

УДК 541.136

НЕЛИНЕЙНАЯ СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ АККУМУЛЯТОРА, ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ПОСЛЕ ЗАРЯДА

Н. Е. Галушкин ✉, Н. Н. Язвинская, Д. Н. Галушкин, И. А. Галушкина*

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, лаборатория электрохимической и водородной энергетики, 346500, Россия, Ростовская область, Шахты, ул. Шевченко, 147

**Новошахтинский филиал Южного федерального университета, 346900, Россия, Ростовская область, Новошахтинск, ул. 40 лет Октября, 2*

✉ E-mail: galushkinne@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.14 г.

Показано, что нелинейная структурная модель аккумулятора может быть использована для описания процессов релаксации напряжения после заряда аккумуляторов. Полученное решение справедливо для щелочных, кислотных и литий-ионных аккумуляторов. Сравнение решения с экспериментальными данными для никель-кадмиевых аккумуляторов показало, что относительная ошибка не превышает 3%.

Ключевые слова: моделирование, щелочной аккумулятор, кислотный аккумулятор, литий-ионный аккумулятор.

NONLINEAR STRUCTURAL MODEL OF THE BATTERY, RESEARCH OF PROCESSES OF RELAXATION AFTER CHARGE

N. E. Galushkin ✉, N. N. Yazvinskaya, D. N. Galushkin, I. A. Galushkina*

Institute Sphere of Service and Business (branch) Don State Technical University, Laboratory of electrochemical and hydrogen energy,

346500, Russia Shevchenko St. 147, Shakhty, Rostov-on-Don region

Branch of Southern federal university in Novoshakhtinsk Rostov-on-Don region, 346900, Russia, 40 years of October, St. 2, Novoshakhtinsk, Rostov-on-Don region

✉ E-mail: galushkinne@mail.ru

Received 11.03.14

It is shown that the nonlinear structural model of the battery can be used for modeling the voltage relaxation processes after a charge of batteries. The solution obtained is valid for alkaline, acid and lithium-ion batteries. Comparison of solutions, with the experimental data for nickel-cadmium batteries, showed, that the relative error does not exceed 3%.

Key words: modeling, alkaline battery, acid battery, lithium-ion battery.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, несмотря на существование множества различных моделей аккумуляторов, существует всего лишь несколько методов построения этих моделей, а именно статистический, динамический, конструктивный и структурный метод.

Статистический метод построения моделей аккумуляторов используется на первом этапе их изучения, когда об исследуемом аккумуляторе очень мало сведений. В рамках данного метода модель аккумулятора строится в виде функции регрессии на базе имеющихся экспериментальных результатов [1–3]. Недостатком данного метода является то, что полученная модель (функциональная зависимость) применима только для тех режимов работы аккумулятора, из которых она получена. Тем не менее дан-

ные модели являются критериями для построения более сложных и более глобальных моделей.

В рамках *динамического метода* модель аккумулятора строится на базе известных законов транспорта компонент (ионов, электронов и нейтральных частиц) в различных средах [4–10]. В этом случае модель аккумулятора разбивается на подмодели. Каждая из подмоделей описывает процессы в различных средах: в жидкой фазе межэлектродного пространства, в жидкой фазе внутри пористого электрода, в металлической матрице пористого электрода и на границах фаз. Динамический метод является наиболее фундаментальным. Модели аккумуляторов, полученные с помощью этого метода, наиболее глобальные. Самой сложной частью данных моделей является подмодель, описывающая процессы в пористом электроде. Эти процессы описываются в рамках трёх общепринятых моделей: макроодно-

родной [4–9], единичной поры [4, 10] и электротехнической [11]. Наиболее перспективной из перечисленных моделей является макрооднородная модель. Системы уравнений макрооднородной модели значительно различаются для разбавленных [4–6] и концентрированных электролитов [7–9]. Практики, использующие динамические модели аккумуляторов в конкретных электротехнических системах, указывают, как правило, на два недостатка этих моделей [12]. Во-первых, динамические модели содержат очень много параметров, описывающих множество локальных процессов и явлений. На практике данные параметры для конкретного аккумулятора или невозможно, или очень трудно измерить. Например параметры функции замедленного разряда и другие локальные параметры внутри пористого электрода (которые используются в моделях) невозможно непосредственно измерить. Данные локальные параметры находятся из экспериментальных исследований на поверхности электродов. Однако совсем не очевидно, что найденные локальные параметры эквивалентны соответствующим параметрам внутри пористого электрода. Во-вторых, данные модели очень громоздки и сложны для практического использования. Поэтому для моделирования работы аккумуляторов в составе, например, гибридных транспортных средств чаще всего используются статистические модели [13,14].

