

УДК 541.138.2

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_21

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ДОБАВОК НА ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СРОК СЛУЖБЫ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Ю.Л. ГунькоORCID: 0000-0002-9094-2477 e-mail: gunko.ul@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***А.А. Бачаев**ORCID: 0000-0002-8815-1342 e-mail: bachaev_tep@list.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***В.А. Козырин**ORCID: 0000-0002-6190-0067 e-mail: kozyrin.v@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***О.Л. Козина**ORCID: 0000-0002-9284-7465 e-mail: cn-gunko2008@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***Е.Н. Васин**ORCID: 0000-0003-1565-7286 e-mail: eugeny.vasin-evg2017@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

Приведены результаты исследований, показывающих, что некоторые добавки в электролит или активную массу никель-цинковых аккумуляторов увеличивает срок службы источников тока. Это позволяет использовать для питания различных энергетических систем НЦ-аккумуляторы вместо дорогостоящих литий-ионных источников тока. Показано, что повышение скорости растворения оксида цинка в щелочном растворе и увеличение поляризуемости катодного восстановления цинкатных ионов в щелочном растворе приводят к более длительному поддержанию высокой концентрации цинката калия у поверхности пористого цинкового электрода, снижает вероятность возникновения коротких замыканий и стабилизирует емкость аккумуляторов при длительном циклировании. Рассмотрено влияние доба-

вок серии БЦ, обладающей указанными свойствами, на возникновение коротких замыканий и стабилизацию емкости никель-цинковых аккумуляторов при их длительном циклировании.

Ключевые слова: дендриты, диффузия, емкость, короткие замыкания, никель-цинковый аккумулятор, поляризация, срок службы, цинкатный электролит, цинковый электрод.

Для цитирования: Гунько Ю.Л., Бачаев А.А., Козырин В.А., Козина О.Л., Васин Е.Н. Влияние некоторых добавок на емкостные характеристики и срок службы никель-цинковых аккумуляторов // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 21-35. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_21

INFLUENCE OF SOME ADDITIVES ON CAPACITY CHARACTERISTICS AND SERVICE LIFE OF NICKEL-ZINC BATTERIES

Yu.L. Gunko

ORCID: **0000-0002-9094-2477** e-mail: **gunko.ul@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Bachaev

ORCID: **0000-0002-8815-1342** e-mail: **bachaev_tep@list.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Kozyrin

ORCID: **0000-0002-6190-0067** e-mail: **kozyrin.v@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

O.L. Kozina

ORCID: **0000-0002-9284-7465** e-mail: **cn-gunko2008@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

E.N. Vasin

ORCID: **0000-0003-1565-7286** e-mail: **eugeny.vasin-evg2017@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. It is shown that use of certain additives in electrolyte or active mass of nickel-zinc batteries increases the lifetime of current sources. This makes possible using of nickel-zinc batteries instead of expensive lithium-ion current sources to supply various energy systems. A study of the influence of additives on the occurrence of short circuits and the stability of the capacitive characteristics of nickel-zinc batteries is presented. It is shown that an increase of dissolution rate of zinc oxide in an alkaline solution and an increase in the polarizability of the cathodic reduction of zincate ions in an alkaline solution lead to a longer maintenance of a high concentration of potassium zincate at the surface of a porous zinc electrode, reduces the probability of short circuits and stabilizes the battery capacity during long-term cycling. The effect of additives of the BC series with unique properties on the occurrence of short circuits and capacity stabilization of nickel-zinc batteries during their long-term cycling is considered.

Keywords: capacitance, dendrites, diffusion, nickel-zinc battery, polarization, service life, short circuits, zinc electrode, zincate electrolyte.

For citation: Yu.L. Gunko, A.A. Bachaev, V.A. Kozyrin, O.L. Kozina and E.N. Vasin, «Influence of some additives on capacity characteristics and service life of nickel-zinc batteries», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 21-35, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_21

I. Введение

В настоящее время для питания различных бытовых устройств и транспортных средств распространены литий-ионные источники тока. Однако в последние годы внимание исследователей снова привлекли Ni-аккумуляторы, которые, по мнению ряда авторов, могут найти широкое применение, включая беспроводные бытовые электроинструменты, мобильные телефоны, цифровые камеры, легковые автомобили [1].

Электрические характеристики Ni-аккумуляторов вполне соизмеримы с некоторыми типами литиевых источников тока, например, с литий-железо-фосфатными [2]. Это связано с их малой стоимостью, доступностью компонентов активных масс электродов и электролита, безопасностью при эксплуатации. Необходимо отметить и более простую и дешевую утилизацию вышедших из строя никель-цинковых аккумуляторов и элементов по сравнению с литиевыми.

