

ЭЛЕКТРОХИМИЯ. ГЕНЕРАЦИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЕ
ЭНЕРГИИ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

УДК 544.6; 621.355

НОВЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАТРИЙ-
ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

© 2024 г. Т. Л. Кулова^а, *, И. М. Гаврилин^а, А. М. Скундин^а, Е. В. Ковтушенко^а,
Ю. О. Кудряшова^а

^аИнститут физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, 119071, Россия

e-mail: tkulova@mail.ru

Поступила в редакцию 02.08.2023

После доработки 02.08.2023

Принята к публикации 18.08.2023

Разработаны две новые электрохимические системы для натрий-ионных аккумуляторов с положительным электродом на основе феррофосфата натрия, допированного марганцем ($\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$), и отрицательным электродом на основе наноструктуры $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$, а также с положительным электродом на основе ванадофосфата натрия, допированного железом ($\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$), и отрицательным электродом на основе наноструктуры $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$. Результаты циклирования макетов аккумуляторов показали, что удельная энергия электрохимических систем $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ и $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ составляет около 165 и 167 Вт ч/кг соответственно.

Ключевые слова: натрий-ионный аккумулятор, ванадофосфат натрия, феррофосфат натрия, наноструктуры германий–кобальт–фосфор, удельная энергия.

DOI: 10.31857/S0044453724040164, **EDN:** QEJOGK

ВВЕДЕНИЕ

Натрий-ионные аккумуляторы относятся к так называемым пост-литий-ионным аккумуляторам. Прогнозируется, что удельная энергия натрий-ионных аккумуляторов будет ниже удельной энергии литий-ионных аккумуляторов из-за меньшего разрядного напряжения и меньшей удельной емкости катодных и анодных материалов. Однако с учетом меньшей стоимости натрийсодержащего сырья ожидается, что стоимость натрий-ионных аккумуляторов будет ниже стоимости литий-ионных аккумуляторов и они смогут заменить вредные для окружающей среды свинцово-кислотные или никель-кадмиевые аккумуляторы [1, 2]. В настоящее время не существует широкомасштабного промышленного производства натрий-ионных аккумуляторов, и нет общепризнанных электрохимических систем. В качестве материалов положительного электрода натрий-ионных аккумуляторов рассматриваются натрийсодержащие слоистые оксиды [3, 4], а также ванадофосфаты

[5, 6] и феррофосфаты натрия [7, 8]. В качестве материалов отрицательного электрода наиболее популярным в настоящее время рассматривается твердый углерод [9, 10]. Следует отметить, что многочисленные публикации по электродным материалам для натрий-ионных аккумуляторов не содержат информации об аккумуляторах в целом, то есть о совместимости материалов разноименных электродов (в отличие от литературы по активным материалам литий-ионных аккумуляторов, где такая информация приводится и анализируется).

Теоретическая удельная емкость натрийсодержащих слоистых оксидов составляет около 150 мАч/г, но на практике удастся достичь несколько меньших значений. Теоретическая удельная емкость ванадофосфата натрия составляет 117 мАч/г. Этот катодный материал характеризуется практической емкостью, близкой к теоретической и стабильностью при циклировании. Феррофосфат натрия имеет теоретическую удельную емкость около

170 мАч/г, практическая емкость может достигать 150 мАч/г. Твердый углерод на практике показывает значения около 350 мАч/г.

Удельную энергию любого химического источника тока можно рассчитать по формуле:

$$W_{\text{bat}} = Q_{\text{bat}} U_{\text{bat}}, \quad (1)$$

где W_{bat} — удельная энергия аккумулятора (Втч/кг), Q_{bat} — удельная емкость аккумулятора (Ач/кг), U_{bat} — напряжение аккумулятора (В). Следует подчеркнуть, что удельная энергия относится к аккумулятору в целом, а не к отдельным активным материалам, участвующим в токообразующем процессе.

