленки, так как процесс разрушения происходит слишком медленно.

После проведения подзаряда выполнена диагностика состояния АБ1 и АБ2. Полученные результаты диагностики после 300 суток промежуточного хранения и проведения подзаряда с предварительным подзарядом представлены в табл. 7.

На 370-е сутки хранения АБ1 и АБ2 проведён подзаряд каждой секции током 3 А до уровня зарядного напряжения 36 В с предварительным подзарядом секции 2 АБ1 током 3 А длительностью 170 мин, секции 1 АБ2 током 10 А длительностью 100 мин и секции 2 АБ2 током 21 А длительностью 70 мин. На секции 1 АБ1 подзаряд с предварительным подзарядом не проводился. Значения зарядно-разрядных токов и время воздействия представлены в табл. 8.

Таблица 6

Значения зарядно-разрядных токов и время воздействия на 300-е сутки хранения АБ1 и АБ2

Аккумуляторная батарея	Секция	Предварительный подзаряд		Подзаряд	
		Ток, А	Время, мин	Ток, А	Время, мин
АБ1	1	—	—	—	—
	2	3	30	3	82
АБ2	1	10	15	3	75
	2	21	10	3	11

Таблица 7

Результаты диагностики состояния АБ1 и АБ2 после 300 суток хранения и проведения подзаряда

Аккумуляторная батарея	Секция	Нагрузка, А	НРЦ, В	Напряжение, В
АБ1	1	21	33,04	24,02 (23,50*)
	2		33,31	24,05 (22,55*)
АБ2	1		33,16	24,54 (23,68*)
	2		33,03	24,94 (23,99*)

* В первоначальный момент включения на нагрузку.

Таблица 8

Значения зарядно-разрядных токов и время воздействия на 370-е сутки хранения АБ1 и АБ2

Аккумуляторная батарея	Секция	Предварительный подзаряд		Подзаряд	
		Ток, А	Время, мин	Ток, А	Время, мин
АБ1	1	—	—	—	—
	2	3	170	3	695
АБ2	1	10	100	3	723
	2	21	70	3	100

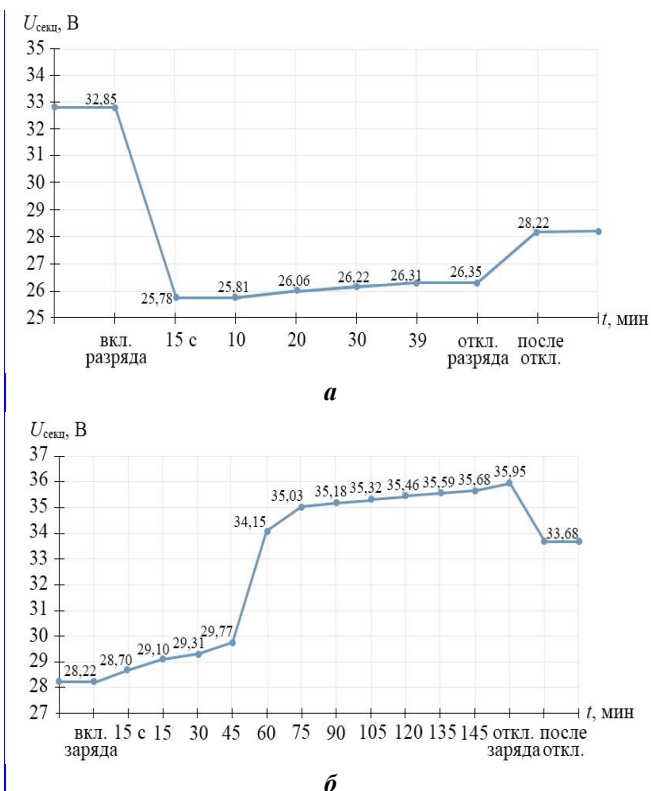


Рис. 4. График изменения напряжения секции 1 АБ2: при проведении процесса репассивации: а – разряд; б – заряд