Среди источников тока с водным электролитом высокими удельной емкостью и разрядным напряжением обладают серебряно-цинковые (СЦ) и никель-цинковые аккумуляторы (Ni), а также воздушно-цинковые источники тока [2]. Такие источники тока имеют давнюю историю, они были широко распространены во второй половине XX в. С появлением источников тока с неводными электролитами, например, литиевых, электрохимических топливных элементов, обладающих более высокими электрическими характеристиками и большим сроком службы, их применение в значительной степени сократилось. Однако в начале XXI в. вновь отмечается повышение интереса к

таким традиционным электрохимическим системам, в частности к никель-цинковым источникам тока [3]. Благодаря хорошей работоспособности при больших разрядных токах источники тока такой системы могут использоваться в качестве стартерных аккумуляторов, а также для питания различных бытовых устройств. Более активному возвращению традиционных щелочных источников тока к массовому потребителю может способствовать повышение их эксплуатационных характеристик, в первую очередь, срока их службы.

Выход из строя щелочно-цинковых аккумуляторов обусловлен рядом причин, например, перемещением активного вещества в теле отрицательного электрода и укрупнением частиц активного вещества, что приводит к уменьшению электрохимически активной поверхности и соответственно к постепенному снижению емкости. Однако следует отметить, что этот фактор проявляется при длительном циклировании аккумуляторов [2] и в значительной степени предсказуем. В то же время возникновение коротких замыканий зачастую происходит спонтанно, часто при невыработанном сроке службы аккумулятора [4].

Все вышесказанное определило постановку цели работы: выявление причин появления внутренних коротких замыканий, поиск мероприятий по их устранению и стабилизация емкости никель-цинковых источников тока при их длительном циклировании.

Нормальная эксплуатация никель-цинковых аккумуляторов связана с образованием на отрицательном электроде губчатых осадков [5]. Причины кристаллизации цинка в виде рыхлых и дендритных катодных осадков исследовались в работах [6, 7]. Значительное число исследований посвящено влиянию различных добавок на склонность к дендритообразованию при заряде щелочно-цинковых аккумуляторов. Так, в [8] показано, что добавка свинца может значительно тормозить образование и рост дендритов цинка.

Возникновение внутренних градиентов концентраций по ионам гидроксида и цинката будет, кроме создания условий для роста дендритов цинка, также способствовать переносу активного материала отрицательного электрода и соответственно уменьшению емкости при циклировании аккумулятора [9].

Однако полностью решить проблемы возникновения внутренних коротких замыканий щелочно-цинковых аккумуляторов из-за образования дендритов цинка и снижения емкости при длительном циклировании аккумуляторов в настоящее время не удалось. Это может быть связано с недостаточными знаниями особенностей восстановления оксида цинка в условиях минимального объема щелочно-цинкатного электролита, наличия полупроницаемого гидратцеллюлозного сепаратора на отрицательном электроде и плотной сборки электродного блока. В такой ситуации невозможно

осознанно подойти к выбору добавок и условий заряда, улучшающих работоспособность отрицательного электрода никель-цинковых аккумуляторов.

II. Экспериментальная часть

При эксплуатации никель-цинковых аккумуляторов происходят значительные изменения концентрации щелочи и цинката в электролите оксидноникелевого и цинкового электродов при заряде и разряде [10, 11]. Возникновение таких концентрационных градиентов по щелочи и цинкату калия между пространствами положительного и отрицательного электродов и в теле самих электродов может являться причиной выхода из строя длительно циклирующихся аккумуляторов из-за возникновения при заряде межэлектродных замыканий в виде цинковых дендритов, прорастающих через гидратцеллюлозную сепарацию. Кроме этого, появление внутриэлектродных градиентов концентрации щелочи и цинката калия может приводить к внутри- и внеэлектродному массопереносу активного вещества цинкового электрода и уменьшению его емкости.

Рост цинковых дендритов через гидратцеллюлозный сепаратор в направлении положительного электрода связан с особенностями диффузионных потоков реагирующих ионов цинката. Преимущественное восстановление цинкатных ионов в поверхностных слоях электрода приведет к сильному снижению концентрации цинката калия из-за расходования здесь основной массы оксида цинка (рис. 1).

