

УДК 541.136

## ИСПЫТАНИЕ ЛИТИЙ-ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА ДЛЯ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

С. А. Фатеев<sup>1</sup>, Н. В. Полякова<sup>2</sup>, В. П. Кондратов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «НПФ «Медисток», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГУП НИИЭИ, Электроугли, Московская обл., Россия

E-mail: el-02@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.12г.

Проведены длительные испытания литий-фторуглеродных источников тока для электрокардиостимуляторов с целью оценки формы разрядной кривой в конце срока эксплуатации. Показано, что более пологой разрядной кривой отличаются источники тока с большим содержанием фтористого углерода. Проведена оценка ёмкости источников тока при различных режимах разряда.

*Ключевые слова:* электрокардиостимулятор, фторуглеродно-литиевый элемент, разрядные характеристики источников тока.

Prolonged testing of lithium-fluorocarbon cells for pacemakers to evaluate the shape of the discharge curve are carried with the purpose of an estimation of the form at the end of operation. It is shown that flatter discharge curve of the differ-current sources with a high content of fluorocarbon. The estimation of capacity fluorocarbon-lithium cells made for various discharge conditions.

*Key words:* pacemaker, fluorocarbon-lithium cell, discharge characteristics of the cells.

### ВВЕДЕНИЕ

Современный электрокардиостимулятор (ЭКС) – это сложное программируемое устройство с большим количеством терапевтических и диагностических функций, поэтому он нуждается в регулярной проверке и настройке. Таким образом, контроль системы стимуляции является существенной частью общего процесса лечения больных с имплантированным устройством. После имплантации ЭКС больной обязан не реже одного раза в полугодие посещать лечащего врача для контроля состояния ЭКС.

По мере развития и усовершенствования технологий практически ежегодно появляются новые модели ЭКС, что требует сегодня обширных специальных знаний. Кроме общих знаний в области кардиостимуляции необходимо детальное знание конкретного типа ЭКС, электродов и программатора. Посредством программатора осуществляется связь с имплантированным ЭКС, программирование и анализ системы стимуляции. В современных стимуляторах последней разработки фирмы «Элестим-Кардио» при контроле работы ЭКС на экране программатора выводится напряжение на источнике питания и прогнозируемый срок службы ЭКС для заданного режима стимуляции. Сведения об ожидаемой продолжительности срока службы стимулятора получены на основании тестирования источников тока в экспериментальных

условиях, т.е. без учета многих индивидуальных факторов, которые также влияют на срок службы, а именно значения программируемых параметров (амплитуда, длительность импульса и частота стимуляции, импеданс электрода, процент навязанных сокращений и т.д.). Программатор автоматически рассчитывает оставшийся срок службы источника тока до рекомендуемого времени замены ЭКС. Для такого расчёта необходимо четко знать форму разрядной кривой в натуральных условиях на рабочей нагрузке ЭКС, особенно в конце работы источника тока на спадающей ветви разрядной кривой.

Знание состояния источника тока в ЭКС весьма важно, поскольку истощение источника питания может вызвать нарушения в блоке электронной схемы ЭКС, формирующей частоту электрических импульсов, и прекращению стимуляции сердца. В начальный период работы ЭКС контрольная частота стимуляции составляет 100 имп./мин (магнитный тест). В процессе эксплуатации кардиостимулятора по мере истощения источника питания частота стимуляции при проведении магнитного теста уменьшается. При наступлении контрольной частоты магнитного теста до 90 имп./мин показана плановая замена кардиостимулятора (так называемое «рекомендуемое время замены» стимулятора – РВЗ). Однако снижение частоты магнитного теста до 90 имп./мин свидетельствует лишь о наступлении времени замены стимулятора. Время оперативного вмешательства

может быть отсрочено, если по каким-либо причинам больной не может быть госпитализирован в ближайшее время. Длительность этого периода в определенной степени зависит от установленных энергетических параметров (при стандартных параметрах этот срок составляет примерно 3 месяца). Если частота магнитного теста достигает 80 имп./мин, то больной незамедлительно должен быть направлен на госпитализацию для замены кардиостимулятора. Частота 80 имп./мин соответствует экстренной замене (ЭЗ) стимулятора. Исходя из того, что нижний предел напряжения, при котором работает электрическая схема стимулятора, составляет 2.2В, было выбрано значение напряжения источника тока, при котором должно наступать РВЗ – 2.75 В. Напряжение на источнике тока, при котором наступает ЭЗ, должно составлять 2.4 В. Таким образом, получается, что время разряда источника тока от 2.75 В до 2.4 В на номинальной нагрузке должно составлять не менее 3 месяцев.

Литий-фторуглеродные ( $\text{Li-CF}_x$ ) источники тока являются современными конкурентоспособными источниками тока с высокой мощностью и надежностью, необходимой для имплантируемых медицинских приборов. Они пришли на смену литий-йодным источникам, обеспечивающим ЭКС более трех десятилетий. Однако для получения широкой информации об электрической активности сердца необходимо использовать методы лечения с более высоким энергопотреблением, что потребовало новые источники тока [1]. Вследствие того, что разработанные и выпускаемые в НПФ «Медисток»  $\text{Li-CF}_x$  источники тока предназначены для работы в имплантируемых электрокардиостимуляторах в течение 10 лет, потребление в которых составляет 25–30 мкА, то вопрос быстрого контроля электрической ёмкости выпускаемых источников тока весьма актуален. При ёмкости источника тока в 1500–2000 мА·ч разряд в таком режиме растянется на восемь – десять лет, что проблематично. Было предложено проводить ускоренное испытание для определения ёмкости путем разряда переменным номинальным током  $C/100000$  и током  $C/2000-C/500$ , существенно превышающим номинальный. Предполагалось, что такой режим разряда позволит с достаточной точностью измерять ёмкость элементов за разумное время (не более 1–2 месяцев). Важно было найти на сколько соответствует значение электрической ёмкости при обычном разряде и ускоренном на различных ре-

жимах. В [2] было показано, что увеличение тока разряда приводит к снижению доступной ёмкости источников тока ВР-5056, причем этот эффект скажется лишь при разряде токами, значительно превышающими номинальные. Между доступной ёмкостью и током разряда существует линейная зависимость.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для испытаний были выбраны источники тока ВР-5056, а для максимального приближения к натурным условиям разряда при испытаниях выбрана нагрузка 50 кОм, что обеспечивает разрядный ток в 60 мкА – это в два раза превышает номинальный ток. Длительность непрерывных испытаний составила пять лет. Конструкция и описание источников тока ВР-5056 приведены в [3].

Кроме того, проведены испытания с различным исходным фторуглеродом для изготовления катода, а также с различным составом катода для определения влияния испытаний на характеристики источников тока.

Испытания проводились с целью подтверждения объективности результатов по ускоренному разряду источников тока.

Для испытаний были выбраны два варианта фтористого углерода, производства ФГУП НИИ-ЭИ. 1 – фтористый углерод ИТГ-124-0-2 (содержание фтора 58–59мас.%) с пропиткой коллоидно-графитовым препаратом (2–3 мас.%). С этим фтористым углеродом готовились штатные катоды состава  $\text{CF}_x - 95\%$ ,  $\text{C} - 2\%$ ,  $\text{Ф4Д} - 3\%$ . 2 – волокнистый модифицированный фторуглерод (содержание фтора 60–61мас.%). Катоды готовились того же состава, что и для ИТГ-124. 3 – фтористый углерод ИТГ-124, но состав катода взят другой, с пониженным сопротивлением за счет увеличенного содержания графита:  $\text{CF}_x - 81.5\%$ ,  $\text{C} - 12.5\%$ ,  $\text{Ф4Д} - 6\%$ . 4 – фтористый углерод ИТГ-124-0-2, но катоды готовились без добавления графита, состав:  $\text{CF}_x - 98\%$ ,  $\text{Ф4Д} - 2\%$ . Учитывая то обстоятельство, что изначально во фторуглероде содержится от 2 до 3 % графита, мы рассчитывали на увеличение ёмкости источника тока за счет повышения содержания фтористого углерода и соответственно на увеличение время работы ЭКС. Испытание такого состава катодов проводилось на трех типах источников тока – ВР-3256, ВР-4580 и ВР-3756. Разряд этих источников тока для определения ёмкости проводился по ускоренной методике с пере-

менной нагрузкой. Вначале С/500, затем С/100000 до стабилизации разрядного напряжения и так далее до достижения напряжения на номинальной нагрузке 2.4 В. К выводам элементов контактной сваркой были приварены никелевые лепестки, к которым оловянным припоем припаивались нагрузочные сопротивления.