По анализу результатов мероприятий, проведённых по репассивации электродов после 370 суток хранения, определены наиболее эффективные значения токов разряда и длительность их воздействия, критерием определения эффективности разрушения пассивационного слоя послужило время возрастания уровня напряжения в процессе разряда. Наиболее интенсивный рост напряжения наблюдался при больших разрядных токах. При разрядном токе 3 А процесс репассивации практически не заметен, так как такой ток не способен эффективно разрушать пассивацию. И наоборот, при токе разряда 21 А наблюдается характерный рост напряжения на аккумуляторных секциях, свидетельствующий о эффективном разрушении пассивационной плёнки. Разрядный ток 10 А даёт

среднюю эффективность процесса репассивации и длительность выхода аккумуляторов на нормальный режим работы через 40 мин (рис. 4, а), при этом для относительно больших токов длительного разряда для восстановления ёмкости аккумуляторов, снятой во время проведения репассивации, требуется определённно наименьшее количество времени для подзаряда (рис. 4, б).

Поле окончания подзаряда выполнена диагностика состояния АБ1 и АБ2. Полученные результаты диагностики после 370 суток хранения и проведения подзаряда с предварительным подразрядом представлены в табл. 9.

С целью определения возможности штатной эксплуатации АБ1 и АБ2 после 370 суток хранения подвергнули посекционному разряду по циклограмме токовых нагрузок ВА до уровня напряжения 24 В. Циклограмма токовых нагрузок ВА в пересчете на одну секцию АБ представлена в табл. 10.

Фактические величины напряжений в процессе посекционного разряда АБ1 и АБ2 по циклограмме токовых нагрузок ВА до уровня напряжения 24 В представлены в табл. 11.

Как видно из полученных данных (табл. 11), на секции 1 АБ1 при первоначальном включении на нагрузку наблюдалась кратковременная просадка напряжения до 21,76 В, время выхода напряжения на уровень 24 В составило 1,5 с. Более низкое значение напряжения при первоначальном включении связано с тем, что данная секция хранилась без проведения промежуточного циклирования. На остальных секциях, где проводился промежуточный подзаряд с предварительным подразрядом, при включении на начальную нагрузку напряжение не опускалось ниже 24 В. В режиме импульсных нагрузок напряжение на секциях АБ1 и АБ2 не опускалось ниже 19,34 В, при заданном нижнем пределе 15 В. Снятая разрядная ёмкость с учётом доразряда до уровня напряжения 24 В составила для секции 1 АБ1 – 169,50 А·ч, секции 2 АБ1 – 167,50 А·ч, секции 1 АБ2 – 162,50 А·ч, секции 2 АБ2 – 154,90 А·ч, что безусловно подтверждает обеспечение требуемой ёмкости.

Таблица 9

Результаты диагностики после 370 суток хранения и проведения подзаряда с предварительным подразрядом

Аккумуляторная батарея	Секция	Нагрузка, А	НРЦ, В	Напряжение, В
АБ1	1	21	32,06	24,08 (22,14*)
	2		32,73	24,17 (24,49*)
АБ2	1		32,92	24,75 (24,96*)
	2		33,36	25,41 (27,09*)

* В первоначальный момент включения на нагрузку.

Таблица 10

Циклограмма токовых нагрузок возвращаемого аппарата в пересчете на одну секцию аккумуляторной батареи

Режим	Нагрузка, А	Время включения, с	Ёмкость, А·ч
Разряд	21,0	480	2,57
	94,0	0,02	–
	22,5	96	0,70
	30,5	0,02	–
	22,5	216	1,35
	31,5	0,02	–
	22,5	24	0,15
	31,5	0,02	–
	22,5	48	0,30
	94,0	0,02	–
	22,5	24	0,15
	31,5	0,02	–
	22,5	24	0,15
	67,5	0,02	–
	22,5	60	0,40
	31,5	0,02	–
	22,5	60	0,40
	49,5	0,02	–
	22,5	168	1,15
	14,0	240	1,00
	68,5	0,02	–
	14,0	48	0,20
	32,0	0,02	–
	14,0	72	0,30
	3,5	1080	1,05

