

УДК 544.65

DOI: 10.15372/ChUR2024606

EDN: ZJWFXG

Комбинированные электроды для энергоэффективных проточных ванадиевых батарей

А. Н. ВОРОПАЙ^{1,2}, Е. О. ДЕРЯБИНА¹, В. В. ЗУЕВА¹, Е. Д. ВЛАДИМИР¹, Е. С. ОСЕТРОВ²¹Государственный университет “Дубна”,
Дубна, Россия²ЗАО “МПОТК “ТЕХНОКОМПЛЕКТ”,
Дубна, Россия

E-mail: voropay@uni-dubna.ru

(Поступила 20.01.2024; после доработки 26.02.2024; принята к печати 25.03.2024)

Аннотация

Проточные ванадиевые батареи (ПВБ) получают все большее распространение в качестве дешевых и надежных аккумуляторов электричества. По своему принципу работы ПВБ очень похожи на топливные элементы: они содержат жидкий энергоноситель (перезаряжаемый электролит) и стек (топливный элемент, в котором протекает электрохимическая реакция). Для дальнейшего развития данных систем в рамках стратегии энергоэффективности необходимо повышение их коэффициента полезного действия (КПД), так как сейчас он составляет 60–65 %. В настоящей работе разработаны и исследованы новые электродные материалы – комбинированные электроды, которые позволяют снизить внутреннее сопротивление ячейки (единичного элемента конструкции стека). Для достижения этого результата предложено снизить сопротивление, связанное с переносом заряда на поверхности электрода, за счет формирования на поверхности электрода (войлока) активного слоя с высокой удельной поверхностью. Активный слой представлял собой электропроводящий технический углерод марки СН210 (сажа), для увеличения гидрофильности которого предварительно была проведена функционализация (поверхность была окислена в концентрированном перексиде водорода при повышенном давлении и температуре). Электрохимические измерения показали, что нанесение активного слоя повышает КПД ячейки на 8.6 % при плотности тока 50 мА/см², таким образом подтверждая работоспособность данного подхода.

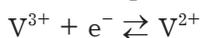
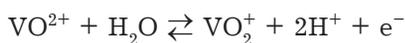
Ключевые слова: пористые электроды, проточные ванадиевые батареи, композиты

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире проточные ванадиевые батареи (ПВБ) находят широкое применение в качестве дешевых и надежных накопителей для альтернативных источников энергии [1] и также батарей в системах бесперебойного энергоснабжения [2, 3]. По своему принципу работы ПВБ очень похожи на топливные элементы: они содержат жидкий энергоноситель (перезаряжа-

емый электролит) и стек (топливный элемент, в котором протекает электрохимическая реакция). На сегодняшний день ПВБ являются наиболее распространенными среди всех видов проточных батарей, среди которых можно также выделить цинк-бромные батареи и получившие в последнее время активное развитие органические проточные батареи [4]. Однако ПВБ привлекают наибольший интерес, так как имеют одно ощутимое преимущество: ванадий является

энергоносителем и в катодном, и в анодном контуре. При этом на электродах протекают следующие реакции [5]:



Таким образом, если происходит кроссовер (переход) электролита из одного контура в другой, то ионы ванадия просто перезаряжаются в соответствии со свойствами контура. Это исключает эффект “отравления” электролита в одном контуре электролитом из другого контура. Поэтому, если система разбалансируется из-за концентрирования электролита преимущественно в одном контуре, ее всегда можно вернуть в исходное состояние простым перемешиванием электролита.

Проточные ванадиевые батареи имеют и другие важные достоинства. В частности, так как они не испытывают деградации при нестабильной мощности заряда, то имеют большой срок службы и намного легче утилизируются ввиду особенностей их конструкции. К тому же при создании систем со временем поддержания более 4 ч ПВБ становятся экономически целесообразными по сравнению с литий-ионными батареями. Однако коэффициент полезного действия (КПД) ПВБ составляет в настоящее время 60–65 %, и для дальнейшего развития данных систем требуется проводить работы по повышению их энергоэффективности. Так, например, ведутся исследования по разработке новых электродных материалов, где электроды создаются с использованием углеродных наноструктур, нанотрубок, графена, ультрадисперсного углерода [6] или с нанесением каталитических частиц оксидов металлов: марганца [7], никеля [8], висмута [9]. Другие подходы основаны на повышении эффективности управления батареями. В отличие от разработки новых материалов, где повышение параметров батареи является пассивным способом, методы регулировки являются активным способом повышения эффективности.