Для первых трех групп катодов были собраны 24 источника тока, причем элементы были разделены на три группы по 8 элементов. В каждой группе находилось 3 элемента со штатным вариантом исполнения катода; 3 элемента с катодной массой, содержащей 81.5% по массе фторуглерода; и 2 элемента с катодной массой на основе волокнистого фторуглерода. Первая группа элементов была сразу поставлена на нагрузку 50 кОм. Вторая группа элементов была предварительно разряжена в течение 7 дней на нагрузку 470 Ом. Элементы реализовали при этом в среднем 900 мА·ч (около 50% заложенной ёмкости). Затем элементы разряжались на нагрузку 50 кОм. до напряжения 2.4 В. Третья группа элементов предварительно разряжалась в течение 50 дней на нагрузку 2 кОм, реализовав при

этом от 70 до 90% заложенной ёмкости для разных партий элементов, дальнейший разряд проходил на нагрузке 120 кОм (табл. 1). Источники тока с катодами, изготовленными без добавки графита, разряжались по ускоренной методике с переменной нагрузкой: ВР-3756 – 100 кОм–750 Ом; ВР-4580 – 100кОм–510 Ом; ВР-5056 – 100кОм–470 Ом.

В течение первого года испытаний разряд элементов осуществлялся при комнатной температуре, запись напряжений проводилась один раз в неделю. В дальнейшем для исключения влияния температуры на снимаемые показатели все элементы постоянно находились при температуре  $37 \pm 1^\circ\text{C}$ .

На рис. 1 представлены разрядные кривые штатных изделий ВР- 5056. Практически все штатные изделия реализовали ёмкость более 2000 мА·ч при различных режимах испытаний. Время снижения напряжения разряда от 2.75 В до 2.4 В (рис. 1, а) составляет ~ 200–250 дней. Для элементов второй группы (рис. 1, б), с которых предварительно было отобрано 900 мА·ч, спад напряжения происходит за 200 дней. Для элементов третьей группы

Таблица 1

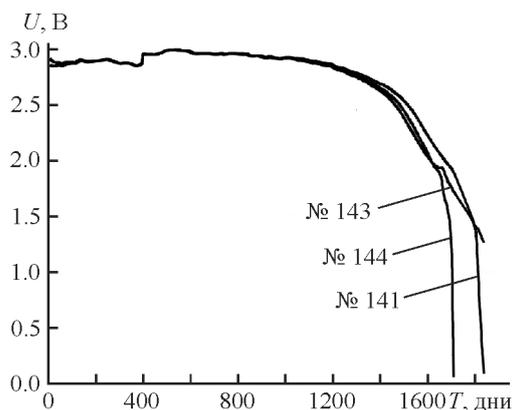
Сводная таблица характеристик источников тока ВР-5056 в течение 5-летнего разряда

№ источника тока	Вариант катода	Предварит. разряд, отобрано мА·ч	Реализованная ёмкость до 2.4 В, мА·час	Разряд на нагрузку, кОм	Примечание
141	Штатный вариант катода (95% ФУ)	---	2080	50	
143		---	2015	50	
144		---	2030	50	
154		900	2070	50	
155		900	2060	50	
156		900	2080	50	
160		1610.88	2024	120	
161		1652.88	2074	120	
162		1619.28	2105	120	
180	Волокнистый ФУ (95% ФУ)	---	1010	50	
181		---	>1500	50	Обрыв вывода
182		900	2145	50	
183		900	2260	50	
184		1176	1960	120	
185		1231,44	1940	120	
200	ИТГ -124-0-2 (81.5 % ФУ)	---	1675	50	
201		---	1670	50	
203		---	1670	50	
204		900	1555	50	
205		900	1595	50	
207		900	1505	50	
209		1521.76	1664	120	
210		1526.56	1630	120	
214		1279	---	120	Обрыв вывода