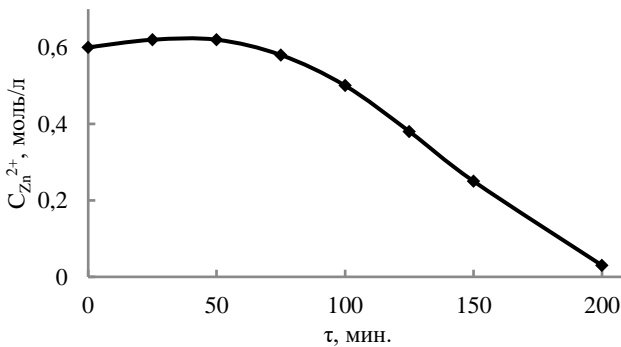


Рис. 1. Изменение концентрации цинката калия у поверхности цинкового электрода при заряде НЦ-аккумулятора:

плотность тока $-15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Электролит $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} \text{ KOH} + \text{ZnO}_{\text{насыщ}}$

Fig. 1. The change of the concentration of potassium zincate at the surface of the zinc electrode when charging a nickel-zinc battery:

current density $15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Electrolyte $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} \text{ KOH} + \text{ZnO}_{\text{sat}}$

Это приводит к интенсификации диффузии цинкатоных ионов из глубинных зон отрицательного электрода и внеэлектродного пространства через сепарацию. Рост дендритных осадков цинка происходит по направлению к зонам электролита, богатым цинкатом калия. Перенос цинката из глубинных зон электрода приводит к перемещению активного вещества при заряде во внешние зоны оксидноцинкового электрода. Замедленная диффузия цинката калия из зоны положительного электрода через гидратцеллюлозный сепаратор приведет к постепенному прорастанию цинковых дендритов и возникновению внутренних коротких замыканий в аккумуляторе.

Поддержание достаточной концентрации цинката в поверхностных зонах электрода в конце заряда может быть достигнуто как путем равномерного распределения тока по глубине электрода за счет увеличения поляризуемости процесса восстановления ионов цинката, так и за счет интенсификации диффузионного переноса цинката калия из глубинных зон электрода за счет поддержания там длительного времени его высокой концентрации. Последнее связано с увеличением скорости гетерогенной химической реакции растворения оксида цинка в образующемся избытке щелочи при восстановлении цинката. В этом случае наблюдается катодное осаждение предпочтительно губчатых, а не дендритных отложений цинка [12]. Поэтому можно предположить, что добавки в электролит или в активную массу отрицательного электрода, ускоряющие растворение оксида цинка в порах электрода, будут способствовать и замедлению прорастания цинковых дендритов через сепарацию при заряде щелочно-цинкового источника тока.

На кафедре ТЭП НГТУ (ГПИ) [13, 14] проводились исследования влияния некоторых добавок, применяемых для улучшения качества цинковых покрытий из щелочных электролитах, на характер образующихся гальванических осадков цинка. Наибольший интерес представляли добавки серии БЦ на основе бензилникотиновой кислоты и триэтанолamina (БЦ-1, НБЦ-М). Изучение влияния этих добавок на характеристики порошковых цинковых электродов показало улучшение работоспособности порошковых цинковых электродов в их присутствии [15]. Однако механизм действия таких улучшающих добавок в указанных работах не приводился, что вызывает необходимость проведения дополнительных исследований.

По результатам этих исследований отмечено существенное ускорение растворения оксида цинка в растворе калиевой щелочи в присутствии БЦ (рис. 2). Так в щелочи концентрацией $7 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$, содержащей $5 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ добавки БЦ-1, начальная скорость растворения оксида цинка примерно в 1,6 раза больше, чем в щелочном растворе без добавки.

Добавки БЦ также заметно изменяют характер катодных поляризационных зависимостей восстановления цинката в щелочно-цинкатных растворах (рис. 3). Отмечается некоторое торможение процесса катодного выделения цинка в присутствии добавки БЦ-1.

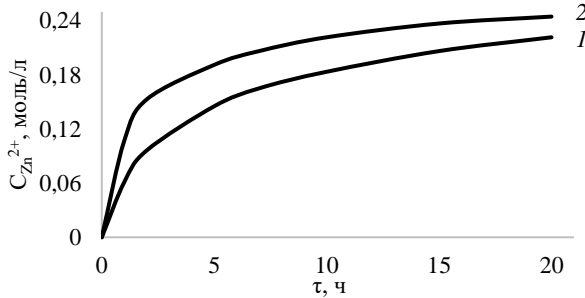


Рис. 2. Зависимость концентрации цинката калия во времени при растворении оксида цинка в щелочи.
 Состав электролита: $\text{KOH } 7 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$: 1 – без добавок; 2 – $5 \text{ мл}\cdot\text{л}^{-1}$ БЦ-1