Когда детали транспорта ионов не важны для решаемой задачи, то модель аккумулятора конструируется на базе различных как теоретических, так и экспериментальных предположений (*конструктивный метод*). Таких моделей очень много [15–17]. Они различаются сделанными предположениями или упрощениями, исключающими необходимость последовательного учёта транспорта компонент. Данный конструктивный метод позволяет значительно упростить сложные динамические модели. Недостатком этого метода является то, что полученная модель справедлива только в рамках поставленной задачи. Подобные модели не имеют глобального характера как динамические модели.

Естественно, что не существует чёткой границы между рассматриваемыми здесь конструктивными и динамическими моделями, а также между конструктивными и статистическими моделями. Эта граница во многом субъективна.

В *структурном моделировании* исследуемый объект или процесс рассматривается как система, состоящая из подсистем или элементов. Разделение исследуемого процесса на элементы происходит в результате изучения процесса и разделения его на различные стадии. Каждой стадии процесса ставит-

ся в соответствие один или несколько структурных элементов. Элементами структурной модели могут быть как стандартные электротехнические элементы (сопротивления, ёмкости и т. д.), так и специфические электрохимические элементы (импеданс Варбурга и т. д.). Соединяются элементы в структурной модели в соответствии с пониманием механизма исследуемого процесса [18–20]. Структурные модели имеют ряд преимуществ [20].

Во-первых, в структурных моделях всегда столько параметров, сколько реально их можно определить из экспериментальных исследований над аккумулятором в целом. Таким образом, не нужно проводить отдельно экспериментальные исследования локальных явлений как на поверхности так и внутри пористого электрода. Это очень удобно при практическом использовании данных моделей для конкретных аккумуляторов.

Во-вторых, структурные модели всегда очень наглядны и понятны как с электротехнической точки зрения, так и с электрохимической, что является их бесспорным преимуществом. На базе структурных моделей очень удобно строить компьютерные имитационные модели.

Недостатком данного метода является то, что структурное моделирование используется только в теории импеданса, т. е. в моделях с малыми переменными токами.

В наших предыдущих работах [21–26] была разработана нелинейная структурная модель аккумулятора. Данная модель сохраняет все преимущества традиционных структурных моделей. Однако она может быть использована для моделирования работы аккумуляторов при больших токах, которые обычно встречаются при различных режимах их эксплуатации. Модель может быть использована для моделирования работы аккумуляторов любых электрохимических систем. Нелинейные структурные модели имеют такую же широкую область применения, как и динамические модели, однако они более наглядны и удобны для практического применения, так как не содержат трудно определяемых параметров.

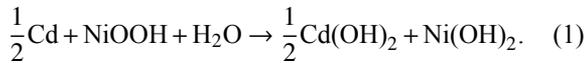
В работе [27] нелинейная структурная модель аккумулятора была успешно использована для моделирования процессов саморазряда. Было показано, что существующие эмпирические уравнения для процесса саморазряда (уравнение Нернст [28,29] и экспоненциальное уравнение [30,31]) являются частными случаями общего решения нелинейной структурной модели аккумулятора. Кроме того, было показано, что различные эмпирические уравнения саморазряда не противоречат друг другу, а, ско-

рее, дополняют друг друга, так как каждое из них справедливо в своём интервале времени саморазряда.

В данной работе на базе нелинейной структурной модели аккумулятора исследуется процесс релаксации напряжения после заряда в никель-кадмиевых аккумуляторах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Основная токообразующая реакция, протекающая в никель-кадмиевом АК имеет вид



Для анализа изменения напряжения на клеммах аккумулятора после его заряда воспользуемся нелинейной структурной моделью аккумулятора [21–23] без учёта распределения тока по глубине пористого электрода (рис. 1).

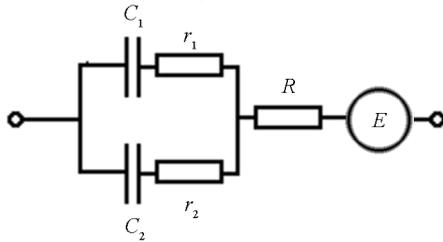


Рис. 1. Нелинейная структурная модель аккумулятора без учёта распределения тока по глубине пористого электрода: E – идеальный источник постоянной ЭДС, равный ЭДС заряженного аккумулятора, без учёта релаксации; R – нелинейное омическое сопротивление, описывающее процессы переноса в межэлектродном пространстве; C_2 – псевдоконденсатор, моделирующий работу основной токообразующей реакции (1); r_2 – нелинейное сопротивление активации основной токообразующей реакции (1); C_1 – псевдоконденсатор, моделирующий формирование поверхностных нестабильных фаз; r_1 – нелинейное сопротивление активации для формирования поверхностных нестабильных фаз

Как было показано в работах [22–26], именно образованием данных нестабильных фаз можно объяснить первоначальный релаксационный участок разрядной кривой любых щелочных аккумуляторов. Для оксидноникелевых электродов это высокоокисленные нестабильные гидроксиды никеля.

Там же было показано, что

$$C_1 \ll C_2. \quad (2)$$

Поэтому псевдоконденсатор C_1 практически не влияет на общую ёмкость аккумулятора. Кроме того, для всех щелочных и кислотных аккумуляторов [22–26]

$$r_1 \ll r_2, \quad (3)$$

так как нестабильная фаза – менее прочное соединение, чем основные гидроксиды никеля. Псевдоконденсатор C_2 описывается нелинейным выражением

$$C = C_0 \left(1 - \frac{q}{Q}\right), \quad (4)$$

где q – количество электричества, отданное при разряде аккумулятора, Q – максимальная ёмкость аккумулятора. Данное выражение позволяет учесть ресурс основной токообразующей реакции (1).

После заряда напряжение на клеммах аккумулятора постепенно понижается. Согласно структурной модели аккумулятора (см. рис. 1) это происходит за счёт разряда псевдоконденсатора C_1 на основной псевдоконденсатор C_2 .

Действительно, после заряда в силу неравенства (3) напряжение на псевдоконденсаторе C_1 будет значительно больше, чем на C_2 , и, следовательно, псевдоконденсатор C_1 будет разряжаться на псевдоконденсатор C_2 , что будет соответствовать уменьшению напряжения на клеммах аккумулятора. Таким образом, после заряда будет происходить доокисление основных гидроксидов никеля в оксидноникелевых электродах из высокоокисленной поверхностной нестабильной фазы на данных электродах и обратный процесс на кадмиевых электродах. В силу того, что данный процесс ограничен в основном поверхностным слоем электродов, нет смысла рассматривать распределение тока по глубине пористого электрода. Этим объясняется выбор упрощённой структурной модели, приведенной на рис. 1.

Таким образом, изменение напряжения после заряда аккумулятора будет связано с изменением напряжения на псевдоконденсаторе C_1 . В этом случае сопротивления активации r_1 и r_2 можно описать одной функцией замедленного разряда. Кроме того, процесс разряда псевдоконденсатора C_1 на псевдоконденсатор C_2 идёт только в одном направлении. Следовательно в функции замедленного разряда используется только ветвь, описывающая этот процесс, а ветвь, описывающая обратный процесс, может быть любой. Поэтому, не уменьшая общности решаемой задачи, возьмём симметричную функцию замедленного разряда в виде

$$i = a \operatorname{sh}(bu_r), \quad (5)$$

где u_r – падение напряжения на сопротивлении активации для разряда псевдоконденсатора C_1 , на псевдоконденсатор C_2 ; a , b – эмпирические константы.

Основное уравнение, описывающее изменение напряжения на кольцевом блоке модели (см. рис. 1),

по правилам Кирхгофа будет иметь вид

$$\frac{C_1 C_2}{ab} \frac{d^2 u}{dt^2} + (C_1 + C_2) \sqrt{1 + \left(\frac{C_1}{a} \frac{du}{dt}\right)^2} \frac{du}{dt} = 0. \quad (6)$$

Ресурс реакции (1) здесь не учитывается, так как общее изменение ёмкости аккумулятора (4) в данном релаксационном процессе крайне незначительное. Решение уравнения (6) при граничных условиях

$$\begin{aligned} u|_{t=0} &= u_0^1, \\ u|_{t=\infty} &= u_k^1, \end{aligned} \quad (7)$$

будет

$$\begin{aligned} u &= \frac{2C_2}{b(C_1+C_2)} \operatorname{arth} \left[\operatorname{th} \left(\frac{(u_0^1 - u_k^1)b(C_1+C_2)}{2C_2} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \exp\left(-\frac{ab(C_1+C_2)}{C_2 C_1} t\right) \right] + u_k^1. \end{aligned} \quad (8)$$

Конечное напряжение u_k^1 можно выразить через напряжения u_0^1 и u_0^2 на псевдоконденсаторах C_1 и C_2 сразу после окончания заряда по формуле

$$u_k^1 = \frac{u_0^1 C_1 + u_0^2 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (9)$$

которая следует из условия сохранения полного заряда до и после процесса выравнивания напряжения на псевдоконденсаторах C_1 и C_2 .

Для достаточно больших интервалов времени t из (8) получаем:

$$\begin{aligned} u &= \frac{2C_2}{b(C_1+C_2)} \operatorname{th} \left(\frac{(u_0^1 - u_k^1)b(C_1+C_2)}{2C_2} \right) \times \\ &\quad \times \exp\left(-\frac{ab(C_1+C_2)}{C_2 C_1} t\right) + u_k^1. \end{aligned} \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из формулы (10) следует, что через достаточно большой промежуток времени после окончания процесса заряда напряжение на клеммах аккумулятора изменяется экспоненциально, как в случае если бы сопротивление активации было бы постоянным и равным $r = 1/ab$.

При $t \rightarrow 0$, как видно из формулы (8), напряжение $u(t)$ растёт значительно быстрее экспоненты. Это как раз качественно соответствует экспериментальным данным, приведенным на рис. 2. Даже из поверхностного анализа экспериментальных данных по изменению напряжения на клеммах аккумулятора после заряда видно, что данное изменение нельзя описать только одной экспонентой. Если же аппроксимировать экспериментальную кривую несколькими экспонентами, то экспоненты, аппроксимирующие начальный участок, будут более круто убывать,

чем экспоненты, аппроксимирующие конечный участок. Как раз такую качественную зависимость имеет функция (8).

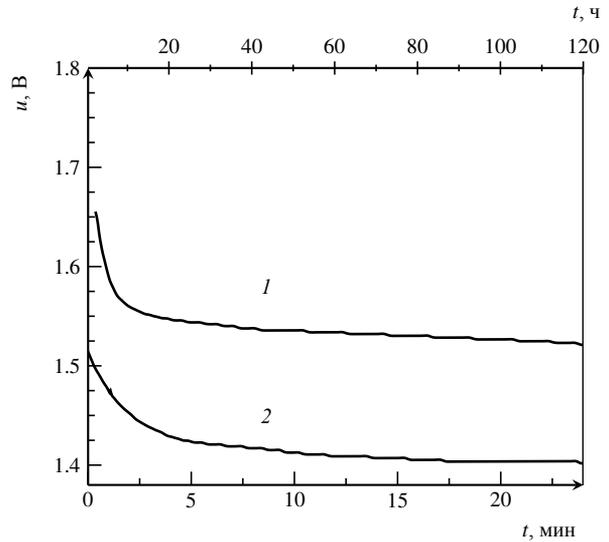


Рис. 2. Изменение ЭДС аккумулятора КН-10 после процесса заряда: 1 – изменение ЭДС в первые 24 мин, 2 – изменение ЭДС в последующие 120 ч

Сравним найденную теоретическую зависимость (8) с экспериментальными данными (см. рис. 2). Для этого функцию (8) перепишем в виде

$$u(t) = A \cdot \operatorname{arth}(B \cdot \exp(-D \cdot t)) + F, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{2C_2}{b(C_1 + C_2)}, \quad B = \operatorname{th} \left(\frac{(u_0^1 - u_k^1)b(C_1 + C_2)}{2C_2} \right), \\ D &= \frac{ab(C_1 + C_2)}{C_2 C_1}, \quad F = u_k^1. \end{aligned}$$

Константы A , B , D , F найдём из требования наилучшего совпадения функции (11) с экспериментальными данными. Для этого воспользуемся процедурой оптимизации Левенберга–Маркардта. Получим:

$$A = 0.049, B = 1, D = 0.042, F = 1.407. \quad (12)$$

При этом относительная ошибка аппроксимации составляет менее 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде всего отметим, что нелинейная структурная модель аккумулятора [21–26] построена на базе разрядных кривых, которые имеют качественно один и тот же вид для аккумуляторов различных электрохимических систем (щелочных, кислотных, литий-ионных и т. д.). Следовательно, как

данная модель, так и все решения, получаемые из неё, должны быть справедливы, по крайней мере, для аккумуляторов этих электрохимических систем. Наши предварительные исследования на кислотных и литий-ионных аккумуляторах подтверждают это предположение. Однако оно, несомненно, требует дополнительных как теоретических, так и экспериментальных подтверждений.