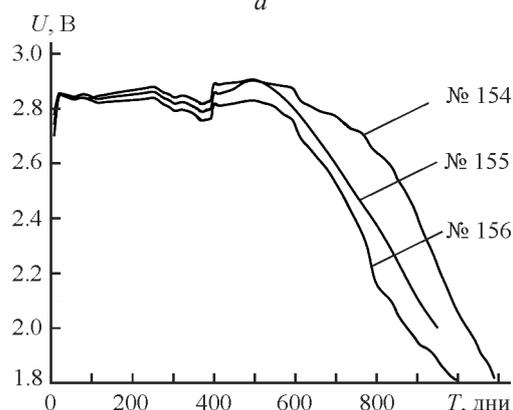
(рис. 1, в), с которых предварительно было отобрано порядка 1600 мА·ч, спад напряжения до 2.4 В происходит ~ за 300 дней.

Что касается элементов второй группы с катодами на основе волокнистого фторуглерода (рис. 2), то разрядное напряжение для них практически совпадает с таковым для литий-йодных элементов, т.е. на 200 мВ ниже, чем для штатных изделий, что

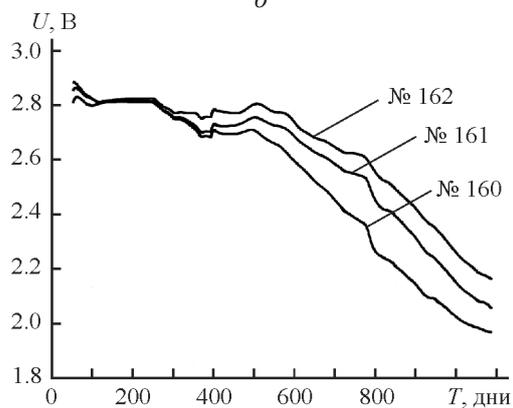
связано с повышенным содержанием фтора и естественно увеличенным сопротивлением катодного материала. Однако время снижения напряжения от плато до 2.4 В составляет ~ 250 дней. Несколько большая величина емкости на этих элементах связана с тем, что в волокнистом фторуглероде содержание фтора составляет 60 мас.% против 58% во фторуглероде ИТГ-124.



а

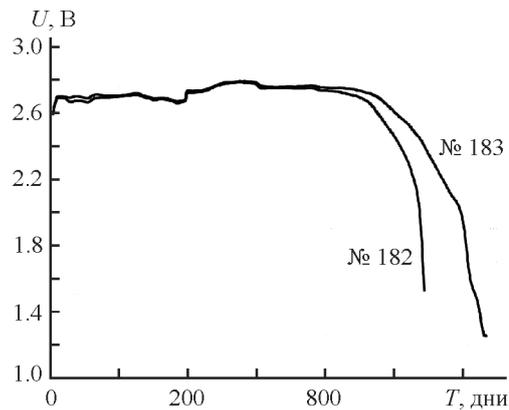


б

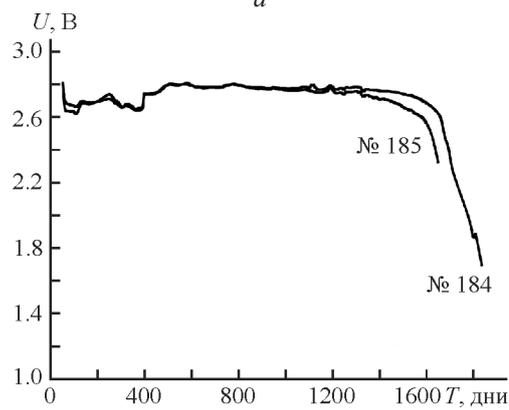


в

Рис. 1. Разрядные кривые штатных источников тока ВР-5056: а – в течение 5 лет на нагрузку 50 кОм, № 141, 143, 144; б – на нагрузку 50 кОм № 154, 155, 156. Предварительно с элементов отобрано 900 мА·ч; в – на нагрузку 120 кОм № 160, 161, 162. Предварительно с элементов отобрано 1620 мА·ч



а



б

Рис. 2. Разрядные кривые источников тока ВР-5056: а – с катодами на основе волокнистого фторуглерода на нагрузку 50 кОм №182, 183. Предварительно с элементов отобрано 900 мА·ч; б – на нагрузку 120 кОм № 184, 185. Предварительно с элементов отобрано 1200 мА·ч

Элементы третьей группы с катодами, содержащими 81% фтористого углерода (рис. 3), отличаются от штатных изделий только тем, что с них можно реализовывать в 4 раза более высокие токовые нагрузки в начальный период разряда до отбора ~ 50% ёмкости. Ток короткого замыкания достигал 800 мА, против 200 мА для штатных изделий. Время достижения напряжения 2.4 В от уровня 2.75 В составляет ~ 150 дней. Это в среднем в два раза меньше, чем для штатных изделий с содержанием фторуглерода в катоде 95%. Только реализованная ёмкость для элементов третьей группы на 20% меньше, чем для первой группы.

