

УДК 544.65

## О ЗАВИСИМОСТИ ЁМКОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА ОТ ТОКА РАЗРЯДА

Х. Х. Альвиев ✉

ОАО «Чеченнефтехимпром»  
364051, Россия, Чеченская Республика, Грозный, пр. Революции, 7/84

✉ E-mail: chnefhimp@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2013 г.

Проведены циклические испытания литий-ионных аккумуляторов в широком интервале температур и токов разряда. Обнаружено, что существует некоторая пороговая разрядная нагрузка, при превышении которой разрядная ёмкость резко падает.  
*Ключевые слова:* литий-ионные аккумуляторы, уравнение Пейкертта, разрядная ёмкость.

## THE EFFECT OF DISCHARGE CURRENT UPON BATTERY CAPACITY

Kh. Kh. Alviev ✉

JSC «Chechenneftechimprom»  
Groznyj, Russia, 364051, Chechen Republic, Grozny, Revolyutsii Ave., 7/84

✉ E-mail: chnefhimp@mail.ru

Received 14.02.2013

Cycling tests of lithium-ion batteries in wide temperature and load ranges have been carried out. The existence of certain threshold discharge load corresponding abrupt decrease of discharge capacity was found.  
*Key words:* lithium-ion batteries, Peukert equation, discharge capacity.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, ёмкость, отдаваемая полностью заряженным аккумулятором при разряде, зависит от тока разряда. При разряде относительно малыми токами разрядная ёмкость постоянна и равна зарядной ёмкости. При не слишком малых токах увеличение тока разряда приводит к снижению отдаваемой ёмкости. Обычно зависимость ёмкости  $Q_p$  от тока разряда  $I$  выражается известным уравнением Пейкертта (см., напр., [1]):

$$Q_p = Q_0 / I^\alpha, \quad (1)$$

где  $Q_0$  и  $\alpha$  — константы, причём значение  $\alpha \equiv -d \lg Q_p / d \lg I$  находится, как правило, в пределах от 0.2 до 0.7. Переход от независимости разрядной ёмкости от тока разряда к зависимости, описываемой уравнение (1), соответствует некоторой области токов, зависящей от конкретной конструкции аккумулятора. Для свинцовых стартерных и для никель-кадмиевых аккумуляторов этот переход происходит при нагрузках, существенно меньших, чем  $C/10$ . Уравнение Пейкертта выполняется, в частности, и для коммерческих литий-ионных аккумуляторов, однако значение  $\alpha$  во многих случаях не превышает 0.1. В настоящей работе предпринята по-

пытка определить зависимость разрядной ёмкости от тока разряда для нового типа литий-ионных аккумуляторов, в которых активным материалом отрицательного электрода является нанотитанат лития  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO), а материалом положительного электрода служит литированный смешанный оксид марганца, никеля и кобальта (NMC).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В первой серии экспериментов исследуемыми объектами служили опытные образцы аккумуляторов системы NMC/LTO номинальной ёмкостью 60 А·ч. Аккумуляторы циклировали в составе батареи из 6 последовательно соединённых аккумуляторов в широком диапазоне токов разряда (от 3 до 350 А, т. е. от  $C/20$  до  $5.83C$ ) и температур (от  $-30$  до  $+50$  °С). Заряд проводили или при токе 6 А ( $C/10$ ) или при токе 100 А ( $1.67C$ ). Во второй (сравнительной) серии экспериментов исследуемыми объектами были коммерческие аккумуляторы традиционной электрохимической системы (кобальтат лития/углерод) фирмы Кокат номинальной ёмкостью 350, 720 и 880 мА·ч. Измерения в этой сравнительной серии проводили при комнатной температуре ( $20$ – $22$  °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости ёмкости коммерческих аккумуляторов фирмы Kokam от тока разряда в логарифмических координатах. Ток разряда выражен в единицах  $C$ , т. е.  $I = 1$  соответствует разряду в режиме  $1C$ . Как видно, при токах менее  $1C$  ёмкость практически не зависит от тока, а при больших токах выполняется уравнение Пейкерта. Наклонные прямые на рис. 1 проведены по методу наименьших квадратов. Значение  $-d \lg Q_p / d \lg I$  составляет 0.295, 0.117 и 0.124 для аккумуляторов с номинальной ёмкостью, соответственно, 350, 720 и 880 мА·ч. В диапазоне малых токов разряда также можно проследить некоторое снижение ёмкости с ростом тока. Значение  $-d \lg Q_p / d \lg I$  для пунктирных прямых на рис. 1 составляет 0.01.

Зависимости, приведённые на рис. 1, вообще характерны для литий-ионных аккумуляторов. Например, для аккумуляторов фирмы Danionics значения  $\alpha$  для токов разряда больше  $1C$  составляют 0.06-0.08, а для меньших токов — около 0.01. Для аккумуляторов фирмы e2-tes значения  $\alpha$  для области больших токов (зависящей от типа аккумулятора) составляет от 0.15 до 0.3, а для области малых токов — близко к 0.01. Для аккумуляторов фирмы ThunderSky в широком диапазоне токов разряда — от  $C/2$  до  $5C$  значение  $\alpha$  составляет 0.075. Аналогично, для аккумуляторов Hitachi Maxell значение  $\alpha$  в диапазоне разрядных токов от  $C/5$  до  $3C$  составляет 0.03.

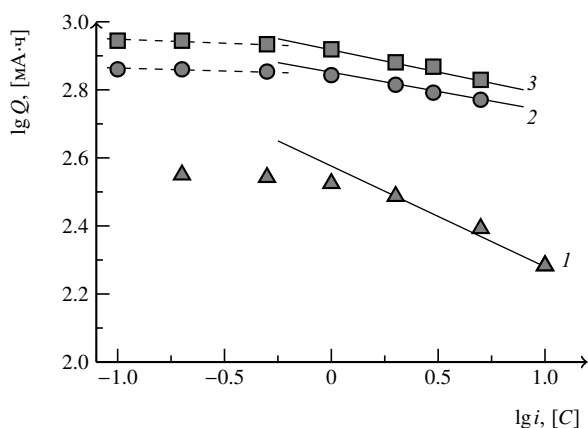


Рис. 1. Зависимость разрядной ёмкости аккумуляторов фирмы Kokam номинальной ёмкостью 350 (▲), 720 (●) и 880 (■) мА·ч от тока разряда. Ёмкость выражена в мА·ч, ток — в единицах  $C$  ( $I = 1$  соответствует разряду в режиме  $1C$ )

Несколько иные результаты получаются при испытаниях опытных образцов аккумуляторов системы NMC/LTO. На рис. 2 приведены результаты, полученные при разряде при температурах  $+20$ ,  $+25$  и  $+50$  °C. В этом случае ёмкость практически не из-

меняется с изменением температуры, что характерно для литий-ионных аккумуляторов. В диапазоне нагрузок от  $C/20$  до  $4.2C$  ёмкость не зависит и от тока разряда (точнее, в масштабе рис. 2 невозможно различить наклон, соответствующий значениям  $\alpha$  порядка 0.01). Однако при дальнейшем увеличении тока разряда ёмкость резко снижается. Формально такое падение ёмкости (пунктирная прямая на рис. 2) соответствует значению  $\alpha = 4.47$ .

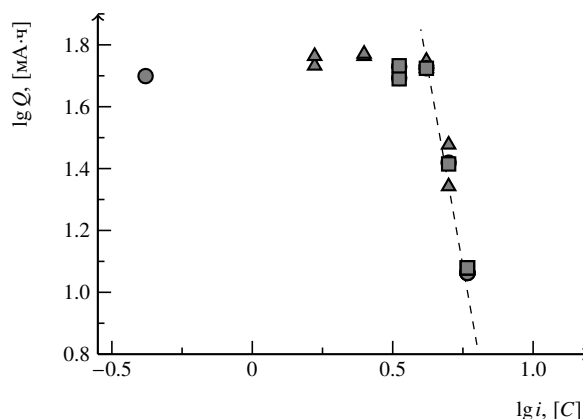


Рис. 2. Зависимость разрядной ёмкости опытных образцов аккумуляторов от тока разряда при температурах  $+20$  °C (●),  $+25$  °C (■) и  $+50$  °C (▲). Ёмкость выражена в А·ч, ток — в единицах  $C$  ( $I = 1$  соответствует разряду в режиме  $1C$ )

На рис. 3 приведены результаты, полученные при температурах  $-18$  и  $-30$  °C. Здесь уже при токах разряда в интервале от 100 до 250 А (т. е. от  $1.67C$  до  $4.17C$ ), по крайней мере, для температуры  $-18$  °C можно отметить поведение, характерное для уравнения Пейкерта со значением  $\alpha$  около 0.43. Затем происходит резкое падение ёмкости. Для температуры  $-30$  °C резкое падение ёмкости началось уже при токе 200 А ( $3.33C$ ).

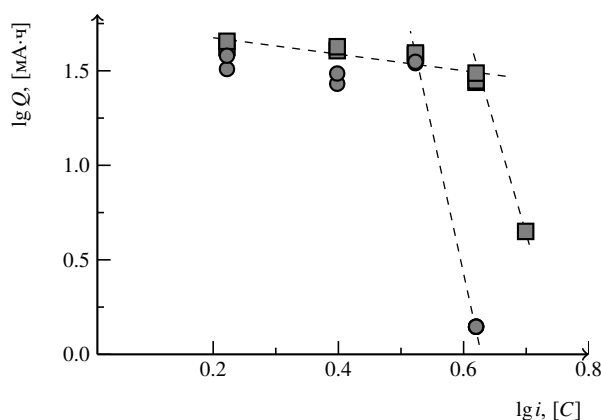


Рис. 3. Зависимость разрядной ёмкости опытных образцов аккумуляторов от тока разряда при температурах  $-18$  °C (■) и  $-30$  °C (●). Ёмкость выражена в А·ч, ток — в единицах  $C$  ( $I = 1$  соответствует разряду в режиме  $1C$ )

Таким образом, из результатов настоящей работы следует вывод о существовании неких пороговых значений разрядной нагрузки аккумуляторов, после которых разрядная ёмкость кардинально уменьшается.

Физический смысл уравнения Пейкерта состоит в том, что оно описывает поведение электродов как систем с распределёнными параметрами. За счёт омических и диффузионных затруднений в порах электродов глубина проникновения электрохимического процесса в активном слое пористого электрода (так называемая характерная омическая или диффузионная длина) уменьшается по мере увеличения тока нагрузки (см., напр., [2]). Пока характерная длина превышает толщину активного слоя электрода, ёмкость аккумулятора не зависит от тока нагрузки. Когда по мере увеличения тока нагрузки характерная длина процесса становится меньше толщины актив-

ного слоя, ёмкость уменьшается по мере роста тока в соответствии с уравнением Пейкерта. Возможно, что при достаточно больших токах разряда характерная длина становится сравнимой с характерным размером структурных элементов электрода вблизи его поверхности, что и приводит к резкому спаду ёмкости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При испытаниях литий-ионных аккумуляторов обнаружено резкое падение разрядной ёмкости при превышении током разряда некоторого предела. Высказано предположение, что это явление проявляется в тех случаях, когда расчётная характерная длина процесса в пористом электроде становится сравнимой с характерным размером структурных элементов электрода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химические источники тока: справочник / под ред. Н. В. Коровина, А. М. Скундина. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 2003.

2. Гуревич И. Г., Вольфович Ю. М., Багоцкий В. С. Жидкостные пористые электроды. Минск: Наука и техника, 1974.

## REFERENCES

1. *Himicheskie istochniki toka* [Power Sources] ed. N. V. Korovin, A. M. Skundin. Moscow, Izdatel'stvo MEI Publ., 2003, 1740 p. (In Russian).

2. Gurevich I. G., Volkovich Ju. M., Bagockij V. S. *Zhidkostnye poristye elektrody* [Liquid porous electrodes]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1974, 248 p. (In Russian).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Альвинов Хожбауди Хамзатович** — генеральный директор, ОАО «Чеченнефтехимпром», г. Грозный. Служебный телефон: (8712) 222-292, e-mail: chnefhimp@mail.ru.