Проточная батарея состоит из нескольких основных элементов: проточная ячейка (стек), баки с электролитом, насосное оборудование [10]. Также в системе ПВБ могут присутствовать и вспомогательные элементы: система контроля заряда батареи, система балансировки стеков, система преобразования напряжения. Так, авторы [11] использовали алгоритм для управления производительностью насосов, чтобы повысить эффективность работы батареи. При этом

новом подходе управления эффективность системы и кулоновская эффективность повысилась на 3.34 и 3.84 % соответственно по сравнению с постоянной скоростью потока. Этот подход интересен, так как позволяет решить одну из больших проблем, а именно: преждевременное отключение батареи при достижении низкого уровня заряда [12], что приводит к неполному использованию энергии электролита. Ранее применялся подход так называемого пульсирующего потока [13], где насосы работали в прерывном режиме, и таким образом удавалось снизить нагрузку на них почти на 50 % при небольшом снижении разрядной емкости. Общая эффективность системы при этом повышалась до более чем 80 %. Но, к сожалению, данный подход может быть губительным для насосов из-за пульсирующей нагрузки, которая способна приводить к разрушению изоляции статора двигателя насоса. Затраты на обслуживание насосов могут достигать до 14 % от затрат на обслуживание всей системы [14], а при этом подходе они только увеличиваются. Все это показывает, что проблема повышения энергоэффективности является актуальной на сегодняшний день.

В настоящей работе для увеличения КПД проточной ванадиевой батареи предложен подход, основанный на снижении сопротивления за счет формирования на поверхности электрода активного слоя с высокой удельной поверхностью. В отличие от подхода, описанного в работе [15], активный слой наносится не на всю поверхность электрода, а только на область вблизи протонпроводящей мембраны, чтобы сократить путь для ионов водорода. В этом случае создаваемый активный слой способствует существенному снижению потерь и повышению энергоэффективности системы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Получение образцов

В качестве исходных электродных материалов применяли углеродный войлок GFD 4.6 (SGL Carbon, Германия) и электропроводный технический углерод (сажа) CH210 (Омск Карбон Групп, Россия).

Электропроводная сажа CH210 перед нанесением на углеродный войлок проходила процесс функционализации. Сначала сажу помещали в муфельную печь в атмосфере воздуха на 6 ч при температуре 400 °С, затем навеску

сажи массой 1 г загружали в тефлоновый автоклав объемом 200 мл вместе с 20 мл концентрированным (25 %) пероксидом водорода (H_2O_2 , квалификация “ос. ч.”) и выдерживали там при 160 °С в течение 4 ч. Далее образец промывали дистиллированной водой и высушивали при 60 °С в течение 48 ч. Обработанная сажа приобретает гидрофильные свойства (рис. 1, а). Видно, что обработанная сажа сразу намокает и тонет, в то время как исходная сажа тонет лишь частично, а основная ее масса остается на поверхности воды и не смачивается.

После функционализации сажу смешивали с раствором связующего и наносили на углеродный войлок. Приготовление связующего проводилось в сосуде с обратным холодильником, содержащем 10 мл ацетона (квалификация “ос. ч.”) и 0.354 г поливинилиденфторида (ПВДФ, Gelon Lib Co., Китай). Смесь перемешивали в течение 30 мин при температуре кипения ацетона с использованием магнитной мешалки до полного растворения ПВДФ.

Из полученных образцов функционализированной углеродной сажи СН210 отбирали навески массой 0.36 г, помещали в сосуд, содержащий 20 мл ацетона, 2.25 мл связующего ПВДФ и 0.04 г электропроводной сажи С45 (Gelon Lib Co., Китай) и перемешивали с использованием верхнеприводной мешалки в течение 15 мин. Далее суспензию загружали в пневматический краскораспылитель и наносили в три слоя на поверхность углеродного войлочного электрода GFD 4.6 (см. рис. 1, б). При этом температура электрода поддерживалась на уровне 130 °С. Таким образом получен образец электрода FBE-4/160 (flow battery electrode (FBE) – электрод с сажей, обработанной в автоклаве пероксидом водорода в течение 4 ч при 160 °С).

Для сравнения изготовлен образец FBE-0 (исходный войлок без нанесения).

Электрохимические испытания

Электрохимические испытания проводились в двухэлектродной ячейке (внешний вид в сборе представлен на рис. 1, в, а модель ячейки с нанесенными элементами – на рис. 1, г) в гальваностатическом режиме с помощью потенциостата Elins P20X8 (Элинс, Россия) при токах 156, 313, 469 и 625 мА, что соответствует плотности тока 25, 50, 75 и 100 мА/см². Электроды устанавливались активным слоем к протонпроводящей мембране. Диапазон напряжений – от 0.9 до 1.6 В. Толщина электродов составляла 4 мм.