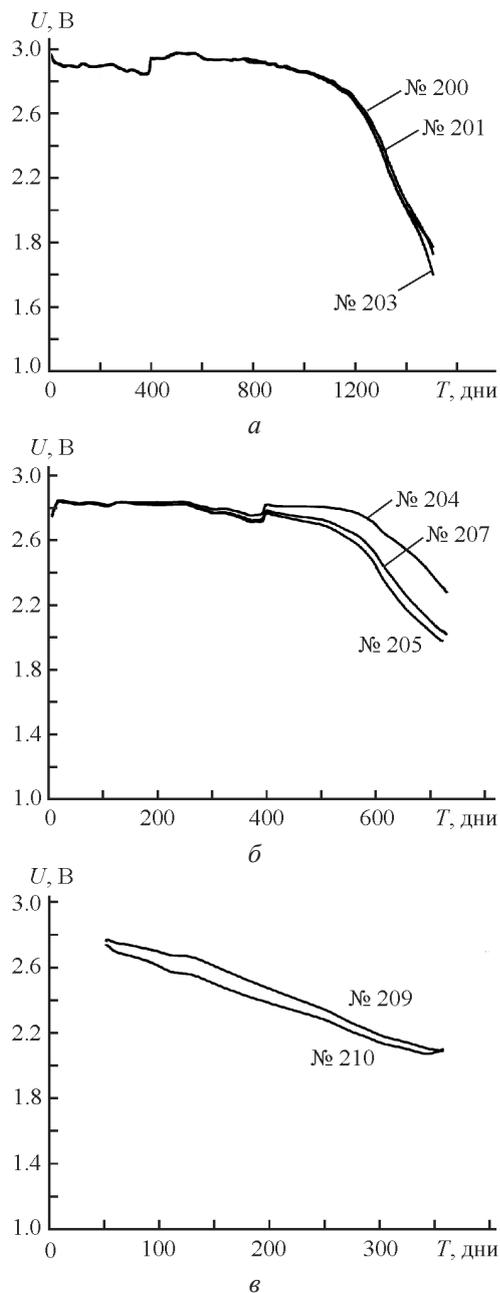


Рис. 3. Разрядные кривые источников тока ВР-5056: а – в течение 4 лет на нагрузку 50 кОм с катодами с содержанием фтористого углерода 81.5%, № 200, 201, 203; б – на нагрузку 50 кОм с катодами с содержанием фтористого углерода 81.5%, № 204, 205, 207. Предварительно с элементов отобрано 900 мА·ч; в – на нагрузку 120 кОм с катодами с содержанием фтористого углерода 81.5%, № 209, 210. Предварительно с элементов отобрано 1500 мА·ч

После проведения испытаний все источники тока контролировались на состояние реакторной части после длительной работы на предмет коррозии и изменения состояния. К сожалению, все источники тока, подвергшиеся этим испытаниям, относились к первоначальному периоду освоения

серийного производства, поэтому возможна некоторая нестабильность в технологии, что сказалось на параметрах источников тока. Литий во вскрытых источниках тока был сильно окислен. При последующих сборках источников тока было предпринято всё для более сухих условий изготовления, и более поздние сборки отличались повышенным качеством исполнения. Титановый токосъём катода с покрытием коллоидным графитом оставался без изменений на протяжении 5 лет разряда. Поэтому внутреннее сопротивление источника тока в конце разряда изменялось незначительно. Если первоначально внутреннее сопротивление составляло 30–50 Ом, то после завершения испытаний оно соответствовало 120–700 Ом. Стеклогермовывод на основе стекла С-62 с молибден-рениевым выводом также показал хорошую устойчивость и стойкость стекла, сопротивление изоляции и герметичность остались без изменений. На поверхности стекла также не обнаружено следов разрушения.