В заключение хотелось бы особо подчеркнуть, что нелинейная структурная модель аккумулятора [21–26] (которая в упрощённом виде приведена на рис. 1) принципиально отличается от эквивалентных схем замещения аккумуляторов, используемых в статистических и конструктивных моделях [32–35]. В эквивалентных схемах многие элементы не соответствуют каким-либо объектам или процессам в аккумуляторе. Задача эквивалентных схем – отображение найденных эмпирических зависимостей. Таким образом, эквивалентные схемы могут быть использованы (как и статистические модели, которые эквивалентны им) только в рамках решаемой задачи. Они не могут быть использованы

для расчёта других режимов работы аккумуляторов в области, где не применимы используемые для построения эквивалентных схем эмпирические соотношения. Эквивалентные схемы замещения аккумуляторов начали широко использоваться начиная с 60-х годов прошлого века. Тем не менее, они и сейчас часто используются при моделировании работы аккумуляторов в составе электрических и гибридных транспортных средств в пределах статистических и конструктивных моделей [13, 14, 32, 33].

В структурных моделях каждый элемент описывает объект, процесс или стадию электрохимического процесса в аккумуляторе. Таким образом, структурные модели используют элементы, поведение которых эквивалентно поведению реальных объектов исследуемых аккумуляторов независимо от режимов их работы. Следовательно, нелинейные структурные модели могут быть использованы для расчёта любых режимов работы аккумуляторов, т. е. они обладают такой же широкой областью применимости, как и динамические модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Achaibou N., Haddadi M., Malek A. // *J. Power Sources*. 2008. Vol. 185. P. 1484–1491.
2. Michelis De, Ferella F., Karakaya E., Beolchini F., Vegli'o F. // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 172. P. 975–983.
3. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 168. P. 66–78.
4. Чизмаджев Ю. А., Маркин В. С., Чирков Ю. Г. Макрокинетика процессов в пористых средах. М.: Наука, 1971.
5. Siniard K., Xiao M., Choe S.-Y. // *J. Power Sources*. 2010. Vol. 195. P. 7102–7114.
6. Venkatraman M., Van Zee J. W. // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 166. P.537–548.
7. Zavalis T. G., Behm M., Lindbergh G. // *J. Electrochem. Soc.* 2012. Vol. 159. P. A848–A859.
8. Boovaragavan V., Methakar R. N., Ramadesiga V., Subramanian V. R. // *J. Electrochem. Soc.* 2009. Vol. 156. P. A854–A862.
9. Albertus P., Coutts J., Srinivasan V., Newman J. // *J. Power Sources*. 2008. Vol. 183. P. 771–782.
10. Johansen J. F., Farrell T. W., Please C. P. // *J. Power Sources*. 2006. Vol. 156. P. 645–654.
11. Bergveld H. J., Kruijt W. S., Notten P. H.L. // *J. Power Sources*. 1999. Vol. 77. P. 143–158.
12. Hausmann A., Depcik C. // *J. Power Sources*. 2013. Vol. 235. P. 148–158.
13. Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche A.-I. // *Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, IEEE, Arlington, USA, 2007*. P. 284–289.
14. Tremblay O., Dessaint L.-A. // *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3. P.1–10.
15. Thele M., Schiffer J., Karden E., Surewaard E., Sauer D. U. // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 168. P. 31–39.
16. Vasebi A., Partovibakhsh M., Taghi Bathae S. M. // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 174. P. 30–40.
17. Roscher M. A., Sauer D. U. // *J. Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 331–336.
18. Andrea D., Meilera M., Steiner K., Walza H., Soczka-Gutha T., Sauer D. U. // *J. Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 5349–5356.
19. Rezaei Niya S. M., Hejabi M., Gopal F. // *J. Power Sources*. 2010. Vol. 195. P. 5789–5793.
20. Стойнов З. Б., Графов Б. М., Савова-Стойнова Б., Елкин В. В. Электрохимический импеданс. М.: Наука, 1991.
21. Галушкин Н. Е., Галушкина Н. Н. // *Электрохим. энергетика*. 2005. Т. 5, № 1. С. 43–49.
22. Галушкин Д. Н.б Галушкина Н. Н. // *Электрохим. энергетика*. 2006. Т. 6, № 1. С. 41–45.
23. Галушкин Н. Е. Моделирование работы ХИТ. Шахты: Изд-во ДГАС, 1998.
24. Галушкин Н. Е. Моделирование работы щелочных аккумуляторов в стационарных и нестационарных режимах: дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск, 1998. 465 с.
25. Галушкин Н. Е., Язвинская Н. Н., Кукоз Ф. И., Галушкин Д. Н. Структурное моделирование работы электрохимических аккумуляторов. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2009.
26. Галушкин Н. Е., Кукоз Ф. И., Язвинская Н. Н., Галушкин Д. Н. Моделирование работы аккумуляторов. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2009.
27. Galushkin N. E., Yazvinskaya N. N., Galushkin D. N. // *J. Electrochem. Soc.* 2012. Vol. 159. P. A1315–A1317.
28. Barnard R., Randell C. F., Tye F. L. // *J. Appl. Electrochem.* 1980. Vol. 10. P. 127–131.
29. Гинделис Я. Е. Саморазряд щелочных аккумуляторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1954. 25 с.
30. Skipworth S. E., Donne S. W. // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 174. P. 186–190.
31. Даниленко И. Ф., Хаскина С. М., Смирнова Т. Н., Леонова М. В., Золотов А. И. Сборник научных трудов по ХИТ. Л.: Энергоатомиздат, 1989. С. 87.
32. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems* / eds. R. Garcia-Valle, J. A. Pecos Lopes. New York: Springer Science+Business Media, 2013.