В качестве электролита использовался раствор, состоящий из смеси ионов ванадия и серной кислоты. Согласно результатам работы [16], оптимальный состав электролита следующий: 0.8 моль/л VO^{2+} , 0.8 моль/л V^{3+} и 3 моль/л SO_4^{2-} . Состав подтверждался по интенсивностям соответствующих полос поглощения ионов ванадия в спектрах оптической плотности (рис. 2), как описано в работе [17]. Для ионов VO^{2+} характеристическая полоса поглощения наблюдается при 760 нм, а для ионов V^{3+} – при 400 нм. Измерения оптической плотности проводились с помощью спектрофотометра СФ-2000 (ОКБ СПЕКТР, Россия). Далее двухэлектродные ячейки наполняли электролитом, консервировали (герметизировали, чтобы исключить доступ кислорода) и выполняли измерения без прокачки электролита.

Емкость при заряде и разряде определяли по кривым, полученным в гальваностатическом режиме по уравнению

$$E = \int_0^t U(t)I(t)dt \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия по энергии рассчитывался по уравнению

$$\eta(E) = \frac{E_{\text{disch}}}{E_{\text{ch}}} \quad (2)$$

а кулоновский КПД и КПД по напряжению рассчитывались соответственно по уравнениям

$$\eta(Q) = \frac{Q_{\text{disch}}}{Q_{\text{ch}}} \quad (3)$$

$$\eta(U) = \frac{\eta(E)}{\eta(Q)} \quad (4)$$

Удельное поверхностное сопротивление ячейки (сборки электрод/Nafion 117/электрод) определяли, как в работе [5], по полным потерям энергии по уравнению

$$ASR = \frac{(E_{\text{ch}} - E_{\text{disch}})}{I^2(t_{\text{ch}} + t_{\text{disch}})} S \quad (5)$$

где E_{disch} и E_{ch} – энергия разряда и заряда соответственно, Дж; t_{disch} и t_{ch} – время разряда и заряда соответственно, с; I – сила тока, при которой происходит измерение, А; Q_{disch} и Q_{ch} – электрические заряды разряда и заряда соответственно, Кл; ASR – удельное поверхностное сопротивление, Ом · см²; S – площадь электрода, м²; U_{disch} – начальное напряжение разряда, В.

Спектры импеданса регистрировали при частоте от 1 МГц до 1 мГц с амплитудой по напряжению 20 мВ с помощью потенциостата BioLogic SP-200 (Франция) при напряжении на электродах 1.5 В (напряжение разомкнутой цепи).