Fig. 2. Dependence of the concentration of potassium zincate in time during the dissolution of zinc oxide in alkali.
 The composition of electrolyte: $\text{KOH } 7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$:
 1 – without additives; 2 – $5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ BC-1

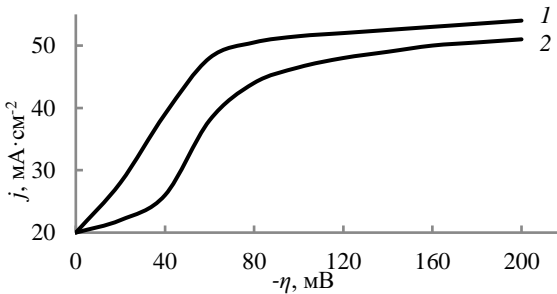


Рис. 3. Катодные потенциодинамические зависимости восстановления цинката на монолитном цинковом электроде.
 Состав электролита $\text{KOH } 7 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1} + 0,64 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1} \text{K}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$:
 1 – без добавок; 2 – $5 \text{ мл}\cdot\text{л}^{-1}$ БЦ-1.
 Скорость развертки потенциала – $1,0 \text{ мВ}\cdot\text{с}^{-1}$

Fig. 3. Cathodic potentiodynamic dependences of zinc reduction on a monolithic zinc electrode.
 Electrolyte composition $\text{KOH } 7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} + 0,64 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} \text{K}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$
 1 – without additives; 2 – $5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ BC-1. Potential sweep rate $1.0 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$

Повышение электрических характеристик пористых цинковых электродов и, соответственно, всего никель-цинкового аккумулятора при введении предложенных добавок серии БЦ увеличивает поляризацию катодного восстановления оксида цинка и скорость его растворения в щелочных растворах обосновано в работе [16]. Введение добавки НБЦ-М в электролит НЦ-аккумуляторов затрудняет процесс катодного восстановления оксида цинка и увеличивает электродную поляризацию порошковых отрицательных электродов при заряде на начальных этапах эксплуатации никель-цинковых аккумуляторов (рис. 4).

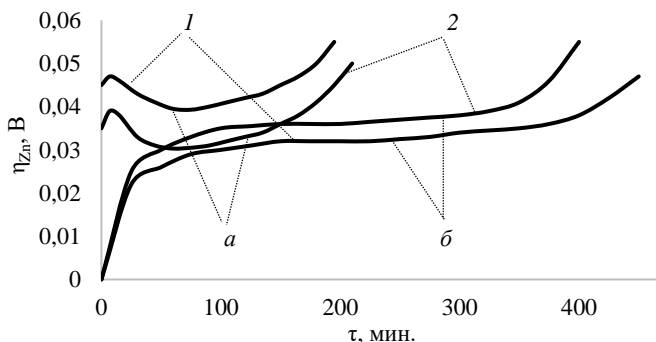


Рис. 4. Изменение потенциала цинкового электрода при заряде никель-цинкового аккумулятора при плотностях тока 15 (а); 6 (б) $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Добавка в активной массе Zn-электрода:

1- 3 % раствор НБЦ-М; 2-3 % раствор поливинилового спирта

Fig. 4. Change of the potential of the zinc electrode when charging a nickel-zinc battery at current densities 15 (a); 6 (b) $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Additive in the active mass of zinc electrode:

1- 3 % solution of NBC-M; 2-3 % solution of polyvinyl alcohol

Такое повышение поляризации способствует развитию поверхности активного вещества отрицательного электрода при заряде аккумулятора. Однако такое развитие поверхности в итоге приводит уменьшению истинной плотности зарядного тока и проявляется уже в снижении зарядного потенциала пористого цинкового электрода. Данный эффект сохраняется и при малых токах заряда. Прямые измерения концентрации цинката калия у поверхности пористого цинкового электрода в условиях заряжающегося НЦ-аккумулятора показали, что введение в электролит добавки НБЦ-М приводит к более длительному сохранению повышенного содержания цинката калия из-за увеличения скорости растворения оксида цинка в щелочи (рис. 5).