Теоретическая удельная емкость аккумулятора зависит от теоретических удельных емкостей положительного (катода) и отрицательно (анода) электродов и может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{1}{Q_{\text{bat}}^t} = \frac{1}{Q_{\text{cat}}^t} + \frac{1}{Q_{\text{an}}^t}, \quad (2)$$

где Q_{bat}^t — теоретическая удельная емкость аккумулятора, Q_{cat}^t — теоретическая удельная емкость катода, Q_{an}^t — теоретическая удельная емкость анода. Уравнение (2) справедливо только при строго стехиометрическом соотношении количеств активных материалов на электродах.

Расчет теоретической удельной емкости натрий-ионного аккумулятора с углеродным анодом в зависимости от катодного материала дает значения от 89 до 116 мАч/г в расчете на суммарную массу анодного и катодного материалов. Замена анодного материала на более высокоемкий, чем твердый углерод, приведет к повышению теоретической удельной емкости аккумулятора. Например, для электрохимических систем с анодами на основе германия их теоретическая емкость будет превышать 150 мАч/г.

Величины удельной энергии будут зависеть от напряжения аккумулятора и требуют практического подтверждения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Изготовление положительных электродов (катодов)

Для изготовления катодов использовали порошок допированного железом ванадофосфата

натрия ($\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$), а также порошок феррофосфата натрия, допированного марганцем ($\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$, NFMP). Подробное описание синтеза $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ и $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ представлено в [11 и 12] соответственно. Катоды для макетов аккумуляторов были изготовлены следующим образом. Порошки катодных материалов ($\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$) предварительно сушили под вакуумом при температуре 120 °С в течение 8 ч. Далее порошки смешивали с сажей (Timcal), тщательно перетирали в агатовой ступке и добавляли в полученную смесь 3%-ный раствор поливинилиденфторида (Sigma-Aldrich) в N-метилпиролидоне (Sigma-Aldrich). Соотношение катодного материала, сажи и поливинилиденфторида составляло 80:10:5 по массе. При необходимости в полученную катодную массу дополнительно добавляли N-метилпиролидон для получения сметанообразной массы. Далее катодную массу гомогенизировали в течение 15 с с помощью ультразвукового гомогенизатора Sonics vibra cell (США).

Подложки для положительных электродов (катодов) натрий-ионных аккумуляторов изготавливали из алюминиевой фольги («Русал», Россия) толщиной 20 мкм. Перед нанесением катодной массы фольгу обезжиривали ацетоном. Равномерное нанесение слоя катодной массы на подложку обеспечивали с помощью автоматической намазочной машины с подогревом (MSK-AFA-II-Automatic Thick Film Coater, Китай). После нанесения катодной массы на одну сторону алюминиевой фольги, катодную пластину сушили 4 часа при температуре 80 °С, далее катодную массу наносили на противоположную сторону алюминиевой фольги и повторно сушили. Из готовых катодных пластин вырезали катоды размером 2×3 см². Катоды прессовали давлением 1 т/см². Масса катодного материала на подложке была рассчитана с учетом разрядной емкости катодного материала.

Изготовление отрицательных электродов (анодов)

Отрицательные электроды для макетов натрий-ионных аккумуляторов были изготовлены по технологии, описанной ранее в [13]. Размер анодов составлял 2×3 см². Количество активного вещества на аноде $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ составляло

около 0.4 мг/см^2 . Активное вещество $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ было синтезировано на одной стороне титановой фольги.

Сборка электрохимических ячеек и макета аккумулятора

Сборку трехэлектродных герметичных электрохимических ячеек и макета аккумулятора проводили в боксе с атмосферой аргона («Спектроскопические системы», Россия). Содержание воды и кислорода в боксе не превышало 1 ppm. Рабочими электродами служили $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{C}$, $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ или $\text{GeCoP}_{0.1}$. Вспомогательный электрод и электрод сравнения изготавливали из металлического натрия. Электроды разделяли сепаратором толщиной 18 мкм (НПО «Уфим», Россия).

Макет аккумулятора содержал один двусторонний катод и два односторонних анода. Между электродами помещали полипропиленовый сепаратор толщиной 18 мкм (НПО «Уфим», Россия). Алюминиевый и никелевый токовыводы к катоду и анодам, соответственно, приваривали с помощью ультразвуковой сварки. Электродную сборку помещали в корпус, изготовленный из ламинированной алюминиевой фольги толщиной 115 мкм (MTI Corporation) и сушили под вакуумом при температуре 90°C в течение 8 ч. Заполнение макета аккумулятора электролитом и окончательную запайку корпуса проводили в перчаточном боксе с атмосферой сухого аргона. Содержание воды и кислорода в боксе не превышало 1 ppm. Для запайки корпуса использовали вакуумирующий запайщик (Mini Jumbo, Henkelman). В качестве электролита использовали 1 М NaClO_4 в смеси пропиленкарбоната и этиленкарбоната (1:1). Содержание воды в электролите, определенное методом кулометрического титрования по Фишеру (917 Coulometer, Metrohm, Herisau, Switzerland), не превышало 15 ppm.

Тестирование электрохимических ячеек и макетов аккумуляторов

Для тестирования электрохимических ячеек и макетов аккумуляторов использовали многоканальный потенциостат РХ-8 («Элинс», Россия). Тестирование катодных материалов проводили при режимах циклирования 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 С. Режим циклирования 0.1 С

соответствовал токам 117 мА/г и 150 мА/г для $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$, $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ соответственно. Тестирование анодного материала проводили в режимах 0.05, 0.1, 0.2 и 1 С. Режим циклирования 0.1 С соответствовал току 50 мА/г для GeCoP .

При тестировании макетов натрий-ионных аккумуляторов первые два формирочных цикла проводили в следующем режиме: заряд при постоянном токе 0.1 С до напряжения 4.1 В, далее следовал заряд при постоянном напряжении до спада тока до 0.05 С, разряд при постоянном токе 0.1 С до напряжения 0.4 В. Последующие циклы проводили в таком же режиме при токах 2, 0.4, 1 и 2 С. Ток, равный 2 мА, соответствовал режиму 1 С.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения пределов циклирования макетов натрий-ионных аккумуляторов с различными катодами предварительно эти катодные материалы были протестированы в трехэлектродных ячейках. На рис. 1 представлены результаты циклирования $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$. Из рис. 1а хорошо видно, что при малых плотностях тока заряд и разряд $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ протекает при постоянном потенциале в диапазоне 3.3–3.4 В. Такая зависимость потенциала от емкости характерна для двухфазных систем. Повышение плотности тока приводит к увеличению поляризации, что выражается в увеличении зарядного потенциала и снижению разрядного потенциала. При повышении плотности тока форма зарядно-разрядных кривых $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ меняется, а именно — четкие горизонтальные зарядные и разрядные кривые становятся более пологими. На рис. 1б представлены зарядно-разрядные кривые $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$, которые качественно отличаются от зарядно-разрядных кривых $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$, в частности, заряд и разряд протекает при постоянно меняющемся потенциале, что характерно для фаз переменного состава.

На рис. 1в, г представлены зависимости изменения разрядной емкости $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ от режима циклирования. Видно, что $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ характеризуется очень стабильным циклированием и способностью работать при высоких плотностях тока до 25 С. Разрядная емкость $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$

