

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

В. В. Емцев¹, С. В. Гришин², Д. И. Максимов³,
Ю. Е. Мамонтова³, Ю. А. Стекольников³

ФГКВБОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (1); г. Воронеж, Россия; ОАО «Энергия» (2); кафедра химии (3), chemic57@mail.ru; ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина», г. Елец, Липецкая обл., Россия

Ключевые слова: ленточные воспламенители; пиротехнические и электродные материалы; резервный источник тока; электролиты расплавы.

Аннотация: Предложено использовать в качестве анодных материалов сплавы Li_4Si с содержанием $\text{Li} > 50$ масс.%. Разработана технология синтеза Li_4Si в предварительно сформированном аноде при термическом взаимодействии Li с Si -содержащим композиционным материалом. В качестве катода предложено использовать FeS_2 , обладающий высокой теоретической емкостью. Разработана технология использования пирита с обогащением не менее 90 масс.% FeS_2 . В качестве электролита эвтектические смеси « LiCl-KCl-LiF ». Разработаны безгазовые пиротехнические смеси на основе высокодисперсных нанопорошков железа с высоким удельным тепловыделением до 1300 Дж/г и скоростями горения до 100 мм/с. Предложены пиротехнические ленточные воспламенители со скоростью горения 2,5 м/с, что обеспечивает одновременный поджог элементов источников тока и уменьшает время инициирования и задействия батареи.

В большинстве современных средств вооружений требуются автономные резервные источники электроэнергии, обеспечивающие технические и тактические характеристики конкретных видов вооружений. К ним предъявляются достаточно жесткие требования [1 – 6]:

- способность выдерживать значительные механические воздействия: ударные, вибрационные и линейные перегрузки;
- храниться и работать в различных климатических условиях с температурами от -60°C до $+60^\circ\text{C}$;
- длительное хранение (более 20 лет) без потери электрических характеристик и без необходимости, в течение этих сроков, каких-либо регламентных работ;
- важным для источников тока является их миниатюризация, то есть при этом они должны иметь достаточно высокие удельные энергию и мощность.

В наибольшей мере данным требованиям отвечают тепловые батареи на электролитах – расплавах, в которых в незадействованном состоянии солевой многокомпонентный электролит, находясь в твердой фазе, обладает практически полным отсутствием проводимости, что обеспечивает длительные сроки хранения в любых климатических условиях. До конца 1980-х годов в тепловых батареях использовались электрохимические системы с кальциевым анодом.

Однако электрохимические системы с кальциевым анодом имели ограниченные возможности по теоретической емкости, поэтому разработанные тепловые батареи имели низкие удельные энергии (0,31...8 Вт ч/кг). Качество используемых комплектующих, особенно пиротехнических средств нагрева, приводило к низкой устойчивости при механических воздействиях, возникновению колебаний напряжения, а сохраняемость не превышала 10 – 12 лет.

Существенным недостатком было использование в нагревательных элементах пиротехнических составов, содержащих порошковый цирконий (горючий компонент) и хромат бария (окислитель). При сгорании данные составы выделяли до 10...15 см³ газов, содержащих до 70 % водорода и влаги. Такая газовая фаза создавала в герметичной батарее высокое давление и в условиях высоких рабочих температур отравляла электроды, что приводило к снижению характеристик батарей.

В начале 1980-х годов разработано новое поколение тепловых батарей, имеющих существенно более высокие удельные характеристики (увеличение удельной энергии в 3 – 5 раз); сохраняемость не менее 20 лет и высокую устойчивость к механическим воздействиям (удар с вращением не менее 500 – 15 000 g, где g – ускорение), что потребовало решения комплекса научно-технических и технологических проблем, среди которых:

1. Исследование и разработка высокоэнергоемкой электрохимической системы, ее технологий изготовления электродов и электрохимических элементов в целом на основе использования лития в электродном процессе. Поскольку чистый литий в качестве отрицательного электрода нельзя использовать в тепловых батареях из-за низкой температуры плавления, необходимо разработать материалы, содержащие достаточное количество лития, с температурой плавления выше 600 °С или обеспечить удержание жидкого лития от растекания в какой-либо матрице.