Таблица 11

Фактические величины напряжений в процессе посекционного разряда АБ1 и АБ2

Нагрузка, А	Напряжение, В			
	АБ1		АБ2	
	Секция 1	Секция 2	Секция 1	Секция 2
21,0**	21,76	24,65	25,28	25,73
94,0*	19,34	19,34	19,94	20,59
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
30,5*	21,74	23,94	24,56	25,05
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
31,5*	24,20	24,02	24,59	25,08
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
31,5*	24,20	24,02	24,59	25,08
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
94,0*	19,34	19,34	19,94	20,59
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
31,5*	24,20	24,02	24,59	25,08
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
67,5*	21,74	21,68	22,09	22,67
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
31,5*	24,20	24,02	24,59	25,08
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
49,5*	23,35	23,19	23,52	24,01
22,5	24,32	24,55	25,15	25,61
14,0	26,00	25,97	26,25	26,54
68,5*	22,61	22,61	22,70	23,27
14,0	26,00	25,97	26,25	26,54
32,0*	24,92	24,92	25,13	25,50
14,0	26,00	25,97	26,25	26,54
3,5	27,31	27,35	27,59	27,77

* Импульсная нагрузка; ** начальная нагрузка.

Методика и расчёт надёжности

Данный расчёт надёжности выполнен в соответствии с действующими требованиями по обеспечению безопасности пилотируемых полётов в космос, а также требованиями по обеспечению контроля надёжности серебряно-цинковых аккумуляторов в ходе их экспериментальной отработки.

Вероятность безотказной работы рассчитывается по соотношению:

$$P = P_u P_c,$$

где P_u – вероятность того, что при разряде по конкретной циклограмме токовых нагрузок напряжение секции АБ будет находиться в заданных пределах; P_c – вероятность того, что электрическая ёмкость секции АБ будет достаточной для отработки данной циклограммы токовых нагрузок.

Вероятность P_u определяется произведением вероятностей невыхода напряжения за заданные пределы для каждой задаваемой циклограммой токовой нагрузки. Для каждой конкретной i -й нагрузки вероятность P_{ui} рассчитывается по соотношению:

$$P_{ui} = F(Z_{ui}) = F(\Delta_{ui}/S_{ui}),$$

где $F(Z_{ui})$ – значение функции нормального распределения для случайного аргумента $Z_{ui} = (\Delta_{ui}/S_{ui})$; Z_{ui} – нормальный коэффициент запаса по нижнему (верхнему) допустимому пределу напряжения при i -й токовой нагрузке; $\Delta_{ui} = U_i - U_{тр,н}$ – для нижнего предела и $\Delta_{ui} = U_{тр,в}$ – для верхнего предела; U_i – среднее значение напряжения задействованных секций АБ при i -й токовой нагрузке; S_{ui} – оценка стандартного отклонения напряжения при i -й токовой нагрузке в силу малого объёма испытываемых секций АБ для расчёта стандартных отклонений напряжения использована априорная информация, согласно которой $S_{ui} = 0,005 U_i$.

Вероятность P_c определяется по соотношению:

$$P_c = F(Z_c) = F(\Delta C/S_c),$$

где Z_c – нормированный коэффициент запаса электрической ёмкости; $\Delta C = C - C_{тр}$ (C – средняя разрядная электрическая ёмкость задействованных секций АБ; $C_{тр}$ – электрическая ёмкость, требуемая для отработки по заданной циклограмме токовых нагрузок); S_c – оценка стандартного отклонения электрической ёмкости в силу малого объёма испытываемых секций АБ для расчёта стандартных отклонений электрической ёмкости использована априорная информация, согласно которой $S_c = 0,05 C$.

Напряжения, полученные при разряде секции 1 АБ1 по циклограмме токовых нагрузок при допустимом нижнем пределе 24 В (длительно) и при импульсных нагрузках 15 В (кратковременно), приведены в табл. 12.

Из приведённых данных следует, что при нижней допустимой границе $P_u = P(21)P(94)P(22,5)P(30,5) \times P(31,5)P(67,5)P(49,5)P(14,0)P(68,5)P(32,0)P(3,5) = 0,8186 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,8186$.

Вероятность P_c работы по электрической ёмкости $P_c = F(Z_c) = F(\Delta C/S_c) = F\{(C - C_{ст})/S_c\} = \{(169,50 - 100)/169,50 \cdot 0,05\} = F(7,30) = 0,999999$.

Соответственно $P = P_u P_c = 0,8186 \cdot 0,999999 = 0,819$.

Напряжения, полученные при разряде секции 2 АБ1 по циклограмме токовых нагрузок при допустимом нижнем пределе 24 В (длительно) и при импульсных нагрузках 15 В (кратковременно), приведены в табл. 13.

Из приведённых данных следует, что при нижней допустимой границе $P_u = P(21)P(94)P(22,5)P(30,5) \times P(31,5)P(67,5)P(49,5)P(14,0)P(68,5)P(32,0)P(3,5) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$.

Вероятность P_c работы по электрической ёмкости $P_c = F(Z_c) = F(\Delta C/S_c) = F\{(C - C_{ст})/S_c\} = \{(167,50 - 100)/167,50 \cdot 0,05\} = F(7,30) = 0,999999$.

Соответственно $P = P_u P_c = 1 \cdot 0,999999 = 0,999$.

Напряжения, полученные при разряде секции 1 АБ2 по циклограмме токовых нагрузок при допустимом нижнем пределе 24 В (длительно) и при импульсных нагрузках 15 В (кратковременно), приведены в табл. 14.

Из приведённых данных следует, что при нижней допустимой границе $P_u = P(21)P(94)P(22,5)P(30,5) \times P(31,5)P(67,5)P(49,5)P(14,0)P(68,5)P(32,0)P(3,5) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$.

Вероятность P_c работы по электрической ёмкости $P_c = F(Z_c) = F(\Delta C/S_c) = F\{(C - C_{ст})/S_c\} = \{(162,50 - 100)/162,50 \cdot 0,05\} = F(5,17) = 0,999999$.

Соответственно $P = P_u \cdot P_c = 1 \cdot 0,999999 = 0,999$.

Напряжения, полученные при разряде секции 2 АБ2 по циклограмме токовых нагрузок при допустимом нижнем пределе 24 В (длительно) и при импульсных нагрузках 15 В (кратковременно), приведены в табл. 15.

Из приведённых данных следует, что при нижней допустимой границе $P_u = P(21)P(94)P(22,5)P(30,5) \times P(31,5)P(67,5)P(49,5)P(14,0)P(68,5)P(32,0)P(3,5) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$.

Вероятность P_c работы по электрической ёмкости $P_c = F(Z_c) = F(\Delta C/S_c) = F\{(C - C_{ст})/S_c\} = \{(154,90 - 100)/154,90 \cdot 0,05\} = F(5,97) = 0,999999$.

Соответственно $P = P_u \cdot P_c = 1 \cdot 0,999999 = 0,999$.

Таблица 12

Напряжения при разряде секции 1 АБ1

Нагрузка, А	$U_{мин}, В$	S_u	Z_u	P_u
21,0	21,76	0,1205	0,9124	0,8186
94,0	19,34	0,0965	44,5998	1
22,5	24,32	0,1230	4,9176	1
30,5	21,74	0,1195	74,4769	1
31,5	24,20	0,1204	75,4411	1
67,5	21,74	0,1066	59,2870	1
49,5	23,35	0,1146	69,1099	1
14,0	26,00	0,1287	13,5560	1
68,5	22,61	0,1110	64,8648	1
32,0	24,92	0,1235	78,5425	1
3,5	27,31	0,1384	26,5895	1

Таблица 13

Напряжения при разряде секции 2 АБ1

Нагрузка, А	$U_{мин}, В$	S_u	Z_u	P_u
21,0	24,65	0,1222	3,6408	1
94,0	19,34	0,0972	45,758	1
22,5	24,55	0,1232	5,1948	1
30,5	23,94	0,1198	74,8435	1
68,5	22,61	0,1115	65,4708	1
32,0	24,92	0,1238	78,8857	1
3,5	27,35	0,1383	26,5269	1
31,5	24,02	0,1207	75,7249	1
67,5	21,68	0,1069	59,7475	1
49,5	23,19	0,1149	69,5084	1
14,0	25,97	0,1288	13,7007	1

Таблица 14

Напряжения при разряде секции 1 АБ2

Нагрузка, А	$U_{мин}, В$	S_u	Z_u	P_u
21,0	25,28	0,1250	8	1
94,0	19,94	0,1034	55,0374	1
22,5	25,21	0,1255	8,8410	1
30,5	24,56	0,1236	78,6407	1
31,5	24,59	0,1235	78,6898	1
67,5	22,09	0,1115	65,4708	1
49,5	23,52	0,1182	73,0964	1
14,0	26,25	0,1302	15,7389	1
68,5	22,70	0,1142	68,7089	1
32,0	25,13	0,1257	80,6682	1
3,5	27,59	0,1390	27,4312	1

Таблица 15

Напряжения при разряде секции 2 АБ2

Нагрузка, А	$U_{мин}, В$	S_u	Z_u	P_u
21,0	25,73	0,1224	3,9215	1
94,0	20,59	0,0987	48,0628	1
22,5	25,61	0,1237	6,0997	1
30,5	25,05	0,1208	75,8791	1
31,5	25,08	0,1211	76,1865	1
67,5	22,67	0,1078	60,8534	1
49,5	24,01	0,1155	70,1298	1
14,0	26,54	0,1291	14,2055	1
68,5	23,27	0,1122	66,3697	1
32,0	25,50	0,1243	79,3242	1
3,5	27,77	0,1387	27,0581	1

Заключение

Проведённый анализ результатов экспериментальной отработки показал, что после годового хранения АБ в составе ВА при требуемой ёмкости 100 А·ч и допуске по нижнему порогу напряжения 24 В (при длительной нагрузке) и 15 В (при импульсной нагрузке) с заданным коэффициентом надёжности 0,999:

- не обеспечивается штатная эксплуатация АБ без проведения подзаряда с предварительным подзарядом, так как при первоначальном включении на нагрузку не обеспечивается заданная надёжность при нижнем допуске по напряжению 24 В;

- обеспечивается штатная эксплуатация АБ после проведения подзаряда каждой секции током 3 А с предварительным подзарядом током 3 А, при этом обеспечивается заданная надёжность и нижний допуск по напряжению;

- обеспечивается штатная эксплуатация АБ после проведения подзаряда каждой секции током 3 А с предварительным подзарядом током 10 А, при этом обеспечивается заданная надёжность и нижний допуск по напряжению;

- обеспечивается штатная эксплуатация АБ после проведения подзаряда каждой секции током 3 А с предварительным подзарядом током 21 А, при

этом обеспечивается заданная надёжность и нижний допуск по напряжению.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- процесс пассивации защищает аккумуляторы секций от саморазряда;

- разрушение пассивационного слоя на электродах аккумуляторов необходимо для обеспечения возможности проведения подзаряда;

- практически весь подзаряд проводится для восполнения ёмкости, снятой для разрушения пассивационного слоя на электродах;

- АБ без проведения электротренировок имеет кратковременную просадку напряжения при первоначальном включении на нагрузку.