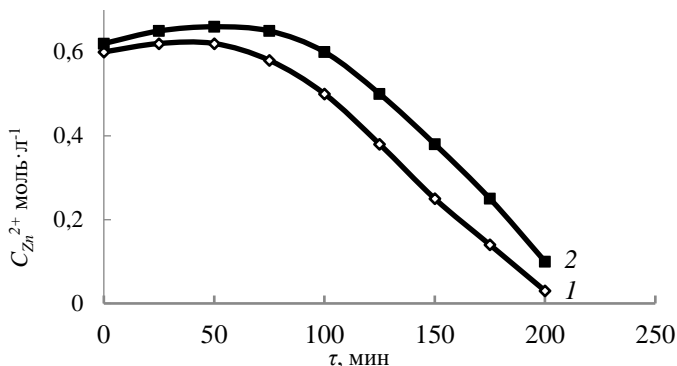


Рис. 5. Изменение концентрации цинката калия у поверхности оксидно-цинкового электрода при заряде НЦ-аккумулятора.

Состав электролита: KOH 7 моль·л⁻¹ + ZnO_{насыщ.}

1 – без добавок; 2 – 5 г·л⁻¹ БЦ-1 Плотность тока 15 мА·см⁻²

Fig. 5. Change of the concentration of potassium zincate at the surface of the zinc oxide electrode during of the charging of battery.

Electrolyte composition KOH 7 mol·l⁻¹ + ZnO_{sat}:

1 – without additives; 2 – 5 ml·l⁻¹ BC-1. Current density 15 mA·cm⁻²

В условиях НЦ-аккумулятора из-за неэквивалентного по емкости количеств активных веществ в положительном и отрицательном электродах заряд цинкового электрода прекращается при степени заряженности активного вещества 35-40 %, что соответствует области высокой концентрации цинката калия у поверхности отрицательного электрода (рис. 6). Это должно способствовать длительному сохранению достаточно большого количества оксида цинка и, соответственно, поддержанию высокой концентрации цинката у поверхности заряжающегося пористого цинкового электрода. Однако из-за различия в отдачах по току положительного и отрицательного электродов никель-цинкового аккумулятора через некоторое количество циклов цинковый электрод еще до окончания заряда положительного электрода оказывается полностью заряженным. Это приводит к резкому падению скорости наработки цинката калия и соответственно способствует образованию дендритных осадков и возникновению внутренних замыканий.

Таким образом, увеличение скорости реагирования оксида цинка со щелочью в присутствии добавки БЦ-1 и повышение поляризации при катодном восстановлении цинкатных ионов приводит к более длительному поддержанию высокой концентрации цинката в поверхностных зонах электрода (рис. 5) и, соответственно, может замедлить рост дендритных осадков

через сепарацию во внеэлектродное пространство с повышенным содержанием цинката. Прямые опыты по определению времени прорастания дендритов цинка через два слоя гидратцеллюлозной сепарации после полного заряда порошкового цинкового электрода, проведенные на специальной ячейке [4], показали, что время появления межэлектродных замыканий в присутствии в электролите аккумулятора добавки БЦ-1 увеличивается почти в полтора раза с 88 до 125 мин.

Такое влияние добавки БЦ-1 позволило увеличить срок службы макетов НЦ-аккумуляторов – у контрольных аккумуляторов внутренние короткие замыкания наблюдались уже на 35-37 циклах, у опытных аккумуляторов – на 50-60 циклах. Исследуемая добавка БЦ-1, увеличивая скорость растворения оксида цинка и поляризуемость катодного процесса, привела к повышению срока службы НЦ-аккумуляторов и стабилизации их емкости при циклировании (табл. 1).

Таблица 1.
Влияние добавок в активной массе цинкового электрода на емкостные характеристики макетов НЦ-аккумуляторов при циклировании. Плотность тока 15 мА/см²

Table 1.
Influence of additives in the active mass of zinc electrode on the capacitance characteristics of samples of batteries during cycling. Current density 15 mA·cm²

№	Содержание добавок в активной массе, масс. %		Емкость цинкового электрода, А·ч	
	Связующее поливиниловый спирт	Добавка БЦ-1	10 цикл	60 цикл
1	7	-	0,50	0,26
2	-	6	0,52	0,41

Стабилизация емкости цинковых аккумуляторов наблюдается как при малых, так и при больших разрядных плотностях тока. При малых плотностях разрядного тока к шестидесятому циклу падение емкости для контрольных аккумуляторов составило около 40 %, в то время как в присутствии добавки БЦ-1 емкость цинкового электрода НЦ-аккумулятора уменьшилась на 20 %. При плотности разрядного тока 34 мА·см⁻² разница в емкостях контрольных и опытных аккумуляторов составила уже около 40 %.