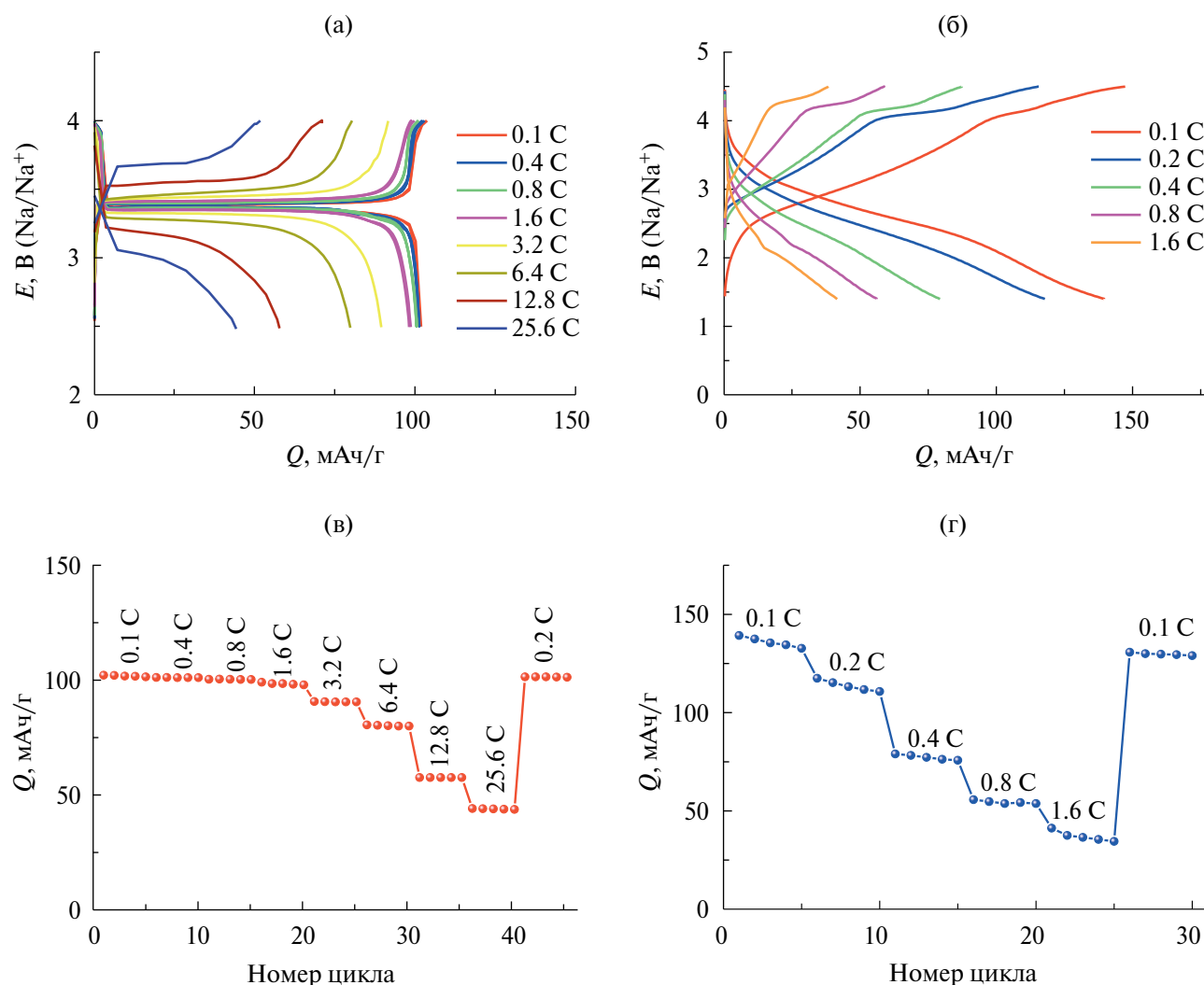


Рис. 1. Зарядно-разрядные кривые (а, б) и зависимость разрядной емкости от плотности тока (в, г) различных катодных материалов: $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ (а, в), $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ (б, г). Режимы циклирования указаны на рисунках.

при токе 0.1 С составляет 106 мАч/г, что соответствует 90% от теоретической удельной емкости. Зависимость удельной разрядной емкости $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ от плотности тока показывает, что этот катодный материал постепенно деградирует при циклировании. Разрядная емкость на первом цикле при токе 0.1 С составляет 140 мАч/г, что на 34% превышает разрядную емкость $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ при такой же плотности тока. Однако $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ показывает более сильную деградацию при циклировании и более сильную зависимость разрядной емкости от плотности тока. Так, увеличение плотности тока почти на порядок от 0.1 С до 0.8 С не приводит к существенному снижению разрядной емкости $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$, а для $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ разрядная емкость уменьшается на 60%.

Результаты циклирования отрицательных электродов в трехэлектродных электрохимических ячейках представлены на рис. 2.

На рис. 2 представлены результаты циклирования анодного материала — $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$. Как видно из рис. 2, при малых плотностях тока (0.05 С) разрядная емкость GeCoP составляет около 425 мАч/г. Увеличение плотности тока приводит к снижению разрядной емкости. Необратимая емкость на первом цикле, связанная с формированием твердоэлектролитной пленки (SEI) на $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$, составила около 12%.