33. Xing Y., Ma E. W., Tsui K. L., Pecht M. // *Energies*. 2011. Vol. 4. P. 1840–1857.

34. Романов В. В., Хашев Ю. М. Химические источники тока. М.: Сов. радио, 1978.

35. Amiria M., Esfahanianb M., Hairy-Yazdic M. R., Esfahanianc V. // *J. Power Sources*. 2009. Vol. 190. P. 372–379.

REFERENCES

1. Achaibou N., Haddadi M., Malek A. *J. Power Sources*, 2008, vol. 185, pp.1484.

2. Michelis De, Ferella F., Karakaya E., Beolchini F., Vegli'о F. *J. Power Sources*, 2007, vol. 172, pp. 975.

3. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. *J. Power Sources*, 2007, vol. 168, pp. 66.

4. Chizmadzhev Ju. A., Markin V. S., Chirkov Ju. G. *Makrokinetika processov v poristyh sredah* [*The macrokinetics of processes in porous media*], Moscow, Nauka Publ., 1971 (in Russian).

5. Siniard K., Xiao M., Choe S-Y. *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, pp. 7102.

6. Venkatraman M., Van Zee J. W. *J. Power Sources*, 2007, vol. 166, pp.537.

7. Zavalis T.G., Behm M., Lindbergh G. *J. Electrochem. Soc.*, 2012, vol. 159, pp. A848.

8. Boovaragavan V., Methakar R. N., Ramadesiga V., Subramanian V. R. *J. Electrochem. Soc.*, 2009, vol. 156, pp. A854.

9. Albertus P., Coutis J., Srinivasan V., Newman J. *J. Power Sources*, 2008, vol. 183, pp. 771.

10. Johansen J. F., Farrell T. W., Please C. P. *J. Power Sources*, 2006, vol. 156, pp. 645.

11. Bergveld H.J., Kruijt W.S., Notten P. H.L. *J. Power Sources*, 1999, vol. 77, pp. 143.

12. Hausmann A., Depcik C. *J. Power Sources*, 2013, vol. 235, pp. 148.

13. Tremblay O., Dessaint L. A., Dekkiche A. I. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, VPPC, IEEE, Arlington, USA, 2007, pp. 284.

14. Tremblay O., Dessaint L.A. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 1–10.

15. Thele M., Schiffer J., Karden E., Surewaard E., Sauer D. U. *J. Power Sources*, 2007, vol. 168, pp. 31.

16. Vasebi A., Partovibakhsh M., Taghi Bathae S. M. *J. Power Sources*, 2007, vol. 174, pp. 30.

17. Roscher M.A., Sauer D. U. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, pp. 331.

18. Andrea D., Meilera M., Steiner K., Walza H., Soczka-Gutha T., Sauer D. U. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, p. 5349.