Повышение работоспособности цинкового электрода в присутствии добавки БЦ-1 привело к более редкому проведению периодических глубоких разрядов и, соответственно, улучшило разрядные характеристики положительного оксидноникелевого электрода, в том числе, при разрядах большими плотностями тока (рис. 6).

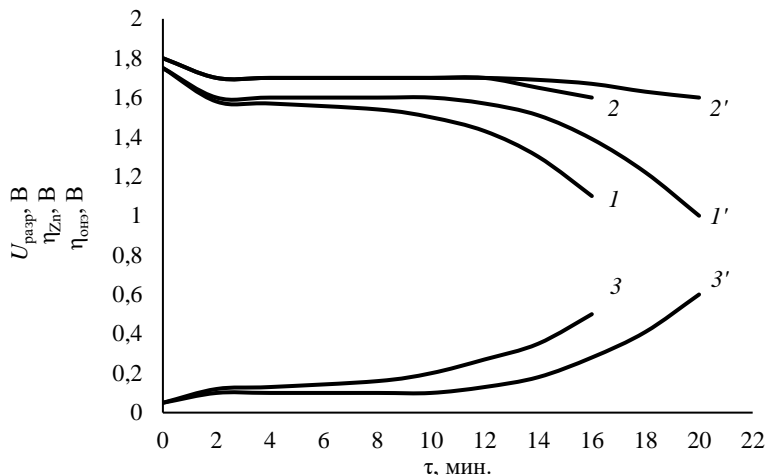


Рис. 6. Разрядные кривые цинковых и оксидоникелевых электродов и разрядного напряжения макетов НЦ-аккумуляторов на 30 цикле.
*Плотность разрядного тока $62 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Состав электролита $\text{KOH } 7 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$:
 1, 2, 3 – без добавок; 1', 2', 3' – $5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ БЦ-1*

Fig. 6. Discharge curves of zinc and nickel oxide electrodes and discharge voltage of prototypes of NC batteries at cycle 30. Discharge current density $62 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.
*Electrolyte composition: $\text{KOH } 7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$:
 1, 2, 3 – without additives; 1', 2', 3' – $5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ BC-1*

Таким образом, обеспечение максимального срока службы никель-цинковых аккумуляторов и стабильной разрядной емкости на протяжении большого количества зарядно-разрядных циклов возможно при введении в электролит или в состав активной массы источника тока добавок, повышающих скорость растворения оксида цинка в щелочном растворе и увеличивающих катодную поляризацию процесса восстановления цинката калия.

III. Выводы

Благодаря введению в электролит и активную массу никель-цинковых аккумуляторов добавок серии БЦ срок службы источников тока увеличивается. Это расширяет возможности применения НЦ-аккумуляторов вместо литий-ионных источников тока для питания различных энергетических объектов. Поддержание высокой концентрации цинката калия у поверхности заряжающегося цинкового электрода снижает вероятность возникновения внутренних коротких замыканий при циклировании щелочно-цинковых аккумуляторов.

Исследовано влияние добавок серии БЦ (БЦ-1, БЦ-М) на характеристики никель-цинковых аккумуляторов. Показано замедление роста дендритов цинка за счет увеличения скорости растворения оксида цинка в щелочном растворе в присутствии указанных добавок.

Добавки серии БЦ (БЦ-1, БЦ-М), введенные в электролит, повышают поляризуемость процесса восстановления цинката калия, что приводит к стабилизации емкости при циклировании никель-цинковых аккумуляторов, особенно при больших разрядных токах.

