

## РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ И ПАРАМЕТРЫ ДЕГРАДАЦИИ АККУМУЛЯТОРОВ

*Бойназаров Бекзод Бахтиёрович<sup>1</sup>,  
Жобборов Баходир Тўлқинжон ўгли<sup>2</sup>.*

*<sup>1</sup>Ферганский государственный технический университет, PhD кафедры  
Энергетической инженерии.*

*<sup>2</sup>докторант кафедры “Электроники и приборостроения”.  
E-mail: [baxodir.jabborov@fstu.uz](mailto:baxodir.jabborov@fstu.uz), тел: +998911231595*

**Аннотация:** В статье представлены результаты экспериментальных исследований режимов испытаний и параметров деградации аккумуляторных батарей, предназначенных для использования в автономных фотоэлектрических станциях. Основное внимание уделено влиянию глубины разряда (20–100%), скорости заряда/разряда (0.2C, 0.5C, 1C) и температуры окружающей среды (+10°C, +25°C, +40°C) на остаточную ёмкость, внутреннее сопротивление и стабильность напряжения. Экспериментально подтверждено, что глубокая разрядка (80–100%) и высокая температура (+40°C) приводят к ускоренной деградации: потеря ёмкости достигает 35% после 120 циклов, а рост внутреннего сопротивления – 30% после 200 циклов. Предложены эмпирические модели деградации, включающие линейные и квадратичные зависимости. Сформулированы практические рекомендации для эксплуатации аккумуляторных систем в климатических условиях Узбекистана, включая ограничение глубины разряда до 40–60%, контроль температуры и автоматическое отключение при критических значениях параметров.

**Ключевые слова:** Аккумуляторные батареи, деградация, глубина разряда, C-цикл, остаточная ёмкость, внутреннее сопротивление, автономные фотоэлектрические станции, температурные режимы, циклирование, моделирование износа.

**Annotatsiya.** Maqolada avtonom fotoelektrik stansiyalar tarkibida qoʻllaniladigan akkumulyatorlarning sinov rejimlari va degradatsiya parametrlarini eksperimental tadqiq qilish natijalari keltirilgan. Asosiy eʼtibor zaryadsizlanish chuqurligi (20–100%), zaryad/zaryadsizlanish tezligi (0.2C, 0.5C, 1C) va atrof-muhit

haroratining (+10°C, +25°C, +40°C) qoldiq sig‘im, ichki qarshilik va kuchlanish barqarorligiga ta‘siriga qaratilgan. Eksperimental ravishda chuqur zaryadsizlanish (80–100%) va yuqori harorat (+40°C) tezashtirilgan degradatsiyaga olib kelishi tasdiqlandi: 120 tsikldan keyin sig‘im yo‘qolishi 35% ga, 200 tsikldan keyin ichki qarshilik o‘sishi 30% gacha yetadi. Chiziqli va kvadratlik bog‘liqliklarni o‘z ichiga olgan empirik degradatsiya modellari taklif qilingan. O‘zbekistonning iqlim sharoitida akkumulyator tizimlarini ishlatish bo‘yicha amaliy tavsiyalar, jumladan, zaryadsizlanish chuqurligini 40–60% gacha cheklash, haroratni nazorat qilish va kritik parametr qiymatlarida avtomatik o‘chirish ishlab chiqilgan.

**Kalit so‘zlar:** Akkumulyator batareyalari, degradatsiya, zaryadsizlanish chuqurligi, C-sikl, qoldiq sig‘im, ichki qarshilik, avtonom fotoelektrik stansiyalar, harorat rejimlari, tsikllash, eskirish modellashtirish.

**Abstract:** The article presents the results of experimental studies on test modes and degradation parameters of batteries intended for use in standalone photovoltaic stations. The focus is on the effects of depth of discharge (20–100%), charge/discharge rate (0.2C, 0.5C, 1C), and ambient temperature (+10°C, +25°C, +40°C) on residual capacity, internal resistance, and voltage stability. It is experimentally confirmed that deep discharge (80–100%) and high temperature (+40°C) lead to accelerated degradation: capacity loss reaches 35% after 120 cycles, while internal resistance increases by up to 30% after 200 cycles. Empirical degradation models incorporating linear and quadratic dependencies are proposed. Practical recommendations for operating battery systems under Uzbekistan’s climatic conditions are formulated, including limiting depth of discharge to 40–60%, temperature control, and automatic shutdown at critical parameter values.

**Key words:** Batteries, degradation, depth of discharge, C-rate, residual capacity, internal resistance, standalone photovoltaic stations, temperature conditions, cycling, wear modeling.

**ВВЕДЕНИЕ.** Эффективность накопителей энергии, применяемых в составе автономных фотоэлектрических станций, в значительной степени

определяется их способностью сохранять эксплуатационные характеристики на протяжении длительного срока службы при многократных циклах заряда и разряда. Основными параметрами, подверженными изменению в процессе эксплуатации, являются остаточная ёмкость аккумулятора, его внутреннее сопротивление, а также стабильность напряжения на клеммах при различных режимах нагрузки. Для адекватной оценки этих изменений и формирования соответствующих математических моделей в рамках проекта были реализованы детализированные сценарии испытаний, охватывающие широкий спектр эксплуатационных условий [1-3].

Поскольку аккумуляторы в автономных системах работают в условиях переменной нагрузки, нестабильной генерации (ввиду изменения солнечного излучения), колебаний температуры и влажности, выбор режимов испытаний ориентировался на моделирование максимально приближённых условий к реальной эксплуатации [4].

**ЛИТЕРАТУРНЫЙ АНАЛИЗ.** Общая характеристика изученности проблемы

Проблема деградации аккумуляторных батарей при циклической эксплуатации в автономных фотоэлектрических системах является активно исследуемой областью как в зарубежной, так и в отечественной научной литературе. Анализ использованных источников показывает, что исследования сосредоточены на трёх основных направлениях: (1) экспериментальное изучение влияния эксплуатационных факторов на срок службы батарей; (2) математическое моделирование процессов старения; (3) разработка практических рекомендаций для систем управления.

**Зарубежные исследования**

Значительный вклад в понимание механизмов деградации внесли зарубежные авторы. В работе Charkey A., Puglisi V. (2018) [5] подробно рассматриваются механизмы деградации и методы оценки срока службы при циклическом использовании, что послужило теоретической базой для интерпретации экспериментальных данных.

Классическое исследование Wang J. et al. (2011) [7, 10] представляет модель циклической жизни для графит- $\text{LiFePO}_4$  ячеек, где авторы впервые количественно описали зависимость потери ёмкости от числа циклов. Эта модель активно используется для верификации экспериментальных результатов.

Фундаментальная работа Vetter J. et al. (2005) [11] посвящена механизмам старения литий-ионных аккумуляторов. Авторы систематизировали факторы, влияющие на деградацию, включая рост твёрдого электролитного межфазного слоя (SEI), структурные изменения электродов и потерю активного материала.

Zhang S. S. (2006) [9] исследовал влияние протокола зарядки на циклический ресурс, показав, что оптимизация режимов заряда может существенно продлить срок службы батарей.

### **МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.**

Выделены три ключевых группы переменных:

1. Глубина разряда (ГР) - параметр, отражающий процент израсходованной энергии относительно полной ёмкости аккумулятора.
2. Температура окружающей среды - оказывает как прямое, так и косвенное влияние на электрохимические процессы внутри батареи.
3. Скорость зарядки и разрядки (С-цикл) - влияет на скорость и равномерность распределения тока внутри ячеек, а также на генерацию тепла.

Для оценки влияния каждого из этих факторов были разработаны сценарии, объединяющие различные их сочетания. Всего было проведено 15 различных тестов, включающих все возможные комбинации ГР (20%, 40%, 60%, 80%, 100%) и С-цикл (0.2С, 0.5С, 1С) при температурах +10 °С, +25 °С и +40 °С.