Результаты циклирования отдельных электродов (катодов и анода) были использованы для расчета соотношения масс положительного и отрицательного электродов в аккумуляторах систем $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$.

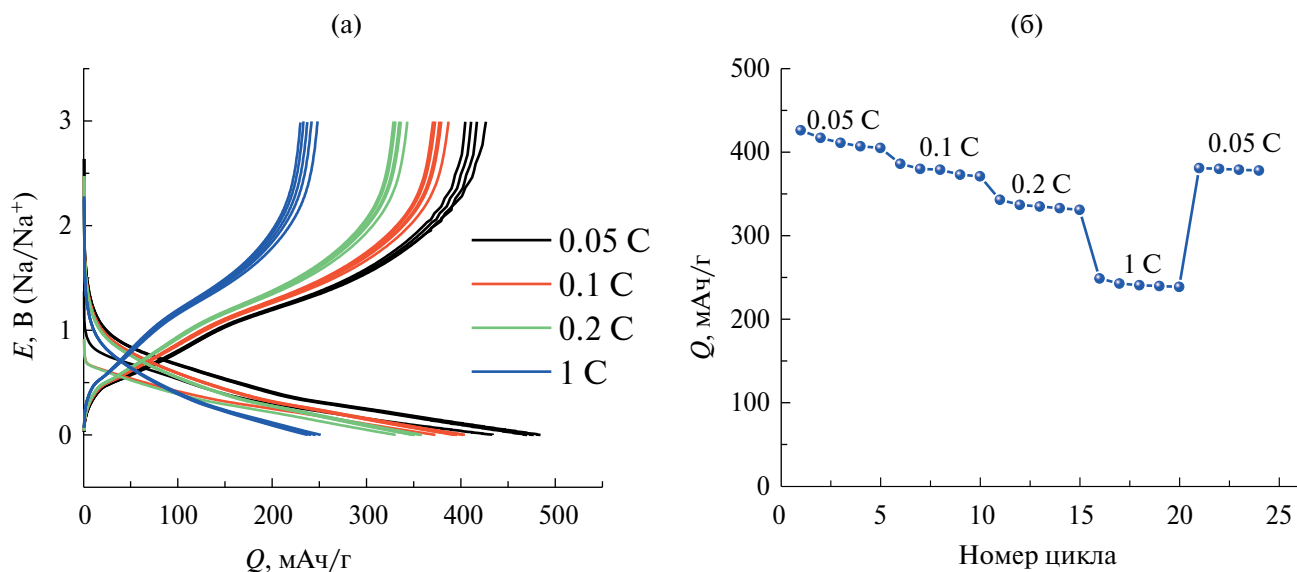


Рис. 2. Зарядно-разрядные кривые (а) и зависимость разрядной емкости от плотности тока (б) $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$. Режимы циклирования указаны на рисунках.

и $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$. Для аккумулятора номинальной емкостью 2 мАч при токе циклирования 0.2 мА (0.1 С) необходимо 5.48 мг GeCoP , так как удельная разрядная емкость этого анодного материала составляет около 365 мАч/г при токе 0.1 С (рис. 2). С учетом необратимой емкости $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ на первом цикле, которая составляет около 12% от обратимой емкости и удельной разрядной емкости $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ (106 мАч/г), масса $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ в аккумуляторе должна быть в 3.9 раза больше массы $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$, или около 21.4 мг. Как было показано в экспериментальной части, навеска $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ составляла 0.4 мг/см². Следовательно, общая площадь анода в аккумуляторе номинальной емкостью 2 мАч должна составлять около 13.7 см², что соответствует двум односторонним анодам с габаритными размерами 2.2×3.2 см². Навеска $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$ в этом случае должна составлять 1.6 мг/см². Таким образом, натрий-ионный аккумулятор электрохимической системы $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ номинальной емкостью 2 мАч содержал 1 двусторонний катод и 2 односторонних анода с габаритными размерами 2.2×3.2 см².