© Гунько Ю.Л., 2023

© Бачасв А.А., 2023

© Козырин В.А., 2023

© Козина О.Л., 2023

© Васин Е.Н., 2023

Поступила в редакцию 17.02.2023

Принята к публикации 21.03.2023

Received 17.02.2023

Accepted 21.03.2023

Библиографический список

- [1] Melhem Z. Electricity transmission, distribution and storage systems. Woodhead Publishing, 2013. – 512 p.
- [2] Коровин Н.В., Скундин А.М. Химические источники тока. М. МЭИ, 2003. – 740 с.
- [3] «Астерpower». Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <http://астерpower.ru/> (дата обращения 02.02.2023).
- [4] Шапот М.Н., Левенфиш П.Г., Левин Н.И., Кочетова Т.И. Исследование причин коротких замыканий в серебряно-цинковом аккумуляторе // Сборник работ по ХИТ. Ленинград: Энергия, 1970. С. 124-132.
- [5] Решетова Г.Н., Афанасьева Н.А., Архангельская З.П. Влияние условий осаждения губчатого цинка на свойства пористого электрода // Сборник работ по ХИТ. Ленинград: Энергия, 1969. С.150-157.
- [6] Diggle J.W., Despic A.R., Bockris J.O. The mechanism of the dendritic electrocrystallization of zinc // Journal of The Electrochemical Society. 1969. № 116 (11). P. 1503-1513. DOI: 10.1149/1.2411588
- [7] Кудрявцев Н.Т. Причины образования губчатых осадков цинка на катоде // Доклады АН СССР. 1950. № 72 (1). С. 93-97.
- [8] Diggle J.M., Danijanović A. The inhibition of the dendritic electrocrystallization of zinc from doped alkaline zincate solutions // Journal of The Electrochemical Society. 1972. № 119 (12). P. 1649-1658. DOI: 10.1149/1.2404065
- [9] Архангельская З.П., Иванов Е.Г., Котоусов С.Г., Неуворуева Е.М. Серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые источники тока на современном этапе развития // Сборник работ по ХИТ. Ленинград: Энергия, 1974. С. 249-268.

- [10] Гунько Ю.Л., Пасманик Е.В., Михаленко М.Г. Моделирование процесса разряда никель-цинкового аккумулятора // IX Всесоюз. конф. «Химическая информатика», Январь 11-15, 1992. Черноголовка, Россия: РАН, Институт физиологии активных веществ, 1992. С. 286.
- [11] Козырин В.А., Гунько Ю.Л., Михаленко М.Г. Моделирование процесса заряда пористого оксидно-цинкового электрода щелочноцинкового аккумулятора // IX Всесоюз. конф. «Химическая информатика», Январь 11-15, 1992. Черноголовка, Россия: РАН, Институт физиологии активных веществ, 1992. С. 289.
- [12] Mojtahedi M., Goodarzi M., Sharifi B., Khaki J. Effect of electrolysis condition of zinc powder production on zinc-silver oxide battery operation // *Energy Conversion and Management*. 2011. № 52 (4). P. 1876-1880. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.11.001
- [13] Меркулов А.В., Флеров В.Н., Страхов Н.Л., Быкадоров А.Т., Пятин Б.П. Электролит цинкования, Пат. 876799 SU, заявл. 29.12.79; опубл. 30.10.81. – Бюл. № 40.
- [14] Андрухив А.И., Бачасв А.А., Скобелева И.В. Оптимизация состава цинкатного электролита для получения электролитически осажденных порошковых цинковых электродов // *Журнал прикладной химии*. 2013. № 86 (10). С. 1525-1534. DOI: 10.1134/S1070427213100042
- [15] Козырин В.А., Гунько Ю.Л., Михаленко М.Г. Стабилизация характеристик порошковых цинковых электродов щелочно-цинковых аккумуляторов // *Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики*, Саратов: Изд-во СГУ, 1999. С. 197-198.
- [16] Гунько Ю.Л., Козырин В.А., Козина О.Л., Ананьева Е.Ю., Михаленко М.Г. Катодное восстановление оксида цинка в щелочном электролите // *Электрохимия*. 2022. № 58 (1). С. 13-27. DOI: 10.31857/S0424857022010054
- [17] «Лиотех» Официальный сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.liotech.ru/> (дата обращения 02.02.2023).

References

- [1] Z. Melhem, *Electricity transmission, distribution and storage systems*. Woodhead Publishing, 2013.
- [2] N.V. Korovin and A.M. Skundin, *Himicheskie istochniki toka. Spravochnik [Chemical current sources]*. Moscow: MEI, 2003 (in Russian).
- [3] Oficial'nyj sajt kompanii «AcmePower» [Official site of the AcmePower company]. [Online]. Available at: <http://acmepower.ru/> [Accessed: Feb. 2, 2023] (in Russian).
- [4] M.N. Shapot, P.G. Levenfish, N.I. Levin and T.I. Kochetova, “Issledovanie prichin korotkih замыkanij v serebryano-cinkovom akkumulyatore [Study of the causes of short circuits in a silver-zinc battery]”, in *Sbornik rabot po HIT [Collection of works on HIT]*, Leningrad: Energiya, 1970, pp. 124-132 (in Russian).
- [5] G.N. Reshetova, N.A. Afanasyeva and Z.P. Arkhangelskaya, “Vliyanie uslovij osazhdeniya gubchatogo cinka na svoystva poristogo elektroda [Influence of the deposition conditions of spongy zinc on the properties of a porous electrode]”, in *Sbornik rabot po HIT [Collection of works of HIT]*, Leningrad: Energiya, 1969, pp.150-157 (in Russian).