В результате проведенных исследований разработаны и исследованы интерметаллические соединения лития с кремнием Li₄Si, содержащие около 50 масс.% лития с температурой плавления выше 630 °С, простая и эффективная технология изготовления анода из данного материала. Особенность состоит в том, что синтез соединения Li₄Si проводится в предварительно сформированном аноде и основан на термическом взаимодействии лития с кремнийсодержащим композиционным материалом.

Данная технология позволяет получать аноды различной емкости, меняя диаметр и толщину литиевой фольги, а также количество композиционного материала, то есть кремния. Важной особенностью разработки технологии является высокая экологическая чистота по сравнению с широко применяемой в мировой практике технологией прессования электрода из мелкодисперсного порошка сплава Li₄Si, аэрозоли которого токсичны.

2. Разработка состава катода на основе дисульфида железа, который обладает высокой теоретической емкостью. При этом использован не чистый синтетический дисульфид железа, получение которого достаточно трудоемко и дорого, а природный минерал парит (серный колчедан), который после специального обогащения на добывающих предприятиях содержит не менее 90 масс.% дисульфида железа. Использование в катодной массе специальных стабилизирующих добавок позволило создать катод с высокой удельной емкостью и стабильным потенциалом.

3. В качестве электролита использованы эвтектические смеси хлористых солей лития и калия с добавками 3 % фторида лития с температурой плавления 342 °С.

Поскольку электрохимические элементы тепловых батарей подвергаются значительным механическим воздействиям, электролитная смесь, для увеличения ее устойчивости, загущается инертными мелкодисперсными порошками (например, окисью алюминия), имеющими высокие температуры плавления (выше 2 000 °С, которые снижают подвижность жидкой фазы в электролитной таблетке.

Таким образом, разработанная электрохимическая система выглядит следующим образом: « $\text{Li}_4\text{Si}/\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{LiF}/\text{FeS}_2$ » с высокой теоретической удельной емкостью (по аноду – 58 А·мин/г, по катоду – 17 А·мин/г).

Электрохимические элементы имеют номинальные напряжения около 2,0 В и представляют собой диски из трех тонкослойных таблеток: анодной, электролитной и катодной. Разработан технологический ряд по диаметрам элементов с учетом возможностей прессового оборудования заводов. Минимальный диаметр составляет 9 мм, максимальный – 50 мм.

Варьируемая масса электродов позволила разработать элементы с различной электрической емкостью. Последовательное и параллельное соединение элементов позволило создать батареи с необходимыми уровнями напряжений и токов потребления.

4. Исследование и разработка пиротехнических средств разогрева электрохимических элементов с учетом специфических требований. Тепловая батарея представляет собой замкнутую герметичную оболочку, пиротехнические нагревательные элементы (тепловые таблетки) в ней должны сгорать, практически не выделяя газообразной фазы, в том числе и паров воды, то есть пиротехническая смесь должна гореть в режиме без газового горения, а все продукты сгорания должны оставаться в твердой фазе. Пиротехнические смеси для тепловых батарей также должны иметь достаточно высокое (для такого класса смесей) удельное тепловыделение и высокую скорость горения. Продукты сгорания должны обладать высокой электронной проводимостью, чтобы их можно было использовать в качестве коммутирующих токоємников между электрохимическими элементами.

Тепловая таблетка после сгорания не должна менять свои геометрические размеры, что обеспечивает постоянство электрических контактов между элементами и не приводит к увеличению внутреннего сопротивления батареи.

Отметим, что в режиме без газового горения горят пиротехнические смеси, горючим компонентом которых являются тяжелые металлы (железо, молибден, вольфрам, цирконий и т.п.), а окислителем служит перхлорат калия.