Аналогичные расчеты для натрий-ионного аккумулятора электрохимической системы $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ номинальной емкостью 2 мАч показали, что навеска $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ составила около 1.2 мг/см²

(общее количество $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ в аккумуляторе — 16.44 мг).

Результаты циклирования макетов аккумуляторов с различными катодами представлены на рис. 3. Среднее напряжение разряда макета аккумулятора системы $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ составило около 2.4 В. При низких токах разряда (0.1 С) разрядная емкость на первом цикле составила 1.88 мАч, что составляет около 94% от номинальной емкости. Среднее напряжение разряда макета аккумулятора системы $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ составило около 1.98 В. При низких токах разряда (0.1 С) разрядная емкость на первом цикле составила 1.85 мАч, что составляет около 92% от номинальной емкости. Удельная энергия аккумулятора $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ в расчете на массы активных веществ составила 165 Втч/кг. Удельная энергия аккумулятора в расчете на массы активных веществ $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ составила 167 Втч/кг. Таким образом, по величине удельной энергии при малых плотностях тока (0.1 С) две электрохимические системы оказались одинаковыми. В то же время при повышенных плотностях тока (2 С) электрохимическая система $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ показала более высокие характеристики.

Реальная удельная энергия аккумулятора всегда меньше теоретической удельной энергии электрохимической системы из-за влияния массы электролита и конструктивных деталей.

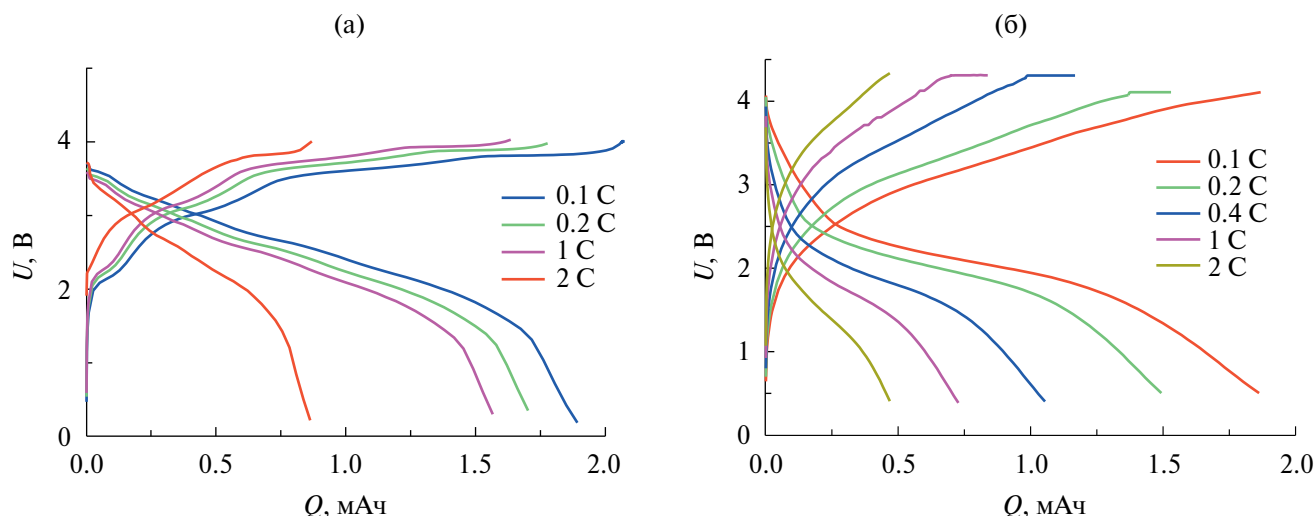


Рис. 3. Зарядно-разрядные кривые макетов аккумуляторов для двух электрохимических систем $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ (а), $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ (б). Режимы циклирования указаны на рисунках.

Например, авторы [14] показали, что соотношение удельной энергии электрохимической системы к удельной энергии прототипа коммерческого аккумулятора равно приблизительно 0.66. Таким образом, можно ожидать, что удельная энергия прототипа коммерческого натрий-ионного аккумулятора электрохимических систем $\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ (а), $\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ (б) будет составлять около 110 Втч/кг.