- [6] J.W. Diggle, A.R. Despic and J.O. Bockris, "The mechanism of the dendritic electrocrystallization of zinc", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 116, no. 11. pp. 1503-1513, Nov. 1969. DOI: 10.1149/1.2411588.
- [7] N.T. Kudryavtsev, "Prichiny obrazovaniya gubchatykh osadkov cinka na katode [Reasons for the formation of spongy zinc deposits on the cathode]", *Reports of the USSR Academy of Sciences*, vol. 72, no.1. pp. 93-97, Jan. 1950.
- [8] J.W. Diggle, A. Danijanović, "The inhibition of the dendritic electrocrystallization of zinc from doped alkaline zincate solutions", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 119, no. 12. pp. 1649-1658, Dec. 1972. DOI: 10.1149/1.2404065
- [9] Z.P. Arkhangelskaya, E.G. Ivanov, S.G. Kotousov and E.M. Neuvorueva "Serebryano-cinkovye i serebryano-kadmievye istochniki toka na sovremennom etape razvitiya [Silver-zinc and silver-cadmium current sources at the present stage of development]", in *Sbornik rabot po HIT [Collection of works of HIT]*, Leningrad: Energiya, 1974, pp. 249-268 (in Russian).
- [10] Yu.L. Gunko, E.V. Pasmanik and M.G. Mikhalenko, "Modelirovanie processa razryada nikel'-cinkovogo akkumulyatora [Modeling the process of discharging a nickel-zinc battery]", in proc. IX Vsesoyuz. konf. "Himicheskaya informatika" [IX All-Union. conf. "Chemical informatics"], Jan. 11-15, 1992, Chernogolovka, Russia, p. 286 (in Russian).
- [11] V.A. Kozyrin, Yu.L. Gunko, and M.G. Mikhalenko, "Modelirovanie processa zaryada poristogo oksidno-cinkovogo elektroda shchelochnocinkovogo akkumulyatora [Modeling of the process of charging a porous zinc oxide electrode of an alkaline zinc battery]", in proc. IX Vsesoyuz. konf. "Himicheskaya informatika" [IX All-Union. conf. "Chemical Informatics"], Jan. 11-15, 1992, Chernogolovka, Russia, p. 289 (in Russian).
- [12] M. Mojtahedi, M. Goodarzi, B. Sharifi and J. Khaki, "Effect of electrolysis condition of zinc powder production on zinc-silver oxide battery operation", *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 4. pp. 1876-1880, Apr. 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.11.001
- [13] A.V. Merkulov, V.N. Flerov, N.L. Strakhov, A.T. Bykadorov and B.P. Pyatin, "Electrolite tincovaniya [Galvanizing electrolyte]", Patent SU 876799, Oct. 30, 1981 (in Russian).
- [14] A.I. Andrukiv, A.A. Bachaev and I.V. Skobeleva, "Optimization of the composition of zincate electrolyte for fabrication of electrodeposited zinc powder electrolytes", *Journal of Applied Chemistry*, vol. 86, no. 10, pp. 1525-1534, 2013. DOI: 10.1134/S1070427213100042
- [15] V.A. Kozyrin, Yu.L. Gunko and M.G. Mikhalenko, "Stabilizaciya harakteristik poroshkovykh cinkovykh elektrodov shchelochno-cinkovykh akkumulyatorov [Stabilization of the characteristics of zinc powder electrodes in alkaline zinc batteries]", in *Fundamental'nye problemy elektrohimicheskoy energetiki [Fundamental problems of electrochemical energy]*, Saratov: Publishing House of Saratov State University, 1999, pp. 197-198 (in Russian).
- [16] Yu.L. Gunko, V.A. Kozyrin, O.L. Kozina, E.Yu. Ananyeva and M.G. Mikhalenko, "Cathodic reduction of zinc oxide in an alkaline electrolyte", *Electrochemistry*, vol. 58, no. 1, pp. 13-27, 2022. DOI: 10.31857/S0424857022010054

- [17] Official'nyj sajt kompanii "Liotech" [Official site of the Liotech company]. [Online]. Available at: <https://www.liotech.ru/> [Accessed: Feb. 2, 2023] (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гулько Юрий Леонидович,
доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Yuri L. Gun'ko, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Бачаев Александр Андреевич,
кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexander A. Bachaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Козырин Владимир Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Vladimir A. Kozyrin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Козина Ольга Леонидовна,
кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Olga L. Kozina, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Васин Евгений Николаевич,
ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Eugeny N. Vasin, assistant of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation