

УДК 621.355.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКРЫТЫХ НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ С ТОНКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Г. П. Сметанкин, А. С. Бурдюгов, Т. В. Плохова

*Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт электровозостроения (ОАО «ВЭЛНИИ»)
Новочеркасск, Ростовская обл., Россия*

E-mail: velnii@novoch.ru

Поступила в редакцию 09.02.12 г.

Представлены результаты формирования никель-кадмиевых аккумуляторов асимметричным током по режиму, предусматривающему проведение длительного заряда первого цикла до прекращения роста напряжения на аккумуляторе. Подтверждена возможность использования напряжения на аккумуляторе в качестве критерия окончания заряда. Проведенные исследования показывают эффективность режима с применением выбранного критерия, что выражается в значительном сокращении числа зарядно-разрядных циклов формирования при сохранении заданных эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: никель-кадмиевый аккумулятор, тонкие электроды, ускоренное формирование, асимметричный ток.

The results of nickel-cadmium accumulators formation with asymmetric current, in the mode providing long life of the first cycle till the accumulator stress stops to grow, are represented. The possibility of using stress on the accumulator as criterion of charge completion is proved. Research shows efficiency of mode applying chosen criterion – considerable decrease of charge-discharge cycles of formation while preserving given working characteristics.

Key words: nickel-cadmium accumulator, thin electrodes, accelerated formation, asymmetric current.

ВВЕДЕНИЕ

Никель-кадмиевые аккумуляторы (НКА) благодаря своим уникальным свойствам в сравнении с аккумуляторами других электрохимических систем находят широкое применение в различных областях техники. Одной из проблем, возникающей при изготовлении НКА и оказывающей влияние на себестоимость продукции, является большая продолжительность технологического процесса формирования ёмкости и фазового состава активной массы электродов (далее – формирования). Эта проблема особенно актуальна для аккумуляторов плотной сборки с тонкими электродами, металлокерамическими или прессованными. Для аккумуляторов такого типа число зарядно-разрядных циклов формирования достигает двадцати и более, что требует значительных затрат энергии и времени [1].

Рациональные режимы формирования ёмкости никель-кадмиевых аккумуляторов, сокращающие время формирования при сохранении тре-

буемых эксплуатационных характеристик, могут быть разработаны на основе исследований их физических моделей с последующим использованием полученных результатов при выборе режимов формирования для аккумуляторов, выпускаемых промышленностью в настоящее время. Способы решения задач, связанных с сокращением продолжительности процесса формирования ёмкости НКА, предусматривают использование специальных режимов заряда. Один из таких специальных режимов рассмотрен в работе [2], где исследуется процесс формирования ёмкости закрытых НК аккумуляторов с тонкими металлокерамическими оксиднониккелевыми (МК ОНЭ) и тонкими прессованными кадмиевыми электродами на примере их физических моделей номинальной ёмкостью 0.5 А·ч, собранных из электродов аккумуляторов номинальной ёмкостью 22 А·ч. Рассмотренный режим формирования предусматривает проведение заряда асимметричным током с коротким и мощным разрядным импульсом, со средним значением асимметричного тока, равным значению постоянного тока, регламентированному для

формирования данного типа аккумуляторов при изготовлении. Отличительной особенностью режима является проведение длительных зарядов до стабилизации зарядного напряжения, которая принята в качестве критерия окончания заряда.

Критерием окончания заряда при формировании постоянным током является определенное количество сообщенной ёмкости, которое постепенно увеличивается от цикла к циклу. Максимальная зарядная ёмкость первого цикла численно равна значению номинальной ёмкости и не может быть увеличена из-за сильного нагрева аккумуляторов и интенсивного газовыделения, сопровождающегося выплескиванием электролита. При формировании аккумуляторов плотной сборки с тонкими электродами остановка заряда на остывание и отгазовку является обязательной, даже несмотря на то, что заряд проводится в условиях кондиционирования.

Заряд асимметричным током существенно изменяет характер и интенсивность газообразования, что делает возможным увеличение длительности заряда для реализации условия завершения процесса преобразования активной массы электродов. При соблюдении этого условия наблюдается максимальный прирост разрядной ёмкости от цикла к циклу и сокращение общего количества циклов в несколько раз.

Рассмотренные исследования проводились на физических моделях аккумуляторов, в которых электроды находились в свободном объеме электролита. В реальных же аккумуляторах концентрационные затруднения выше и условия газообмена хуже. Кроме того, при сравнимой площади поверхности ячеек и аккумуляторов удельная тепловая нагрузка на поверхность аккумуляторов (сорок один электрод) пропорционально выше, чем у ячеек (три электрода), что ведет к более сильному их разогреву. В исследуемых ячейках на один оксидно-никелевый электрод приходится два кадмиевых электрода, тогда как в реальных аккумуляторах это соотношение несколько превышает единицу (кадмиевых электродов на один больше, чем оксидно-никелевых), т.е. запас активной массы отрицательных электродов в ячейках значительно больше, следовательно, в реальных аккумуляторах выход на водород будет происходить раньше.

Полученные результаты [2] делают актуальным проведение исследования процесса формирования ёмкости реальных НКА с плотной сборкой тонких электродов для поиска оптимальной длительности заряда, обеспечивающей максимальное сокращение общего времени формирования ёмкости.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования процесса формирования ёмкости была проведена серия экспериментов с использованием свежеизготовленных закрытых НКА с тонкими МК ОНЭ и прессованными кадмиевыми электродами номинальной ёмкостью ($C_{ном}$) 22 А·ч. Перед началом экспериментов аккумуляторы были залиты электролитом плотностью 1.2 г/см³ с добавлением LiOH в количестве 10 г/л и вакуумированы. Подготовленные таким образом аккумуляторы были разделены на две группы по три аккумулятора в каждой.

Аккумуляторы двух групп заряжались асимметричным током с параметрами, аналогичными параметрам тока, выбранным в работе [2] для заряда моделей аккумуляторов: частота 4 Гц, соотношение амплитуд разрядного и зарядного импульсов 3, длительность зарядного импульса 220 мс, длительность разрядного импульса 20 мс с паузами между ними 2 мс. Среднее значение асимметричного тока ($I_{зар}$) равно 10 А.

Заряд первых циклов аккумуляторов первой группы проводили до ёмкости $3C_{ном}$. Заряд первых циклов аккумуляторов второй группы вели до стабилизации напряжения или до отслеживания тенденции к его стабилизации, которую можно выразить математическим выражением $\Delta U/\Delta T \leq \epsilon$. Заряд прекращается, как только значение этого выражение становится меньше заданного. Во время заряда контролировали температуру корпуса аккумулятора с помощью датчика температуры. При подъеме температуры корпуса выше 28°C применяли воздушное охлаждение. Разряжали аккумуляторы всех групп постоянным током ($I_{разр}$), равным 10 А, до конечного напряжения 1 В. Смену электролита в аккумуляторах проводили после заряда каждого цикла. Использовали электролит плотностью 1.3 г/см³ с добавлением LiOH в количестве 10 г/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние количества электричества, сообщенного при заряде первого цикла на разрядную ёмкость, показано на рис. 1, где приведены зарядные и разрядные кривые, построенные по данным первого цикла формирования, а также кривые газовыделения и температуры при заряде. Данные усреднены для каждой группы аккумуляторов.

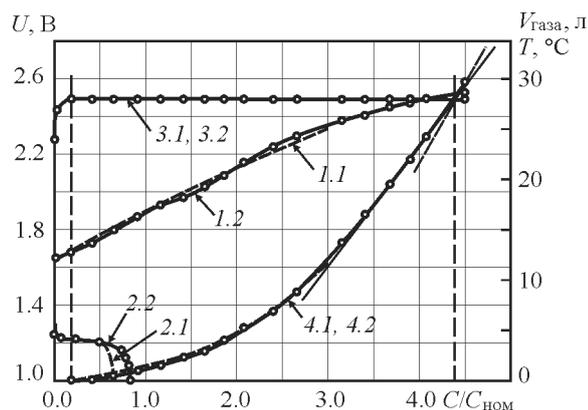


Рис. 1. Усредненные по первой и второй группам аккумуляторов кривые первого цикла формирования: 1 – зарядные кривые; 2 – разрядные кривые; 3 – кривые изменения температуры; 4 – кривые газовыделения

Анализируя полученные графики, в частности, кривые газовыделения и температуры двух групп аккумуляторов, можно отметить, что при проведении первого цикла формирования температура корпуса аккумуляторов поднялась с 24°C в начале эксперимента до 28°C, когда значение зарядной ёмкости приблизилось к 0.2C_{ном}, после чего было использовано воздушное охлаждение, которое применялось на протяжении всего времени заряда. Слабый разогрев аккумуляторов, который компенсировался воздушным охлаждением, и низкая интенсивность газовыделения позволи-

ли провести длительные заряды до сообщения зарядной ёмкости 3C_{ном} аккумуляторам первой и 4.5C_{ном} аккумуляторам второй группы. В то время как по технологической карте завода-изготовителя заряд первого цикла при формировании постоянным током проводят до сообщения аккумуляторам ёмкости, численно равной C_{ном}.

Можно также отметить плавный рост напряжения на протяжении всего времени заряда первого цикла. На момент остановки заряда аккумуляторов первой группы при значении зарядной ёмкости 66 А·ч (3C_{ном}) напряжение продолжает расти, тенденции к снижению скорости его роста не прослеживается. Скорость роста напряжения начинает снижаться только тогда, когда значение зарядной ёмкости приближается к 88 А·ч (4C_{ном}). А тенденция к его стабилизации наблюдается после сообщения 96.8 А·ч (4.4C_{ном}), что можно проследить по зарядной кривой аккумуляторов второй группы. На кривой газовыделения аккумуляторов первой группы видно, что этому же значению зарядной ёмкости соответствует увеличение угла наклона кривой газовыделения. Проведенный расчет показал, после сообщения 96.8 А·ч объём газа соответствует электролизу воды (0.627 дм³/А·ч).

Форма кривой заряда для НКА закрытого типа определяется отрицательным электродом [3]. Стабилизация напряжения в конце заряда, связанная с завершением восстановления окиси кадмия и переходом на 100%-ный выход водорода, свидетельствует о завершении процесса преобразования активной массы отрицательного электрода. Зарядный ток, начиная с этого момента, расходуется только на побочную реакцию разложения воды, следовательно, активная масса электродов полностью заряжена. Полученные значения разрядной

Результаты формирования аккумуляторов № 1–6 после первого цикла

Таблица 1

№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
		I _{зар} , А	C _{зар} /C _{ном}	I _{разр} , А	C _{разр} , А·ч	C _{ср} , А·ч	C _{ср} /C _{ном}	ΔC/C _{ном}
1	1	10.0	3.0	10.0	13.8	14.7	0.67	0.67
	2				15.6			
	3				14.7			
2	4	10.0	4.5	10.0	17.4	18.3	0.83	0.83
	5				18.3			
	6				19.2			

ёмкости показали качество заряда аккумуляторов. В табл. 1 представлены результаты первого цикла формирования.

Сравнивая результаты первого цикла формирования аккумуляторных ячеек, полученные в работе [2], и результаты первого цикла формирования аккумуляторов, можно отметить тот факт, что после первого цикла формирования разрядная ёмкость ячеек выше номинальной ёмкости, а разрядная ёмкость реальных аккумуляторов оказалась несколько ниже ($0.67C_{\text{ном}}$ для аккумуляторов первой и $0.83C_{\text{ном}}$ для аккумуляторов второй группы), что связано с отличительными особенностями конструкции ячеек и аккумуляторов, описанными ранее.

Превышение разрядной ёмкости на 19% у аккумуляторов, заряд которых продолжался до стабилизации напряжения, подтверждает правильность подхода к выбору критерия окончания заряда при разработке режимов формирования ёмкости никель-кадмиевых аккумуляторов. В связи с этим тот же подход был использован при выборе критерия окончания заряда второго и последующих циклов формирования ёмкости для обеих групп аккумуляторов, заряд которых продолжался до стабилизации зарядного напряжения. В свою очередь, тенденция к стабилизации напряжения начинает прослеживаться к моменту выхода на электролиз воды и совпадает по времени с увеличением интенсивности газовой выделению, что хорошо просматривается на рис. 2. На нём представлены зарядные и разрядные кривые, построенные по данным второго цикла формирования, а также кривые газовой выделению и температуры при заряде, когда одному и тому же значению зарядной ёмкости соответствуют начало второй полки на зарядных кривых и увеличение угла наклона кривых газовой выделению. Для фиксирования условия стабилизации напряжения необходимо сообщение некоторого количества избыточной зарядной ёмкости, численное значение которой определено в изобретении, защищенном патентом РФ [4]. Одним из его отличительных признаков является прекращение заряда при сообщении 120–150% номинальной ёмкости. В соответствии с заданным интервалом заряды второго и последующих циклов формирования ёмкости при проведении представленных исследований прекращали при сообщении $1.4C_{\text{ном}}$.

На рис. 2 представлены зарядные и разрядные кривые, построенные по данным второго цик-

ла формирования, а также кривые газовой выделению и температуры при заряде.

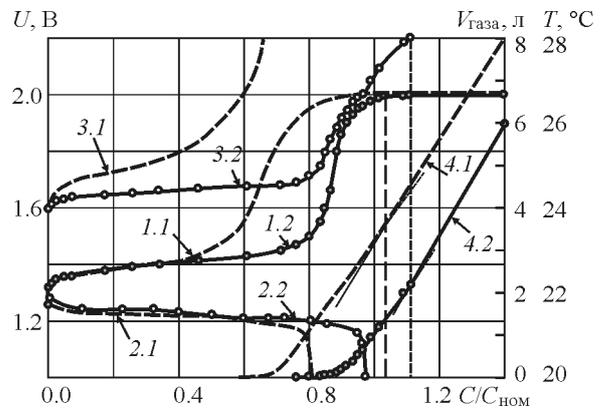


Рис. 2. Усредненные по первой и второй группам аккумуляторов кривые второго цикла формирования: 1 – зарядные кривые; 2 – разрядные кривые; 3 – кривые изменения температуры; 4 – кривые газовой выделению.

Анализируя графики, можно отметить, что заряд аккумуляторов первой группы сопровождался более интенсивным нагревом по сравнению с аккумуляторами второй группы. Заряд активной массы, преобразованной за предыдущий цикл, продолжавшийся до начала резкого подъёма зарядной кривой последующего цикла, что соответствует значению зарядной ёмкости, численно равной разрядной ёмкости предыдущего цикла ($14.7 \text{ А} \cdot \text{ч}$ для аккумуляторов первой группы и $18.3 \text{ А} \cdot \text{ч}$ для второй или $0.67C_{\text{ном}}$ и $0.84C_{\text{ном}}$), проходил для аккумуляторов первой группы при более высокой температуре, тем самым воздушное охлаждение было задействовано ещё в самом начале выхода на газ, после сообщения $14.3 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ($0.65C_{\text{ном}}$) до выхода этих аккумуляторов на электролиз воды. Температура корпусов аккумуляторов второй группы достигла этого значения к моменту выхода на электролиз воды, когда интенсивность газовой выделению была максимальной. Зарядная ёмкость, соответствовавшая этому моменту составляла $24.2 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ($1.1C_{\text{ном}}$). Этот факт, кроме экономии электроэнергии, затрачиваемой на воздушное охлаждение, имеет ещё один положительный эффект, который связан с тем, что увеличение внутренней температуры отрицательно сказывается на качестве формирования активной массы электродов никель-кадмиевых аккумуляторов, повышая вероятность возникновения коррозии никелевой основы МК ОНЭ. В слу-

чае заряда аккумуляторов второй группы процесс преобразования их активной массы проходил при более низкой температуре по сравнению с температурой аккумуляторов первой группы. Полученные результаты второго цикла формирования отражены в табл. 2.

Сравнение полученных значений прироста разрядной ёмкости аккумуляторов первой и второй группы, среднее значение разрядной ёмкости аккумуляторов второй группы, которое уже после второго цикла составило $0.98C_{ном}$, подтверждают

преимущество проведения длительного, до стабилизации напряжения, заряда первого цикла.

На рис. 3, 4 представлены кривые, полученные в процессе проведения последующих, третьего и четвертого, циклов формирования исследуемых аккумуляторов.

Рассматривая полученные кривые, можно отметить, что заряды аккумуляторов первой группы и далее проходили при более высокой температуре, в то время как это превышение уменьшалось от цикла к циклу, по мере того как завершалось формирование активной массы аккумуляторов.

Таблица 2

Результаты формирования аккумуляторов № 1–6 после второго цикла

№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
		$I_{зар}$, А	$C_{зар}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
1	1	10.0	1.4	10.0	16.9	17.8	0.81	0.006
	2				18.7			
	3				17.8			
2	4	10.0	1.4	10.0	20.5	21.6	0.98	0.007
	5				21.6			
	6				22.7			

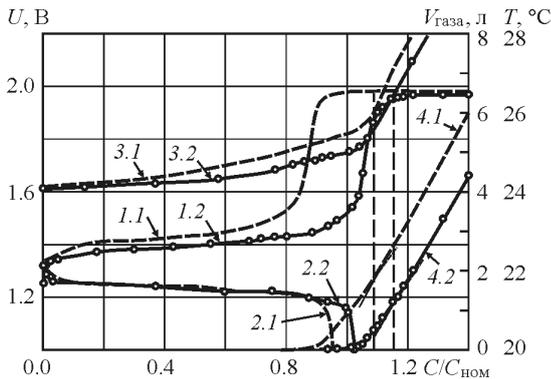


Рис. 3. Усредненные по первой и второй группам аккумуляторов кривые третьего цикла формирования: 1 – зарядные кривые; 2 – разрядные кривые; 3 – кривые изменения температуры; 4 – кривые газовыделения

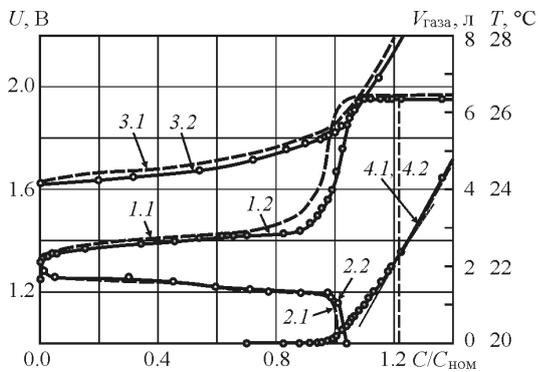


Рис. 4. Усредненные по первой и второй группам аккумуляторов кривые четвертого цикла формирования: 1 – зарядные кривые; 2 – разрядные кривые; 3 – кривые изменения температуры; 4 – кривые газовыделения

Анализируя зарядные кривые четырех проведенных циклов, можно говорить о совпадении условий начала стабилизации напряжения и увеличения угла наклона кривой газовыделения. Также следует отметить тот факт, что при формировании аккумуляторов асимметричным током с соблюдением условия проведения заряда первого цикла до стабилизации напряжения заряд уже сформированной активной массы проходит при температуре корпуса аккумулятора ниже 28°C без принудительного охлаждения. Преимущество такого режима формирования можно проследить по результатам третьего и четвертого циклов, представленным в табл. 3, 4.

Для выхода на номинальное значение разрядной ёмкости аккумуляторам второй группы понадобилось три цикла, в то время как аккумуляторам первой группы – четыре. Вместе с тем сокращение числа циклов даже на один цикл сокращает общее время формирования на 20%, по сравнению со временем формирования аккумуляторов заряд первого цикла которых был прерван, когда напряжение продолжало расти.

После выхода аккумуляторов обеих групп на номинальную ёмкость были проведены ещё по два цикла формирования: пятый, шестой для аккумуляторов первой группы и четвертый, пятый для второй. Полученные результаты приведены в табл. 5.

Таблица 3

Результаты формирования аккумуляторов № 1–6 после третьего цикла

№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
		$I_{зар}$, А	$C_{зар}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
1	1	10.0	1.4	10.0	19.9	20.9	0.95	0.006
	2				21.9			
	3				20.9			
2	4	10.0	1.4	10.0	21.3	22.4	1.02	0.002
	5				22.4			
	6				23.5			

Таблица 4

Результаты формирования аккумуляторов № 1–6 после четвертого цикла

№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
		$I_{зар}$, А	$C_{зар}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
1	1	10.0	1.4	10.0	21.0	22.1	1.01	0.003
	2				23.2			
	3				22.1			
2	4	10.0	1.4	10.0	21.8	22.9	1.04	0.001
	5				22.9			
	6				24.0			

Представленные данные показали, что после набора $C_{ном}$ дальнейший прирост ёмкости для двух групп аккумуляторов был сопоставимым, с небольшим опережением скорости прироста ёмкости у аккумуляторов второй группы.

После снижения прироста ёмкости до 0.002–0.001 А·ч для аккумуляторов двух групп были проведены контрольные циклы. Отличительной особенностью контрольных циклов является разряд током, численное значение которого $3C_{ном}$, до напряжения 1В, и последующий доразряд током, величина которого $0.6C_{ном}$, также до напряжения 1В. Результаты контрольных циклов приведены в табл. 6.

При разряде аккумуляторов одного типоразмера отданная ёмкость зависит от плотности разрядного тока, и чем выше ток разряда, тем меньшую ёмкость можно снять. Этим вызвано снижение разрядной ёмкости контрольных циклов, которые показали хорошее качество проведенного формирования, так как при разряде током повышенной плотности отданная ёмкость аккумуляторов двух групп была не ниже номинальной. Вместе с тем необходимо отметить, что ёмкость аккумуляторов второй группы несколько выше ёмкости аккумуляторов первой группы.

После контрольных циклов были проведены два цикла формирования при плотности зарядных и разрядных токов, аналогичных плотностям ранее проведенных циклов с той разницей, что аккумуляторы первой группы заряжались постоянным током, а аккумуляторы второй группы асимме-

тричным. Результаты формирования, полученные в ходе проведения этих циклов, представлены в табл. 7.

Анализ полученных данных выявил эффект значительного прироста разрядной ёмкости цикла, следующего за циклом с разрядом током повышенной плотности. Это хорошо видно на графиках, приведённых на рис. 5, где относительные значения разрядной ёмкости исследуемых аккумуляторов сгруппированы по характеру проведенных циклов. Для наглядности пятый цикл аккумуляторов второй группы совмещен с седьмым.

На рис. 5 представлены относительные ($C/C_{ном}$) данные по формированию аккумуляторов первой и второй групп, усредненные для каждой группы. Для аккумуляторов первой группы контрольными циклами являлись 7-й и 10-й, для второй группы – 6-й и 9-й. Видно, что процесс формирования аккумуляторов второй группы проходит быстрее. Кроме этого, можно отметить тот факт, что для завершения процесса формирования ёмкости достаточно проведения одного цикла, следующего за контрольным, если заряд проводится асимметричным током, о чем свидетельствует отрицательное значение прироста ёмкости восьмого цикла для аккумуляторов второй группы, процесс формирования которых завершился на седьмом цикле. Формирование аккумуляторов первой группы, которые после проведения контрольного цикла заряжались постоянным током, продолжилось и на девятом цикле.

Таблица 5

Результаты формирования аккумуляторов № 1–3 после пятого и шестого циклов; № 4–6 после четвертого и пятого циклов

№ цикла	№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
			$I_{зар}$, А	$C_{зар}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
5	1	1	10.0	1.4	10.0	21.6	22.7	1.03	0.001
		2				23.8			
		3				22.7			
6		1	10.0	1.4	10.0	21.0	23.3	1.06	0.001
		2				24.5			
		3				22.1			
4	2	4	10.0	1.4	10.0	21.8	22.9	1.04	0.001
		5				22.9			
		6				24.0			
5		4	10.0	1.4	10.0	22.5	23.7	1.08	0.002
		5				23.7			
		6				22.5			

Таблица 6

Результаты контрольных циклов аккумуляторов № 1–6

№ цикла	№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
			$I_{зар}$, А	$C_{за}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А $I_{доразр}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
7	1	1	10.0	1.4	66.0 14.0	20.9 1.0	22.0 1.1 Σ 23.1	1.00 0.05	-0.009
		2				23.1 1.1			
		3				22.0 1.1			
6	2	4	10.0	1.4	66.0 14.0	21.0 1.2	22.2 1.3 Σ 23.5	1.01 0.06	-0.009
		5				22.2 1.4			
		6				23.1 1.3			

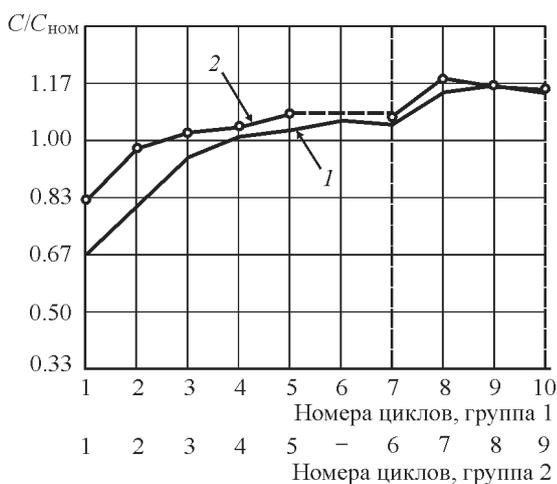


Рис. 5. Формирование аккумуляторов с МК ОНЭ номинальной ёмкостью 22 А·ч: 1 – группа № 1 (зарядная ёмкость первого цикла $3C_{ном}$); 2 – группа № 2 (зарядная ёмкость первого цикла $4.5C_{ном}$)

Эффект значительного прироста разрядной ёмкости после проведения контрольного цикла наблюдался и при проведении исследований, результаты которых опубликованы в [5]. Авторами отмечено положительное влияние разряда током повышенной плотности на формирование структуры активной массы электродов аккумуляторов с МК ОНЭ номинальной ёмкостью 22 А·ч. Контрольный цикл в этих исследованиях также проводился после выхода разрядной ёмкости аккумуляторов на ее номинальное значение. Заряд циклов, следующих за контрольным циклом, проводился постоянным током. Следует отметить, что наблюдаемый эффект влияния разрядного тока повышенной плотности на процесс формирования ёмкости требует дальнейших исследований и в настоящей работе не рассматривается.

По завершении процесса формирования, которое характеризуется сохранением разрядной ём-

кости на уровне $1.17 C/C_{ном}$ в течение двух циклов, для каждой группы аккумуляторов были проведены вторые контрольные циклы, результаты которых отражены в табл. 8 и заряды на отправку.

Полученные данные показывают незначительное расхождение значений суммарных разрядных ёмкостей аккумуляторов двух групп, полученных во время проведения контрольных циклов. Преимуществом же длительного заряда до стабилизации напряжения является сокращение числа заряд-разрядных циклов и, как следствие, общего времени формирования.

По карте формирования завода-изготовителя первый контрольный цикл проводится только после десятого цикла. Заряд продолжается от двух часов на первом цикле до четырех часов на десятом. Так как заряд ведется постоянным током, аккумуляторы сильно разогреваются, что требует часовой остановки для их остывания. Также между зарядом и разрядом предусмотрен перерыв в те-

чение суток на отгазовку. Учитывая эти условия и приняв максимальное время разряда равным двум часам, что соответствует номинальному значению разрядной ёмкости, можно определить примерное время, затраченное на десять циклов формирования постоянным током, которое составило около 260 часов. Между тем режим формирования ёмкости асимметричным током с длительным зарядом первого цикла существенно сокращает это время. В табл. 9, 10 представлен расчет общего времени формирования первой и второй групп аккумуляторов (до первых контрольных циклов).

По завершении формирования аккумуляторов двух групп они были переданы на предприятие-изготовитель для проверки эксплуатационных режимов на оборудовании изготовителя. По заключению специалистов предприятия исследуемые аккумуляторы имели удовлетворительные разрядные характеристики.

Таблица 7

Результаты формирования аккумуляторов № 1–3 после восьмого и девятого циклов; № 4–6 после седьмого и восьмого циклов

№ цикла	№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
			$I_{зар}$, А	$C_{зар}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
8	1	1	10.0	1.4	10.0	23.8	25.1	1.14	0.091
		2				26.6			
		3				25.1			
9		1	10.0	1.4	10.0	24.2	25.5	1.16	0.018
		2				26.8			
		3				25.5			
7	2	4	10.0	1.4	10.0	24.7	26.0	1.18	0.114
		5				26.0			
		6				27.3			
8		4	10.0	1.4	10.0	24.2	25.5	1.16	-0.08
		5				25.5			
		6				26.8			

Таблица 8

Результаты вторых контрольных циклов аккумуляторов № 1–6

№ цикла	№ группы	№ аккумулятора	Заряд		Разряд				
			$I_{зар}$, А	$C_{зар}/C_{ном}$	$I_{разр}$, А $I_{доразр.}$, А	$C_{разр}$, А·ч	$C_{ср}$, А·ч	$C_{ср}/C_{ном}$	$\Delta C/C_{ном}$
10	1	1	10.0	1.4	66.0 14.0	22.6 1.1	23.8 1.2 Σ 25.0	Σ 1.14	-0.02
		2				25.0 1.2			
		3				23.8 1.2			
9	2	4	10.0	1.4	66.0 14.0	22.8 1.2	24.0 1.3 Σ 25.3	Σ 1.15	-0.02
		5				24.0 1.3			
		6				25.2 1.4			

Таблица 9

Суммарное время шести циклов формирования, рассчитанное для аккумуляторов первой группы

№ цикла	Время заряда, ч	Время на отгазовку, ч	Время разряда, ч	Суммарное время цикла, ч
1	6.0	12.0	2.0	20.0
2	2.8	12.0	2.0	16.8
3	2.8	12.0	2.0	16.8
4	2.8	12.0	2.0	16.8
5	2.8	12.0	2.0	16.8
6	2.8	12.0	2.0	16.8
				Σ 104.0

Таблица 10

Суммарное время пяти циклов формирования, рассчитанное для аккумуляторов второй группы

№ цикла	Время заряда, ч	Время на отгазовку, ч	Время разряда, ч	Суммарное время цикла, ч
1	9.0	12.0	2.0	23.0
2	2.8	12.0	2.0	16.8
3	2.8	12.0	2.0	16.8
4	2.8	12.0	2.0	16.8
5	2.8	12.0	2.0	16.8
				Σ 90.2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили возможность использования стабилизации зарядного напряжения в качестве критерия окончания заряда при формировании аккумуляторов.

Доказано, что окончание заряда при формировании по выявленному критерию позволяет интенсифицировать процесс формирования и предоставляет возможность для его автоматизации.

Сокращение времени формирования асимметричным током по сравнению со временем, затраченным на формирование постоянным током по используемой на сегодняшний день технологии, составляет 65 %.

Проверка эксплуатационных режимов на аккумуляторах, формирование которых проводилось с использованием выбранного критерия, подтвердила их надлежащее качество.

Найденное техническое решение защищено патентом РФ на изобретение [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сметанкин Г. П., Матекин С. С., Бурдюгов А. С., Плохова Т. В. // Электрохим. энергетика. 2008. Т. 8, № 3. С. 157–163.
2. Сметанкин Г. П., Бурдюгов А. С., Плохова Т. В. // Электрохим. энергетика. 2011. Т. 11, № 4. С. 187–192.
3. Багоцкий В. С., Скундин А. М. // Химические источники тока. М. : Изд-во Моск. энерг. ин-та, 2003. 740 с.
4. Способ ускоренного формирования и восстановления ёмкости закрытых никель-кадмиевых аккумуляторных батарей при помощи заряда асимметричным током : пат. 2313864 Рос. Федерация. № 2006116099, заявл. 10.05.06; опубл. 27.12.07.
5. Сметанкин Г. П., Радкевич Ю. Б., Обьедков Ю. И., Матекин С. С., Бурдюгов А. С., Плохова Т. В. // Электрохим. энергетика. 2010. Т. 10, № 2. С. 83–86.
6. Способ ускоренного формирования и восстановления ёмкости закрытых никель-кадмиевых аккумуляторных батарей при помощи заряда асимметричным током : пат. 2410800 Рос. Федерация. № 2009112766, заявл. 06.04.2009; опубл. 27.01.2011.