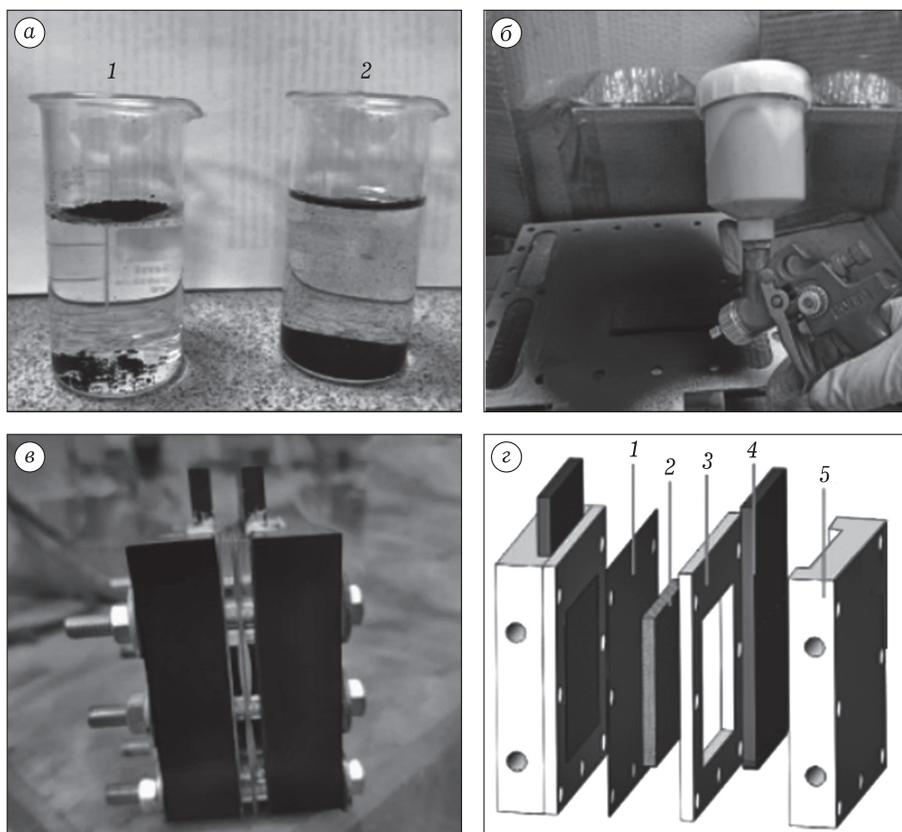


Рис. 1. Фотографии: а – технического углерода СН210 до (1) и после (2) функционализации; б – нанесения активного слоя на поверхность углеродного войлока; в – внешний вид ячейки для измерения в сборе; г – 3D-модели ячейки для измерения (1 – протонпроводящая мембрана Nafion 117; 2 – пористый электрод; 3 – пластина корпуса; 4 – графитовый электрод; 5 – внешний корпус ячейки).

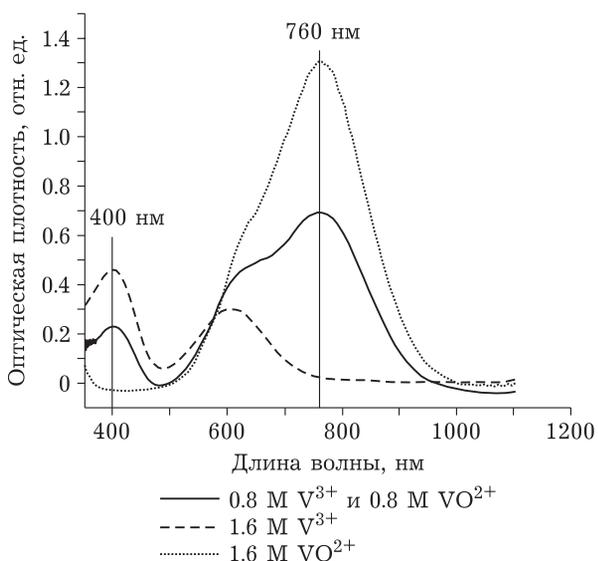


Рис. 2. Спектры оптической плотности исходного ванадиевого электролита и эталонных растворов ванадия (1.6 M VO^{2+} и 1.6 M V^{3+}).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены фотографии образцов по данным оптической микроскопии. Видно, что активный слой содержит трещины (см. рис. 3, а) и крупные неоднородности, но вместе с тем он достаточно плотный. Сам же углеродный войлок выглядит как нетканый сильно пористый материал (см. рис. 3, б).

На рис 4 представлены кривые заряда-разряда для образцов FBE-0 и FBE-4/160. При этом графики нормированы на время заряда (t_{ch}) каждого образца. Такая нормировка требуется, чтобы провести наглядное сравнение образцов без влияния объема электролита, так как в каждой ячейке количество электролита может немного различаться. Это происходит ввиду того, что электролит находится не только в объеме электрода, но и в подводящих каналах ячейки, а при консервации ячейки часть электролита из каналов может быть удалена.

Как видно из рис. 4, кривая напряжения заряда для образца FBE-0 проходит выше, чем

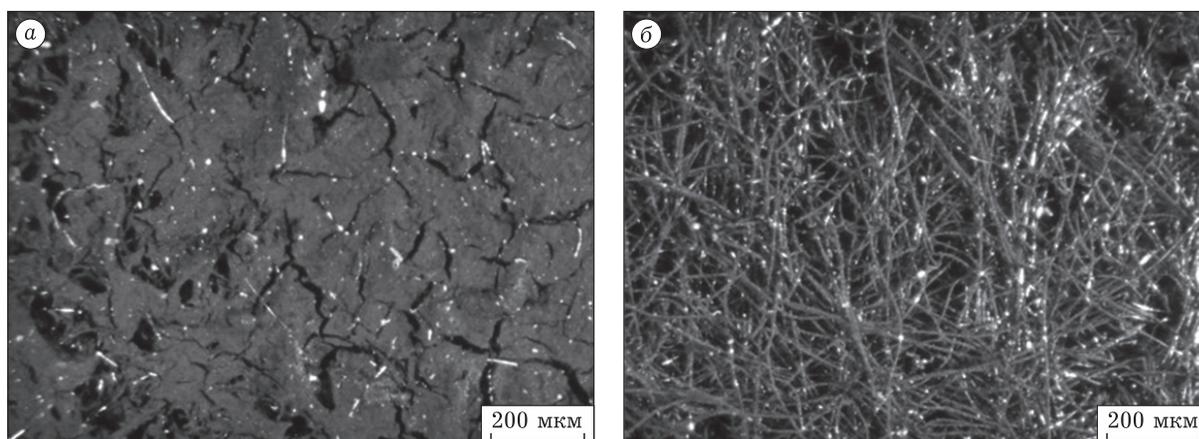


Рис. 3. Фотографии поверхности образцов FBE-4/160 (а) и FBE-0 (б).