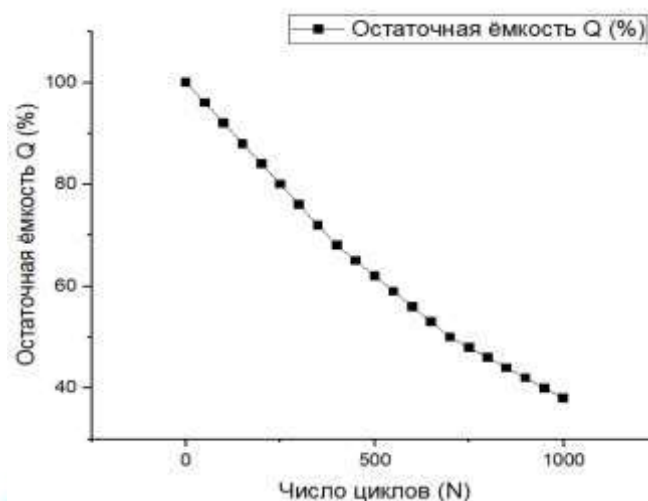


Рис 1. Зависимость остаточной ёмкости от числа циклов  $Q(N)$

Одним из важнейших результатов эксперимента стала кривая зависимости остаточной ёмкости аккумулятора от количества циклов заряда-разряда. На графике чётко прослеживается характерная тенденция: начальный участок с плавным снижением, за которым следует ускоренная деградация.

Форма кривой  $Q(N)$  различается в зависимости от глубины разряда и температуры при  $ГР = 20\%$  и  $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$  снижение ёмкости за 200 циклов не превышало 5%, и кривая оставалась практически линейной, при  $ГР = 80\%$  и  $T = +40\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдалась резкая потеря ёмкости после 80–100 циклов, причём деградация ускорялась нелинейно [10].

Аппроксимация зависимостей проводилась по модели:

$$Q(N) = Q_0 \cdot (1 - \alpha_1 \cdot N - \alpha_2 \cdot N^2) \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - эмпирически подобранные коэффициенты, наличие квадратичного члена подтверждает нелинейный характер износа.

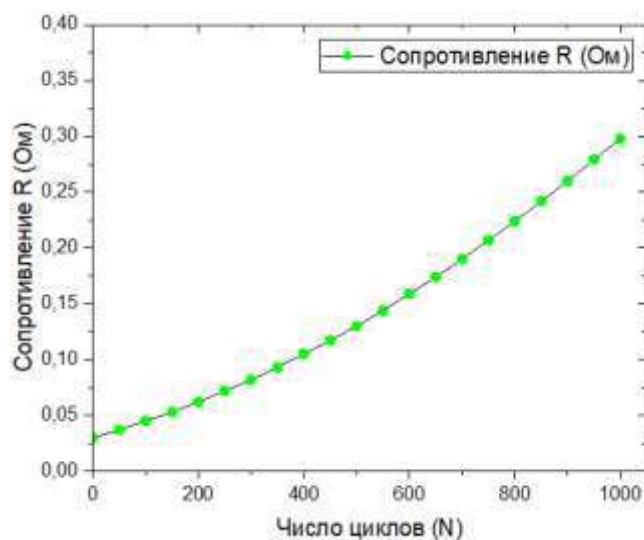


Рис.2. Рост внутреннего сопротивления  $R(N)$

Вторым ключевым показателем служит изменение внутреннего сопротивления аккумуляторов по мере их старения. Согласно данным, сопротивление увеличивалось практически во всех сценариях, однако скорость роста  $R$  напрямую зависела от условий эксплуатации при  $C\text{-цикл} = 1C$  и высокой температуре рост сопротивления происходил скачкообразно, с переходом через критическую точку (обычно 120–150 циклов), при низком токе (0.2C) и температуре  $+10\text{ }^{\circ}C$  изменение  $R$  оставалось в пределах 5–7% за весь период наблюдения [11].

**ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.** На основании экспериментальных исследований, выполненных в предыдущих подразделах, можно сформулировать ряд ключевых выводов и практических рекомендаций, имеющих важное значение для разработки, внедрения и эксплуатации аккумуляторных систем в составе автономных фотоэлектрических энергетических комплексов. Проводимые испытания позволили охватить широкий диапазон эксплуатационных сценариев, включая различные значения глубины разряда (ГР), скоростей зарядки и разрядки (C-цикл), а также температуры окружающей среды, что обеспечило комплексную оценку процессов деградации аккумуляторов в условиях, близких к реальным.

Сравнение различных режимов испытаний показало, что деградация аккумуляторов зависит от совокупности трёх основных факторов величины

глубины разряда (ГР), скорости циклирования (С-цикл), температуры окружающей среды.

На основании полученных данных можно сформулировать следующие рекомендации для практического внедрения аккумуляторных систем в условиях Республики Узбекистан:

– Эксплуатация аккумуляторов при глубине разряда более 80% допустима только в аварийных режимах или при наличии активной системы мониторинга, прогнозирующей ресурс.

Таблица 1.Рекомендуется использовать следующие **граничные значения** для автоматической блокировки разрядки

Параметр	Критическое значение	Действие системы
СЗ	< 30%	Ограничение разрядки
Температура ячейки	> 45 °С	Принудительное охлаждение / стоп
Внутреннее сопротивление	> 50% от номинала	Вывод из эксплуатации
$\Delta U$ между ячейками	> 0.3 В	Балансировка или аварийное отключение

### ВЫВОДЫ

1. Проведённое экспериментальное исследование, охватывающее многоаспектный анализ работы аккумуляторных батарей в различных эксплуатационных условиях, позволило сформировать целостное представление о характере деградационных процессов и закономерностях изменения ключевых электрических параметров аккумуляторов при их циклической эксплуатации.

2. Остаточная ёмкость аккумуляторов снижалась с ростом числа циклов заряда-разряда, причём характер деградации был нелинейным и ускорялся при увеличении глубины разряда и температуры. Так, при ГР = 100% и температуре +40 °С снижение ёмкости составило более 35% уже после 120 циклов. В то же время при ГР = 20% и температуре +25 °С ёмкость уменьшилась всего на 5% после 200 циклов.

3. Внутреннее сопротивление аккумуляторов увеличивалось по мере старения, что негативно сказывалось на способности аккумулятора выдавать пиковую мощность. При высоких токах разрядки и повышенных температурах

наблюдался лавинообразный рост сопротивления, указывающий на критическую деградацию внутренних структур (в первую очередь, электродов и электролита).

4. Температурные эффекты оказали двойственное влияние: при умеренном повышении температуры улучшалась скорость химических реакций, однако уже при температуре свыше  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдалось резкое усиление деградационных процессов. Это особенно актуально для условий Узбекистана, где в летние месяцы температура может превышать  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  в тени.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rahman S. et al. Battery Degradation Analysis in Off-Grid PV Systems: Experimental Study // *Renewable Energy*. - 2019. - Vol. 139. - P. 1043–1054.
- [2] Фролов И. И., Колесников Е. Н. Применение MATLAB и Python в анализе данных деградации аккумуляторов. // *Автоматизация и современные технологии*. - 2021. - № 6. - С. 14–19.
- [3] Гончаров К. А., Елисеев С. А. Аккумуляторные батареи для возобновляемой энергетики: Справочное пособие. - М.: Энергия, 2020. - 312 с.
- [4] Тихомиров А. И., Сивухин А. С. Долговечность и надёжность литий-ионных аккумуляторов. // *Электрохимия*. - 2019. - Т. 55, № 7. - С. 712–719.
- [5] Charkey A., Puglisi V. Battery degradation mechanisms and lifetime estimation under cyclic use. // *Journal of Power Sources*. - 2018. - Vol. 396. - P. 644–653.
- [6] Liu K., Li K., Zhang C. et al. A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. // *Frontiers of Mechanical Engineering*. - 2019. - Vol. 14, No. 1. - P. 47–64.
- [7] Wang J., Liu P., Hicks-Garner J. et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells. // *Journal of Power Sources*. - 2011. - Vol. 196, No. 8. - P. 3942–3948.
- [8] Виноградов Д. А., Шаталов Н. М. Особенности эксплуатации литий-ионных аккумуляторов при различных режимах разряда // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2022. – № 1. – С. 12–18.
- [9] Zhang S. S. The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery // *Journal of Power Sources*. – 2006. – Vol. 161. – P. 1385–1391.
- [10] Wang J., Liu P., Hicks-Garner J., Sherman E., Soukiazian S., Verbrugge M., Tataria H., Musser J., Finamore P. Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196. – P. 3942–3948.
- [11] Vetter J., Novák P., Wagner M. R., Veit C., Möller K.-C., Besenhard J. O., Winter M., Wohlfahrt-Mehrens M., Vogler C., Hammouche A. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 147. – P. 269–281.