На рис. 4 и в таблице 2 представлены разрядные характеристики источников тока с фтористым углеродом ИТГ-124-0-2, но катоды готовились без добавления графита, состав:  $CF_x$  – 98%, Ф4Д – 2%. Как видно, использование нового состава катода увеличивает ёмкость в среднем на 5–7%, однако среднее разрядное напряжение на малых токовых нагрузках практически не меняется от состава катода. При этом время достижения напряжения разряда в 2.4 В составляет чуть больше 300 дней. Только для элементов с ёмкостью 1400 мА·ч это время составляет 100 дней. Таким образом, время достижения напряжения 2.4 В тем больше, чем больше заложенная ёмкость источника тока.

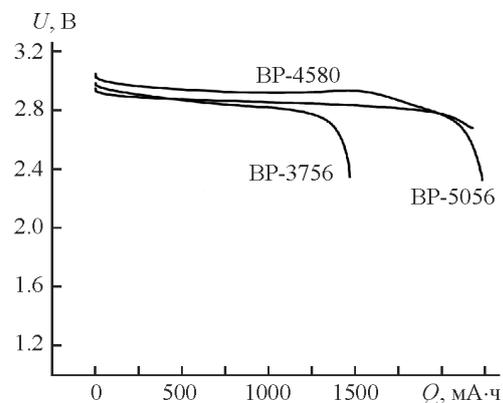


Рис. 4. Средние разрядные кривые источников тока ВР-3756, ВР-5056, ВР-4580 на нагрузку 120 кОм с катодами состава:  $CF_x$  – 98%, Ф4Д – 2%. Ускоренный разряд проводился на нагрузке для ВР-3756 – 750, для ВР-5056 – 470, для ВР-4580 – 510 Ом

Таблица 2  
Характеристики источников с катодами состава:  
CF<sub>x</sub> – 98%, Ф4Д – 2%

№ источника тока	Среднее разрядное напряжение на плато, В, при нагрузке 100 кОм	Реализованная ёмкость до 2.4 В, мА·ч
BP-3756 № 2-1	2.830	1468
BP-3756 № 2-2	2.830	1468
BP-3756 № 2-3	2.830	1468
BP-4580 № 1-1	2.850	2250
BP-4580 № 1-2	2.850	2250
BP-4580 № 1-3	2.850	2260
BP-5056 № 3-1	2.875	2218
BP-5056 № 3-2	2.875	2218
BP-5056 № 3-3	2.880	2218

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как показали проведенные испытания, на всех разрядных кривых независимо от состава катода спад напряжения происходит в среднем за 250–300 дней, что отвечает требованиям разработчиков ЭКС. В источниках тока с катодами с пониженным содержанием фтористого углерода разрядная кривая имеет более крутую форму на участке спада и время достижения напряжения 2.4 В сокращается в 1.5–2 раза. Аналогичный результат имеет место и в случае использования фтористого углерода с содержанием фтора 30–40 мас. %.

На время спада разрядного напряжения оказывает влияние как содержание фтора во фторуглероде, так и содержание фтористого углерода в катодной массе. Кстати, сотрудники компании Medtronic проводят работы по использованию смешанного катода для элементов с фтористым углеродом для сглаживания резкого падения напряжения в конце срока службы источника тока [4].

Способ ускоренного определения ёмкости источников тока попеременным разрядом на номинальной и пониженной нагрузке дает надежный результат по сравнению с прямым разрядом на номинальной нагрузке. Данный способ может с большой надежностью использоваться для определения емкости источников тока при проведении прямо-сдаточных испытаний в сроки до одного месяца.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmidt C. L., Skarstad P. M. // J. Power Sources. 2001. Vol. 97–98. P. 742–746.
2. Фатеев С.А., Кулова Т.Л., Скундин А.М. // Электротехн. энергетика. 2002. Т. 2, № 2. С. 97–101.
3. Фатеев С. А., Рынсков Е. В., Ясюкевич Д. О. // Вестн. РАЕН. 2007. Т. 7, № 3. С. 33–36.
4. Chen K., Merritt D. R., Howard W. G., Schmidt C. L., Skarstad P. M. // J. Power Sources. 2006. Vol. 162. P. 837–840.