для FBE-4/160, что свидетельствует о более высоком внутреннем сопротивлении в образце FBE-0. По падению напряжения при переключении с заряда на разряд можно оценить, что внутреннее сопротивление FBE-0 почти вдвое больше сопротивления FBE-4/160.

На рис. 5 представлены результаты расчета КПД для исследуемых образцов. Так, КПД по заряду (см. рис 5, а) для образцов ниже 100 %, что обусловлено саморазрядом ячеек, вызванным диффузией ионов ванадия через протонпроводящую мембрану [18, 19] и зависящим от времени разряда. Также потери емкости могут происходить по причине перенапряжения в ячейке из-за неравномерного потенциала на поверхности электрода [20]. Поскольку во всех образцах размер мембраны одинаковый, то большие потери энергии в образце FBE-0, возможно, связаны именно с неравномерным распределением потенциала по поверхности электрода, что выражается в снижении КПД по напряжению для образца без активного слоя (см. рис. 5, б). Все это приводит к тому, что образец FBE-4/160 имеет более высокий КПД по энергии (см. рис. 5, в), причем прирост КПД неравномерный: максимального значения он достигает при плотности тока 50 mA/cm^2 .

В табл. 1 представлены значения удельного поверхностного сопротивления (ASR) и глубины разряда (w) – коэффициента использования емкости (отношение емкости разряда к полной разрядной емкости) – в зависимости от величины рабочего тока. При этом за величину полной разрядной емкости принято значение разряда при силе тока 156 mA для данного образца. Видно, что для электродов с активным слоем коэффициент использования емкости w увеличивается

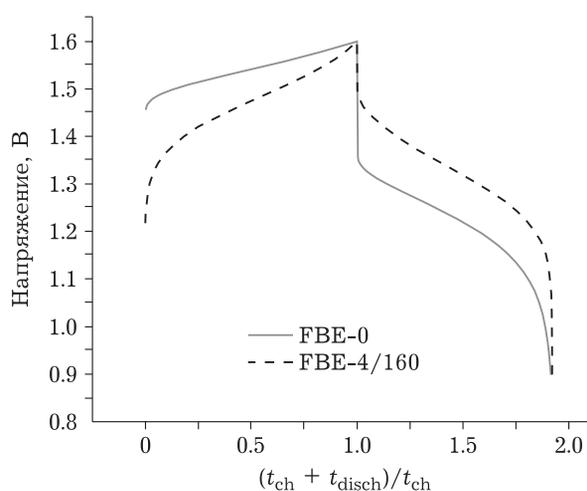


Рис. 4. Кривые заряда-разряда, нормированные на время заряда при плотности тока 50 mA/cm^2 .

ется, что крайне важно для проточных батарей, ведь этот параметр определяет энергоемкость электролита в конечной системе [21, 22].

Удельное поверхностное сопротивление снижается для ячейки с нанесенным активным слоем, что в конечном счете и является причиной сильного повышения энергоэффективности ячейки по сравнению с исходным углеродным войлоком.

На рис. 6 представлены диаграммы Найквиста для исследованных образцов. Расчет импеданса (Z) проводился по эквивалентной схеме (см. рис. 6, врезка). Выбор схемы выполняли эквивалентно работам [23–25].

Видно, что образец FBE-4/160 обладает меньшим сопротивлением, что также косвенно подтверждалось выше в данных ASR (см. табл. 1). Однако анализ спектров импеданса (параметры расчетов приведены в табл. 2) показывает, что происходит снижение сопротивления R_2 и пара-

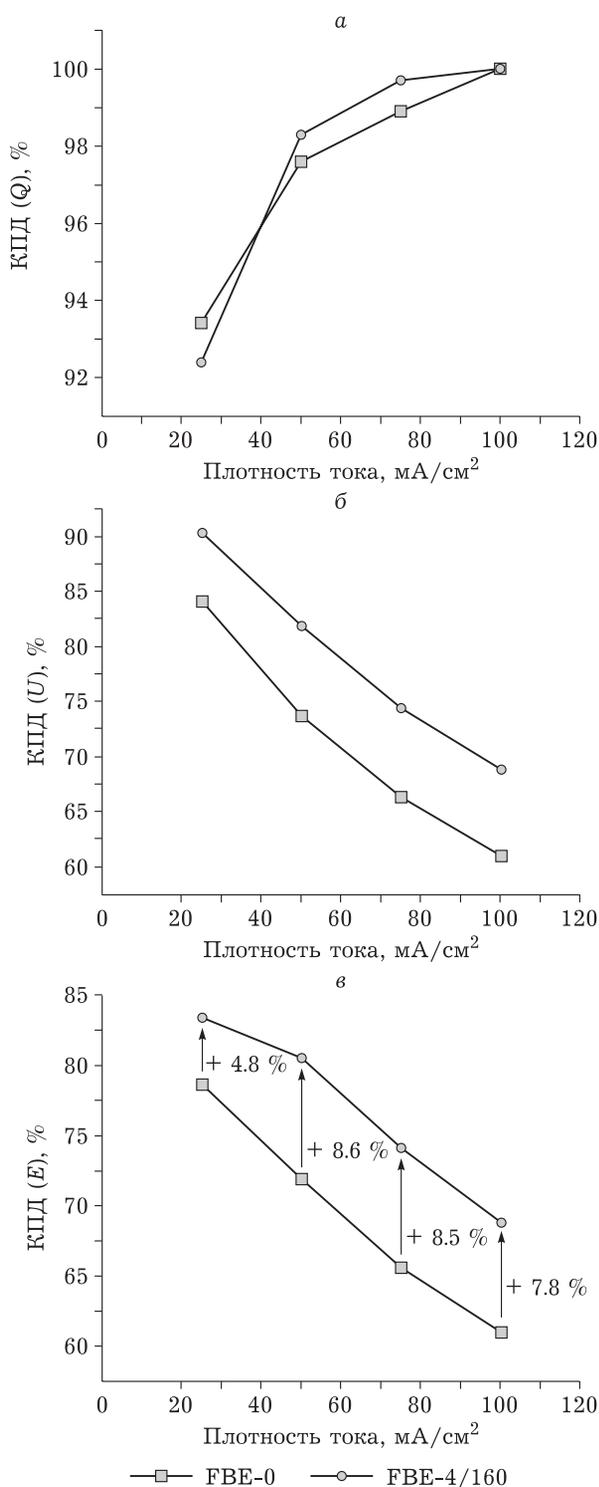


Рис. 5. Зависимости коэффициента полезного действия (КУД) исследуемых образцов от плотности тока: а – КУД по заряду (Q); б – КУД по напряжению (U); в – КУД по энергии (E).

метра W-T (соотношение квадрата толщины диффузионного слоя к коэффициенту диффузии), а также небольшое увеличение параметра CPE-R.

Увеличение параметра CPE-R можно объяснить резким увеличением площади поверхно-

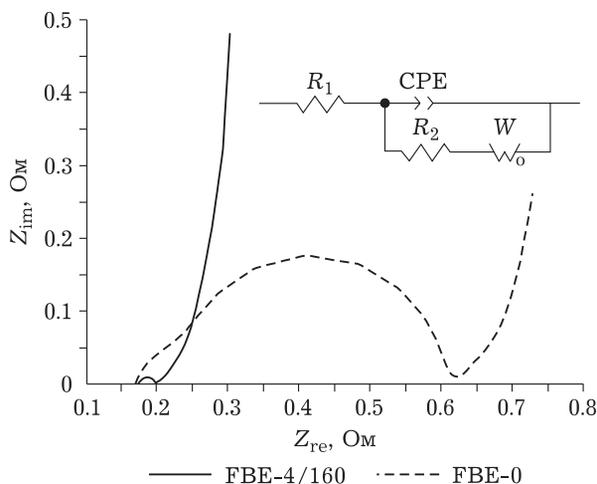


Рис. 6. Диаграммы Найквиста образцов FBE-4/160 и FBE-0. На врезке приведена эквивалентная схема для расчета импеданса (Z).