Прекрасным горючим компонентом являются мелкодисперсные высокочистые порошки железа, и пиротехнические смеси на их основе отвечают всем вышесказанным требованиям. Государственным научно-исследовательским институтом химии и технологии элементоорганических соединений (г. Москва) совместно с ФГУБ «НПП «Квант» разработана и внедрена в серийное производство на ОАО «Энергия» технология высокой очистки и капсулирования мелкодисперсных порошков карбонильного железа. Это позволило разработать рецептуры пиротехнических смесей с достаточно высоким удельным тепловыделением (900...1300 Дж/г) и скоростями горения от 45 до 100 мм/с. Низкое содержание газовой фазы в продуктах сгорания (менее 0,01 см³/г), не содержащих водорода и паров воды, сняло вопрос о взрывоопасности смесей, а капсулирование порошков железа сделало их не пирофорными. Это позволило изготовить пиротехнические смеси и тепловые таблетки с высокой стабильностью характеристик в условиях производственных цехов завода-изготовителя тепловых батарей.

Высокие скорости горения пиротехнических смесей и высокая теплопроводность шлаков обеспечили возможность снижения времени приведения батареи в рабочее состояние, которое в зависимости от размеров электрохимических элементов составляет 0,2...1,5 с. Высокая электропроводность шлаков позволила их использовать в качестве коммутирующих деталей в межэлементных соединениях.

Использование пресс-автоматов с высокой точностью дозирования и возможностью прессования тонкослойных пластин обеспечивает высокую точность изготовления тепловых таблеток, разброс которых по тепловыделению не превышает $\pm 3\%$ – это один из существенных вкладов в стабилизацию параметров тепловых батарей.

Для передачи огневого импульса от устройства задействия к тепловым таблеткам для их воспламенения разработаны специальные пиротехнические ленточные воспламенители (ПЛВ) со скоростью горения более 2,5 м/с, обеспечивающие практически одновременный поджог всех тепловых таблеток по высоте блока электрохимических элементов. Возможность варьирования тепловыделения с единицы поверхности и конструктивные особенности установки ПЛВ на блок электрохимических элементов позволяют существенно снизить время вывода батареи на рабочий режим.

5. Создание и использование эффективных теплоизоляционных материалов, уменьшающих теплопотери в 2-3 раза, позволяет создать тепловые батареи с временем работы до 40 минут. В перспективе ведутся исследования по увеличению времени работы батареи до 60 минут.

Созданы новые теплоизоляционные материалы: «Картон-Н» и АТМ-17. «Картон-Н» изготавливается в виде гибких листов методом картонного литья из специально приготовленной рецептуры на основе аэросила-380. Его теплопроводность более чем в 2 раза ниже теплопроводности асбеста, а термостойкость составляет 800...900°С. Теплоизоляционный материал АТМ-17 изготавливается методом прессования в виде полуцилиндров, которыми выстилается внутренняя поверхность корпусов тепловых батарей. Его теплопроводность более чем в 3 раза ниже теплопроводности асбеста.

6. Для разработки оптимальной конструкции тепловой батареи необходимо оптимизировать ее тепловую схему при минимальном объеме.

Выбор тепловой схемы осуществляется при проведении численных экспериментов на компьютере, в которых варьируются различные схемы теплоизоляции и теплового баланса и рассчитываются изменения температурного поля во времени в любой точке батареи.

Для проведения таких расчетов разработаны компьютерные программы, основанные на математической модели, описывающей нестационарные тепловые процессы в многослойном теле, которая учитывает внутренние источники тепла, изменения теплофизических коэффициентов и геометрические параметры каждой детали в конструкции.

В результате расчетов выбирается схема, обеспечивающая оптимальный температурный режим в батарее и минимальную потерю тепла в окружающую среду при минимальных объемах батареи.

7. Разработаны технологические процессы изготовления сборочных единиц и батареи в целом, которые обеспечили ряд специфических требований, обязательных к исполнению при изготовлении тепловых батарей.