19. Rezaei Niya S. M., Hejabi M., Gopal F. *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, pp. 5789.

20. Stoinov Z. B., Grafov B. M., Savova-Stoinova B., Elkin V. V. *Elektrohimicheskij impedans* [*Electrochemical impedance*], Moscow, Nauka Publ., 1991 (in Russian).

21. Galushkin N. E., Galushkina N. N. *Elektrohimicheskaya Energetika* [*Electrochemical Energetics*], 2005, vol. 5, pp. 43–49 (in Russian).

22. Galushkin D. N., Galushkina N. N. *Elektrohimicheskaya Energetika* [*Electrochemical Energetics*], 2006, vol. 6, pp.41–45 (in Russian).

23. Galushkin N. E. *Modelirovanie raboty HIT* [*Modeling of work of a chemical power source*], Shahty, DGAC Publ., 1998 (in Russian).

24. Galushkin N. E. *Modelirovanie raboty shhelochnykh akkumuljatorov v stacionarnyh i nestacionarnyh rezhimah* [*Modeling of operation of alkaline accumulators in stationary and non-stationary modes*. Doct. dis.]. Novocherkassk, 1998, 465 p. (in Russian).

25. Galushkin N. E., Yazvinskaya H. E., Kukoz F. I., Galushkin D.N. *Strukturnoe modelirovanie raboty jelektrohimicheskikh akkumuljatorov* [*Structural modeling of operation of electrochemical accumulators*], Shahty, izd-vo JuRGUJeS Publ., 2009. (in Russian).

26. Галушкин Н. Е., Кукоз Ф. И., Язвинская Н. Н., Галушкин Д. Н. *Modelirovanie raboty akkumuljatorov* [*Modeling of operation of accumulators*], Shahty, izd-vo JuRGUJeS Publ., 2009 (in Russian).

27. Galushkin N. E., Yazvinskaya N. N., Galushkin D. N. // *J. Electrochem. Soc.* 2012. Vol. 159, pp. A1315.

28. Barnard R., Randell C. F., Tye F. L. *J. Appl. Electrochem.*, 1980, vol. 10, pp. 127.

29. Gindelis Ja. E. *Samorazryad shhelochnykh akkumuljatorov* [*Self-discharge of alkaline accumulators* Doct. dis.]. Leningrad, 1954. 25 p. (in Russian).

30. Skipworth S. E., Donne S. W. *J. Power Sources*, 2007, vol. 174, pp. 186.

31. Danilenko I. F., Haskina S. M., Smirnova T. N., Leonova M. V., Zolotov A. I. *Sbornik nauchnyh trudov po himicheskim istochnikam toka* [*Scientific works on chemical power sources*], Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1989, pp. 87 (in Russian).

32. Garcia-Valle R., Pecas Lopes J. A., eds. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems*. New York, Springer Science+Business Media, 2013.

33. Xing Y., Ma E. W., Tsui K. L., Pecht M. *Energies.*, 2011, vol. 4, pp. 1840.

34. Romanov V. V., Hashev Ju. M. *Himicheskie istochniki toka* [*Chemical power sources*], Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978 (in Russian).

35. Amiria M., Esfahanianb M., Hairy-Yazdic M. R., Esfahanianc V. *J. Power Sources*, 2009, vol. 190, pp. 372

Галушкин Николай Ефимович — д-р техн. наук, научный руководитель лаборатории электрохимической и водородной энергетики, Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», г. Шахты Ростовской области. Служебный телефон: (86362) 2–20–37, e-mail: galushkinne@mail.ru.

Язвинская Наталья Николаевна — канд. техн. наук, доцент, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону. E-mail: lionnat@mail.ru

Галушкин Дмитрий Николаевич — д-р техн. наук, заведующий лабораторией электрохимической и водородной энергетики, Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», г. Шахты Ростовской области. E-mail: dmitrigal@rambler.ru.

Галушкина Инна Александровна — канд. техн. наук, старший преподаватель, Новошахтинский филиал Южного федерального университета. Служебный телефон: (8–86369) 2–33–24, 2–34–43, e-mail: dmitrigal@rambler.ru