сти электрода, что привело к перекосу свойств электрода в сторону конденсатора. Более же интересны параметры R_2 и W-T. Скорее всего, уменьшение параметра W-T связано с противодействием двух факторов: снижением коэффициента диффузии ввиду уменьшения размера пор в активном слое; уменьшением размера диффузионного пути за счет более развитой поверхности и меньшего размера пор в активном слое. Однако фактор, связанный с уменьшением толщины диффузионного слоя, проявляется сильнее, что и приводит к снижению величины параметра W-T для образца FBE-4/160. Подобный эффект наблюдался в работах [26–28], но там ионы электролита проникали в поры внутри волокон. Влияние активного слоя также сильно проявляется в снижении параметра R_2 . Скорее всего это снижение объясняется повышением удельной площади поверхности электрода, что уменьшает сопротивление переноса заряда на электродах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами продемонстрирована работоспособность концепции построения комбинированных электродов для проточных ванадиевых батарей, благодаря которой существенно повышаются КУД ячейки (с 60.8 до 80.5 %) и коэффициент использования емкости (с 4.7 до 20.2 %). Скорее всего, это происходит из-за снижения потерь, связанных с уменьшением сопротивления переноса заряда на поверхности электрода за счет увеличения площади поверх-

ТАБЛИЦА 1

Зависимость глубины разряда (w) и удельного поверхностного сопротивления (ASR) образцов от величины рабочего тока

Сила тока, мА	FBE-0		FBE-4/160	
	w , %	ASR, Ом·см ²	w , %	ASR, Ом·см ²
156	100	6.63	100	5.05
313	55.8	4.43	75.1	2.95
469	21.0	3.61	43.9	2.64
625	4.7	3.06	20.2	2.41

ности активного слоя. Данное предположение подтверждается результатами импедансной спектроскопии, где наблюдается снижение параметра R_2 с 0.427 до 0.018 Ом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alotto P., Guarnieri M., Moro F. Redox flow batteries for the storage of renewable energy: a review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2014. Vol. 29. P. 325–335.
- Воропай А. Н., Кузьмин И. Н., Лоскутов А. Б., Осетров Е. С. Источник питания для автономных систем электроснабжения на базе проточной аккумуляторной батареи // *Электричество*. 2022. № 9. С. 45–52.
- Белов Д. В., Воропай А. Н., Кузьмин И. Н., Лоскутов А. Б. Исследование влияния характеристик и конструкции накопителей электрической энергии на работу систем бесперебойного питания // *Электричество*. 2020. № 10. С. 4–11.
- Ramar A., Wang F.-M., Foeng R., Hsing R. Organic redox flow battery: are organic redox materials suited to aqueous solvents or organic solvents? // *J. Power Sources*. 2023. Vol. 558. Art. 232611.
- Комаров В. А., Воропай А. Н., Ильина М. Н., Горячева Т. В. Исследование наноструктурированных углеродных войлочных материалов в качестве электродов ванадиевых проточных аккумуляторных батарей // *Электрохимия*. 2021. Т. 57, № 8. С. 485–491.
- Nair U. R., Costa-Castelló R. A model predictive control-based energy management scheme for hybrid storage system in islanded microgrids // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 97809–97822.
- Zhang Z., Xi J., Zhou H., Qiu X. KOH etched graphite felt with improved wettability and activity for vanadium flow batteries // *Electrochim. Acta*. 2016. Vol. 218. P. 15–23.
- Kim K. J., Park M.-S., Kim J. H., Hwang U., Lee N. J., Jeong G., Kim Y. J. Novel catalytic effects of Mn_3O_4 for all vanadium redox flow batteries // *Chem. Commun.* 2012. Vol. 48, No. 44. P. 5455–5457.
- Park J. J., Park J. H., Park O. O., Yang J. H. Highly porous graphenated graphite felt electrodes with catalytic defects for high-performance vanadium redox flow batteries produced via NiO/Ni redox reactions // *Carbon*. 2016. Vol. 110. P. 17–26.

ТАБЛИЦА 2

Параметры расчета импеданса образцов

Параметр	FBE-0	FBE-4/160
R_1	0.186	0.175
CPE-P	0.85	0.98
R_2	0.427	0.018
W-R	0.26	0.25
W-T	166	80

Примечание. R_1 и R_2 – сопротивления на разных участках цепи (см. рис. 6, вставка); CPE-P – показатель степени в элементе CPE (при CPE-P = 1 элемент описывает конденсатор); W-R – частотно-независимая часть импеданса Варбурга; W-T – отношение квадрата толщины диффузионного слоя к коэффициенту диффузии.