Использование в конструкции высоко гигроскопических материалов предъявляет жесткие требования к влажности воздуха в рабочих зонах изготовления как отдельных деталей и сборочных единиц, так и батареи в целом. Все операции, связанные с изготовлением отрицательных электродов, электролитных и катодных таблеток, а также со сборочными единицами, содержащими указанные детали, производятся в атмосфере осушенного воздуха с влажностью не более 600 ppm (3 – 5 % относительной влажности), а применяемые материалы предварительно обезвоживаются путем прокаливания или сушки.

Межоперационное хранение деталей и сборочных единиц осуществляется в термотарах или эксикаторах с осушителем.

Для обеспечения требований документации по влажности производственной среды цеха по изготовлению тепловых батарей, сборочные линии оснащены боксами с подачей в них осушенного воздуха и приборами для контроля его расхода и влажности.

Параметры некоторых конкретных батарей представлены в табл. 1. По удельной массе характеристики основной массы батареи находятся на уровне зарубежных образцов.

**Сравнительные данные ЭХЭ с различным составом анода
при температуре 550 °С**

Анод	Время работы, τ_p , с		Средний ток, $I_{ср}$, А	Емкость элемента до $0,8 U_{max}$, Q , А·с	Удельная емкость сплава, $Q_{уд}$, А·с/г
	до 1,5 В	до $0,8 U_{max}$			
Li-Si, масса 0,1 г, 50 масс.% Li	44	47	2,73	128	1 280
Li-B (КНР), масса 0,19 г, 55 масс.% Li	130	120	2,93	352	1 850
Li-B (г. Екатеринбург), масса 0,11...0,12 г, 67 масс.% Li	115	100	3,07	307	2 560

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики удельной энергии разработанных батарей, которые не уступают батареям, выпускаемым американской фирмой Eagle Picher Technologies, имеющих близкие габаритно-весовые характеристики, где $\tau_{вр}$ – время выхода на режим; U_{max} – максимальное напряжение; $\tau_{24В}$ – продолжительность работы до 24 В; R_{const} – постоянное сопротивление; I_{max} , $I_{ср}$ – максимальный и средний токи соответственно; P_{const} – постоянная мощность.

Дальнейшее совершенствование тепловых батарей видится в улучшении их удельных характеристик: увеличении времени работы, стабилизации вольтамперных характеристик в процессе разряда, сокращении времени выхода батарей на режим. Необходимо получить следующие результаты:

1. Повысить удельные характеристики за счет снижения массы источника тока, что может быть достигнуто путем оптимизации соотношения диаметра батареи и ее высоты. Это в первую очередь относится к источникам тока с длительным

Таблица 2

Результаты испытаний батарей БТ-300 с использованием ЭХЭ анода Li-B

Температура, °С	$\tau_{вр}$, с	U_{max} , В	$\tau_{24В}$, с	Примечание
-50	0,35	29,3	46	$R_{const} = 7,8 \text{ Ом}$ $I_{max} = 3,76 \text{ А } (i = 770 \text{ мА/см}^2)$
0	0,32	29,8	44	$I_{const} = 3,3 \text{ А } (i = 670 \text{ мА/см}^2)$
+50	0,22	30,3	74	$P_{const} = 90 \text{ Вт}$ $I_{ср} = 4,0 \text{ А } (I = 820 \text{ мА/см}^2)$
0	0,20	30,0	66	$P_{const} = 90 \text{ Вт}$ $I_{ср} = 4,0 \text{ А } (I = 820 \text{ мА/см}^2)$
Требования ТЗ				
+50 -50	$\leq 0,5$	$\leq 31,0$	$\geq 20,0$	$I_{const(27 В)} = 3,3 \text{ А}$

временем работы или большими токами разряда. Оптимизация габаритно-весовых характеристик позволит снизить потери тепла в окружающую среду, и, тем самым, увеличить время работы тепловых батарей.