их удельная энергия (в расчете на массу активных электродных материалов) составляет 165–170 Втч/кг, что заметно превышает соответствующий показатель для электрохимических систем с отрицательным электродом на основе твердого углерода. Электрохимическая система с положительным электродом на основе ванадофосфата натрия отличается повышенной мощностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые оцениваются характеристики новых электрохимических систем для натрий-ионных аккумуляторов. В обеих системах в качестве активного материала отрицательного электрода используется разработанный недавно наноструктурированный композит $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$. Активным материалом в одной электрохимической системе служит ванадофосфат натрия, допированный железом ($\text{Na}_3\text{V}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}(\text{PO}_4)_3$), а в другой электрохимической системе – ферромангановосфат натрия ($\text{NaFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$). Сопоставление электрохимических характеристик индивидуальных электродов с характеристиками лабораторных макетов аккумуляторов показывает хорошую совместимость композита $\text{CoGe}_2\text{P}_{0.1}$ с обоими материалами положительного электрода при использовании перхлоратного электролита на основе смеси пропиленкарбоната с этиленкарбонатом. По результатам циклирования лабораторных макетов аккумуляторов обеих электрохимических систем установлено, что

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда. Проект № 21-13-00160.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скундин А.М., Кулова Т.Л., Ярославцев А.Б. // Электрохимия. 2018. Т. 54. № 2. С. 131. [Skundin A.M., Kulova T.L., Yaroslavtsev A.B. // Russ. J. Electrochem. 2018. V. 54. № 2. P. 113. DOI: 10.1134/S1023193518020076]
2. Кулова Т.Л., Скундин А.М. // Изв. АН. Сер. хим. 2017. № 8. 1329. [Kulova T.L., Skundin A.M. // Russ. Chem. Bull. Int. Ed. 2017. V. 66. № 8. P. 1329. <https://doi.org/10.1007/s11172-017-1896-3>]
3. Ding F., Zhao C., Zhou D. et al. // Energy Storage Mater. 2020. V. 30. P. 420. DOI: 10.1016/j.ensm.2020.05.013.

4. *Garg U., Rexhausen W., Smith N. et al.* // J. Power Sources. 2019. V. 431. P. 105.
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.05.025.
5. *Kuganathan N., ChronEOS A.* // Solid State Ionics. 2019. V. 336. P. 75.
DOI: 10.1016/j.ssi.2019.03.025.
6. *Huang H., Luo S., Liu C. et al.* // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 487. P. 1159.
DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.224.
7. *Oh S., Myung S., Hassoun J. et al.* // Electrochem. Commun. 2012. V. 22. P. 149.
DOI: 10.1016/j.elecom.2012.06.014.
8. *KapaeV R., Chekannikov A., Novikova S. et al.* // J. Solid State Electrochem. 2017. V. 21. Issue 8. P. 2373.
DOI 10.1007/s10008-017-3592-5
9. *Cheng D., Zhou X., Hu H. et al.* // Carbon. 2021. V. 182. P. 758.
DOI: 10.1016/j.carbon.2021.06.066.
10. *Jin Q., Wang K., Li H. et al.* // Chem. Eng. J. 2021. V. 417. A. 128104.
DOI: 10.1016/j.cej.2020.128104.
11. *Новикова С.А., Ларкович Р.В., Чеканников А.А. и др.* // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 8. С. 839.
DOI: 10.1134/S0002337X18080146
[Novikova S.A., Larkovich R.V., Chekannikov A.A. et al. // Inorg. Mater. 2018. V. 54. № 8. P. 794.
DOI: 10.1134/S0020168518080149].
12. *Kudryashova Yu.O., Gavrilin I.M., Kulova T.L. et al.* // MendeleeV Commun. 2023. V. 33. P. 318.
DOI: 10.1016/j.mencom.2023.04.006.
13. *Kulova T.L., Skundin A.M., Gavrilin I.M. et al.* // Batteries. 2022. V. 8. A. 98.
DOI: 10.3390/batteries8080098.
14. *Barker J., Coowar F., Fullenwarth J., Monconduit L.* // J. Power Sources. 2022. V. 541. A. 231702.
DOI:10.1016/j.jpowsour.2022.231702.