- González Z., Sánchez A., Blanco C., Granda M., Menéndez R., Santamaría R. Enhanced performance of a Bi-modified graphite felt as the positive electrode of a vanadium redox flow battery // *Electrochem. Commun.* 2011. Vol. 13. P. 1379–1382.
- Encyclopedia of Energy Storage / L. F. Cabeza (Ed.). Vol. 2. *Electrochemical Storage*. Amsterdam: Elsevier, 2022. P. 407–422.
- Xiao W., Tan L. Control strategy optimization of electrolyte flow rate for all vanadium redox flow battery with consideration of pump // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 133. P. 1445–1454.
- Ma X., Zhang H., Sun C., Zou Y., Zhang T. An optimal strategy of electrolyte flow rate for vanadium redox flow battery // *J. Power Sources*. 2012. Vol. 203. P. 153–158.
- Ling C. Y., Cao H., Chng M. L., Han M., Birgersson E. Pulsating electrolyte flow in a full vanadium redox battery // *J. Power Sources*. 2015. Vol. 294. P. 305–311.
- Wei L., Zhao T. S., Zhao G., An L., Zeng L. A high-performance carbon nanoparticle-decorated graphite felt electrode for vanadium redox flow batteries // *Appl. Energy*. 2016. Vol. 176. P. 74–79.
- Rashitov I., Voropay A., Tsepilov G., Kuzmin I., Loskutov A., Kurkin A., Osetrov E., Lipuzhin I. Vanadium redox flow battery stack balancing to increase depth of discharge using forced flow attenuation // *Batteries*. 2023. Vol. 9, No. 9. Art. 464.
- Loktionov P., Pichugov R., Konev D., Petrov M., Pustovalova A., Antipov A. Operando UV/Vis spectra deconvolution for comprehensive electrolytes analysis of vanadium redox flow battery // *J. Electroanal. Chem.* 2022. Vol. 925. Art. 116912.
- Düerkop D., Widdecke H., Schilde C., Kunz U., Schmie-mann A. Polymer membranes for all-vanadium redox flow batteries: a review // *Membranes*. 2021. Vol. 11, No. 3. Art. 214.
- Sankaralingam R. K., Seshadri S., Sunarso J., Bhatt A. I., Kapoor A. Overview of the factors affecting the performance of vanadium redox flow batteries // *J. Energy Storage*. 2021. Vol. 41. Art. 102857.
- Zhu M., Wu Q., Chi X., Luo Y. Simulation of all-vanadium redox flow batteries based on COMSOL // 29th Chinese Control and Decision Conference (2017CCDC), 28–30 May 2017, Chongqing, China. Singapore: IEEE Industrial Electronics, 2017. P. 6977–6982.
- Sun C., Vezzù K., Pagot G., Nale A., Bang Y. H., Pace G., Negro E., Gambaro C., Meda L., Zawodzinski T. A., Di Noto V.

- Elucidation of the interplay between vanadium species and charge-discharge processes in VRFBs by Raman spectroscopy // *Electrochim. Acta*. 2019. Vol. 318. P. 913–921.
- 22 Ali E., Kim J., Park H. Numerical analysis of modified channel widths of serpentine and interdigitated channels for the discharge performance of vanadium redox flow batteries // *J. Energy Storage*. 2022. Vol. 53. Art. 105099.
- 23 Liu T., Li X., Zhang H., Chen J. Progress on the electrode materials towards vanadium flow batteries (VFBs) with improved power density // *J. Energy Chem*. 2018. Vol. 27, No. 5. P. 1292–1303.
- 24 Friedl J., Bauer C. M., Rinaldi A., Stimming U. Electron transfer kinetics of the $\text{VO}^{2+}/\text{VO}_2^+$ -reaction on multi-walled carbon nanotubes // *Carbon*. 2013. Vol. 63. P. 228–239.
- 25 Li Y., Bao J., Skyllas-Kazacos M., Akter M. P., Zhang X., Fletcher J. Studies on dynamic responses and impedance of the vanadium redox flow battery // *Appl. Energy*. 2019. Vol. 237. P. 91–102.
- 26 Wu L., Wang J., Shen Y., Liu L., Xi J. Electrochemical evaluation methods of vanadium flow battery electrodes // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. Vol. 19, No. 22. P. 14708–14717.
- 27 Wang R., Li Y., Liu H., He Y.-L., Hao M. Sandwich-like multi-scale hierarchical porous carbon with a highly hydroxylated surface for flow batteries // *J. Mater. Chem. A*. 2021. Vol. 9, No. 4. P. 2345–2356.
- 28 Jiang H. R., Sun J., Wei L., Wu M. C., Shyy W., Zhao T. S. A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery // *Energy Storage Mater.* 2020. Vol. 24. P. 529–540.