2. Стабилизировать вольтамперные характеристики, что является важным фактором качества электрической энергии, выдаваемой потребителю.

Как известно, в тепловых источниках тока вольтамперная характеристика во времени падает, что связано, во-первых, с потерей тепла в окружающую среду, во-вторых – с падением во времени потенциалов отрицательных и положительных электродов. Стабилизация этих потенциалов приведет к уменьшению перепада напряжения в процессе разряда.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт «Квант» (г. Москва) совместно с ОАО «Энергия» (г. Елец) проводит работы по созданию анодных материалов со стабильными потенциалами и разработку технологии их изготовления, которые ведутся в двух направлениях:

– в существующий анодный материал Li-Si вводится компонент с высокой электронной проводимостью, что позволяет снизить внутреннее сопротивление отрицательного электрода и его потенциал, а также улучшить коэффициент полезного использования активной массы анода;

– потенциал в процессе разряда будет стабильным, если в анодном процессе будет участвовать чистый Li, однако из-за низкой температуры плавления Li (187 °C) это невозможно. Необходимо обеспечить, чтобы расплавленный Li удерживался в объеме отрицательно электрода и не вытекал за его габариты.

Этого можно достичь, если чистый Li смешать с материалами, которые он хорошо смачивает. При этом данные материалы должны иметь высокую удельную поверхность, на которой будет удерживаться необходимое количество Li, обеспечивающее требуемую для разряда батареи электрическую емкость. В настоящее время такие материалы появились, в том числе и на наномасштабе. Обработка технологии загущения чистого Li является весьма перспективной задачей.

3. Литературные данные, относительно катодных материалов, показывают принципиальную возможность использования новых высокоэнергоемких веществ. К их достоинствам следует отнести стабильный, почти независимый от степени разряда, потенциал, большие токи обмена, высокий коэффициент полезного использования.

Такие катодные материалы представляют наибольший интерес при разработке высокоомощных батарей с длительным временем разряда.

4. Существенное влияние на электродные процессы оказывает состав электролита. Используемый с настоящее время электролит на основе системы «LiCl–KCl» содержит балластные, ненужные в электрохимической реакции ионы калия, которые способствуют образованию, так называемой «*j*-фазы» вещества, формирующего на поверхности частиц катодного материала – дисульфида железа, оболочки препятствующей катодной реакции. Поэтому предполагается использовать в качестве электролита чисто литиевых композиций, лишенных указанных дефектов.

5. Одним из направлений снижения массы тепловых батарей, и, тем самым, повышения их удельных характеристик, является поиск путей повышения удельного тепловыделения пиротехнических составов, и, тем самым, снижение массы тепловых таблеток. В настоящее время в разработанных пиротехнических составах на основе высокочистых мелкодисперсных порошков железа используется добавка порошков молибдена, снижающая время сгорания тепловых таблеток.

В настоящее время появились технологии получения ультрадисперсных порошков железа, то есть можно отказаться от добавки молибдена, как очень тяжелого компонента. Это позволит за счет снижения массы тепловых таблеток, при сохранении удельных значений тепловыделения, снизить массу тепловых батарей.

Для сокращения времени выхода батареи на режим проводятся работы по поиску конструктивных решений, обеспечивающих одновременный поджог тепловых таблеток не только по высоте блока элементов, но и по их периметру. Это стало возможным благодаря улучшению технологии изготовления ПЛВ, в результате чего была повышена скорость горения состава ПЛВ не менее чем в 2,5 раза. Данная технология позволяет варьировать тепловыделение с единицы поверхности ПЛВ, что дало возможность увеличить поверхность ПЛВ для обеспечения максимально возможного одновременного поджога тепловых таблеток по периметру. Это привело к уменьшению времени полного сгорания тепловых таблеток и, соответственно, снижению времени выхода батареи на режим.