Подзаряд АБ с предварительным подзарядом каждые 100 суток промежуточного хранения нецелесообразен, так как для поддержания максимального уровня энерговооружённости аккумуляторов достаточно будет проведения электротренировки АБ за 1 – 5 суток перед предстоящим рабочим разрядом. Электротренировку (циклирование) АБ необходимо проводить посекционным током длительного разряда 10 А в течение 40 минут с последующим восполнением снятой ёмкости током заряда 3 А до максимального уровня зарядного напряжения 36 В.

Список источников

1. Соловьёв В. А., Коваленко А. А. Пилотируемая космонавтика: достижения и перспективы // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 11. С. 1029–1035. DOI : 10.31857/S0869587321110128.
2. Первичные химические источники тока в электроснабжении возвращаемых космических аппаратов / Г. В. Носкин [и др.] // Космическая техника и технологии. 2020. № 1 (28). С. 34–41.
3. Николаев В. Д., Зернов А. С. Обеспечение безопасности химических автономных источников питания аппаратуры и бортового оборудования российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2019. № 1 (24). С. 35–49.
4. Микрин Е. А. Научно-технические проблемы реализации проекта «Пилотируемые космические системы и комплексы» // Космическая техника и технологии. 2019. № 3 (26). С. 5–19. DOI : 10.33950/spacetech-2308-7625-2019-3-5-19.
5. Международное сотрудничество в сфере пилотируемых полетов. Часть 2. Создание и эксплуатация Международной космической станции / А. Г. Деречин [и др.] // Космическая техника и технологии. 2017. № 2 (17). С. 5–28.
6. Бобрикова И. Г. Введение в электрохимические технологии. Учебное пособие. Новочеркасск : ЮРГТУ, 2017. 184 с.
7. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации : справочник. СПб : Химиздат, 2005. 262 с.
8. Halpert G., Frank H., Surampudi S. Batteries and Fuel Cells in Space // The Electrochemical Society Interface. 1999. № 8. Pp. 25–30.
9. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма, 1994. 318 с.

References

1. Soloviev V. A., Kovalenko A. A. Manned astronautics: achievements and prospects // Vestnik RAN. 2021. Vol. 91. № 11. Pp. 1029–1035. DOI : 10.31857/S0869587321110128.
2. Primary chemical current sources in power supply systems of reentry vehicles / G. V. Noskin [et al.] // Space technique and technologies. 2020. № 1 (28). Pp. 34–41.
3. Nikolaev V. D., Zernov A. S. Safety assurance of chemical self-contained power supplies for hardware and onboard equipment of the ISS Russian Segment // Space technique and technologies. 2019. № 1 (24). Pp. 35–49.

4. Mikrin E. A. Scientific and engineering problems involved in the implementation of the project "Manned space systems and complexes" // Space technique and technologies. 2019. № 3 (26). Pp. 5–19. DOI : 10.33950/spacetech-2308-7625-2019-3-5-19.
5. International cooperation in the sphere of manned lights. Part 2. Development and operation of the International Space Station/ A. G. Derechin [et al.] // Space technique and technologies. 2017. № 2 (17). Pp. 5–28.
6. Bobrikova I. G. Introduction to Electrochemical Technologies. Tutorial. Novochoerkassk : SRSTU, 2017. 184 p.
7. Taganova A. A., Bubnov Yu. I., Orlov S. B. Sealed Chemical Power Sources. Cells and Batteries. Testing and Operation Equipment : manual. St. Petersburg: Khimizdat, 2005. 262 p.
8. Halpert G., Frank H., Surampudi S. Batteries and Fuel Cells in Space // The Electrochemical Society Interface. 1999. № 8. Pp. 25–30.
9. Spacecraft power supply systems / B. P. Soustin [et al.]. Novosibirsk : Science. Sib. publishing company, 1994. 318 p.

Поступила в редакцию 02.09.2025

The article was submitted 02.09.2025

Информация об авторе

Владимир Александрович Гавриленко – аспирант, инженер, e-mail: mr.gavr89@mail.ru.

Information about the author

Vladimir Aleksandrovich Gavrilenko – Post-Graduate, Engineer, e-mail: mr.gavr89@mail.ru.