Отметим, что для обеспечения потребности оборонной промышленности в резервных тепловых химических источниках тока на высоком техническом уровне разработана электрохимическая система с высокомоощными электродами на основе Li_4Si , FeS_2 , которая в расплавах, в зависимости от типа размера, может обеспечить потребности в энергоснабжении средств вооружения с малым временем заедействования.

Список литературы

1. Кукоз, Ф. И. Тепловые химические источники тока / Ф. И. Кукоз, В. В. Трущ, В. И. Кондратенков. – Ростов н/Д : Изд-во РГУ, 1989. – 219 с.
2. Химические источники тока : справочник / Под ред. Н. В. Коровина, А. М. Скундина. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 740 с.
3. Пат. 2393591 Российская Федерация, МПК H01M 6/36. Тепловой химический источник тока / В. И. Кондратенков, М. Ю. Нахшин, Б. В. Иванов, Г. И. Сивкова, А. Г. Денискин, С. В. Гришин, А. Г. Якушева; заявитель и патентообладатель ОАО «Научно-производственное предприятие «Квант». – № 2009115750/09; заявл. 24.04.2009 ; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 6 с.
4. Кедринский, И. А. Литиевые источники тока / И. А. Кедринский, Е. Е. Дмитренко, И. И. Грудянов. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
5. Моделирование конструкций резервного источника тока / С. В. Гришин, Ю. Е. Мамонтова, О. А. Каверин, Ю. А. Стекольников // Ученые записки Орловского гос. ун-та. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. – 2010. – № 4. – С. 42 – 44.
6. Конструкция резервного теплового источника тока / С. В. Гришин, Ю. Е. Мамонтова, О. А. Каверин, Ю. А. Стекольников // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 575 – 583.

New Technologies in the Production of Thermal Chemical Current Sources

V. V. Emtsev¹, S. V. Grishin², D. I. Maksimov³,
Yu. E. Mamontova³, Yu. A. Stekolnikov³

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force
Air Force Academy named after Professor N. Ye. Zhukovsky
and Yu. A. Gagarin (1), Voronezh, Russia; JSC Energia (2);
Department of Chemistry (3), chemic57@mail.ru;
Bunin Yelets State University, Yelets, Lipetsk region, Russia*

Keywords: tape ignitors; pyrotechnic and electrode materials; backup current source; electrolytes; melts.

Abstract: It is proposed to use Li_4Si alloys with Li content > 50 wt.% as anode materials. A technology for the synthesis of Li_4Si in a pre-formed anode with thermal interaction Li with Si-containing composite material has been developed. It is proposed to use FeS_2 as a cathode, which has a high theoretical capacity. A technology has been developed for using pyrite with an enrichment with FeS_2 of at least 90 wt.%. As an electrolyte, eutectic mixtures “LiCl–KCl–LiF” were used. Gas-free pyrotechnic mixtures based on highly dispersed iron nanopowders with high specific heat release up to 1300 J/g and burning rates up to 100 mm/s have been developed. The pyrotechnic tape ignitors with a burning rate of 2.5 m/s are proposed, thus providing simultaneous ignition of the elements of the current sources and reducing the time of initiation and activation of the battery.

References

1. Kukož F.I., Trushch V.V., Kondratenkov V.I. *Teplovyye khimicheskiye istochniki toka* [Thermal chemical sources of current], Rostov n/D: Izdatel'stvo RGU, 1989, 219 p. (In Russ.)
2. Korovin N.V., Skundin A.M. [Eds.] *Khimicheskiye istochniki toka: spravochnik* [Chemical current sources: a reference book], Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2003, 740 p. (In Russ.)
3. Kondratenkov V.I., Nakhshin M.Yu., Ivanov B.V., Sivkova G.I., Deniskin A.G., Grishin S.V., Yakusheva A.G. *Teplovoy khimicheskiy istochnik toka* [Thermal chemical current source], Russian Federation, 2010, Pat. 2393591. (In Russ.)
4. Kedrinskiy I.A., Dmitrenko Ye.Ye., Grudyanov I.I. *Litiyevyye istochniki toka* [Lithium current sources], Moscow: Energoatomizdat, 1992, 240 p. (In Russ.)
5. Grishin S.V., Mamontova Yu.Ye., Kaverin O.A., Stekol'nikov Yu.A. [Modeling of structures of a backup current source], *Uchenyye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye, tekhnicheskkiye i meditsinskiye nauki* [Scientific notes of the Oryol State University. Series: Natural, technical and medical sciences], 2010, no. 4, pp. 42-44. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Grishin S.V., Mamontova Yu.Ye., Kaverin O.A., Stekol'nikov Yu.A. [Design of a backup thermal current source], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 575-583. (In Russ., abstract in Eng.)

Neue Technologien in der Produktion der thermischen chemischen Stromquellen

Zusammenfassung: Es ist vorgeschlagen, als Anodenmaterialien Li_4Si -Legierungen mit Li-Gehalt > 50 Gew.% zu verwenden. Es ist die Technologie zur Synthese von Li_4Si in einer vorgeformten Anode während der thermischen Wechselwirkung von Li mit einem Si-haltigen Verbundmaterial entwickelt. Als Kathode ist FeS_2 vorgeschlagen, das eine hohe theoretische Kapazität besitzt. Es ist die Technologie entwickelt, um Pyrit mit einer Anreicherung von mindestens 90 Gew.% FeS_2 zu verwenden. Als Elektrolyt sind eutektische Mischungen “LiCl–KCl–LiF” vorgeschlagen. Entwickelt sind gasfreie pyrotechnische Gemische auf Basis hochdisperser Eisen-Nanopulver mit einer hohen spezifischen Wärmeabgabe bis 1300 J/g und Brenngeschwindigkeiten bis 100 mm/s. Es sind die pyrotechnischen Bandzündler mit einer Brenngeschwindigkeit von 2.5 m/s vorgeschlagen, die die gleichzeitige Zündung der Elemente der Stromquellen ermöglichen und die Zeit der Initiierung und Aktivierung der Batterie reduzieren.

Nouvelles technologies dans la production des sources thermiques chimiques de courant

Résumé: Est proposé d'utiliser en qualité des matériaux anodiques des alliages Li_4Si avec une teneur en Li > 50 masses.%. Est élaboré la technologie de la synthèse de Li_4Si dans une anode préformée lors de l'interaction thermique Li avec un matériau composite contenant de Si. Est proposé d'utiliser FeS_2 , qui a une capacité théorique élevée, comme cathode. Est mise au point une technique d'enrichissement en pyrite d'au moins de 90 masses.% FeS_2 . En tant qu'électrolyte, les mélanges eutectiques sont "LiCl–KCl–LiF". Sont conçus des mélanges sans-gaz pyrotechniques à la base des nanopoudres de fer très dispersée de haute densité d'une dissipation thermique jusqu'à 1300 J/g et la vitesse de brûlage jusqu'à 100 mm/S. Sont proposés des allumeurs à bande pyrotechniques avec une vitesse de combustion de 2.5 m/s ce qui permet d'allumer simultanément les éléments des sources du courant et de réduire le temps de démarrage et d'utilisation de la batterie.

Авторы: *Емцев Виталий Валерьевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель, ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; *Гришин Сергей Викторович* – начальник лаборатории новых материалов, ОАО «Энергия»; *Максимов Дмитрий Игоревич* – аспирант кафедры химии; *Мамонтова Юлия Евгеньевна* – аспирант кафедры химии; *Стекольников Юрий Александрович* – кандидат химических наук, профессор кафедры химии, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина», г. Елец, Липецкая обл., Россия.

Рецензент: *Спиридонов Евгений Геннадьевич* – доктор технических наук, профессор, доцент кафедры «Аэродромно-технических средств», ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.