

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7.036.74

DOI: 10.34759/vst-2019-4-81-89

СОЗДАНИЕ СЛАБОТОЧНОГО КАТОДА ДЛЯ МАЛОГО СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Парахин Г.А.^{1*}, Румянцев А.В.^{2**}, Панков Б.Б.^{1***}, Каташова М.И.^{1****}

¹ Опытное конструкторское бюро «Факел»,
ОКБ «Факел», Московский проспект, 181, Калининград, 236001, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
БФУ им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236041, Россия

* e-mail: parahin@fakel-russia.com

** e-mail: albert37@list.ru

*** e-mail: boris.pankoff@yandex.ru

**** e-mail: katashova@fakel-russia.com

Статья поступила в редакцию 14.08.2019

Описаны пути расширения диапазона рабочих токов в сторону их уменьшения, показаны примеры реализации этих путей как в направлении конструктивных изменений, так и в направлении освоения новых технологий. Проиллюстрированы этапы отработки технологии изготовления импрегнированных бариевых и скандатно-бариевых термоэммиттеров. Показаны прогнозируемые и реальные проблемы, возникшие в ходе работ, и пути их решения. Приведены результаты исследовательских испытаний опытного катода высокоимпульсного двигателя (КВДО) и катода с бариевым термоэммиттером.

Ключевые слова: слаботоочный катод, тепловой экран, импрегнированный катод, термоэмиссия, тепловая схема.

Введение

В настоящее время наблюдается рост энерговооруженности космических аппаратов и их массы. Вместе с тем на рынок космической продукции в качестве заказчиков выходят уже не только развитые страны, но и крупные корпорации, развивающиеся страны [1]. Согласно аналитике, на период 2010—2020 гг. (т.е. на настоящее время) приходится наиболее полная реализация возможностей микроспутников. Очевидно, что для указан-

ного класса спутников необходимы соответствующие двигательные установки [2]. В опытно-конструкторском бюро (ОКБ) «Факел» минимальным серийным типоразмером двигателя является стационарный плазменный двигатель СПД-50; этот двигатель, как и опытный образец Plas-40, имеет рабочую точку 1,2 А, и это значение связано с ограниченной возможностью катода работать при малых токах. Дальнейшее расширение линейки ти-

поразмеров двигателей в сторону снижения потребляемой мощности, возможно, позволило бы найти новых партнёров среди компаний — разработчиков микроспутников.

С другой стороны, в настоящее время в России ведётся разработка ионного двигателя. Известно, что для работы такого двигателя требуется катод-нейтрализатор, работающий с малым расходом и малым током $\sim 0,9 \dots 1$ А. Наличие хотя бы опытного образца такого катода в заделе позволило бы предлагать такой катод разработчику двигателя.

В связи с вышесказанным, становится очевидной необходимость создания слаботокового катода в ОКБ «Факел», и эта задача решается различными путями начиная с 2013 г.

1. КВДО с термоэммиттером из LaB6

В линейке катодов для стационарных плазменных двигателей разработки ОКБ «Факел» минимальный ток способен выдать катод КЭ-1, значение этого тока — 1 А. В 2013 г. на основе КЭ-1 был создан КВДО с улучшенной тепловой схемой, которая обеспечила функционирование катода при токе разряда до 0,6 А.

Усовершенствование тепловой схемы заключается в установке теплового экрана непосредственно на термоэммиттер (рис. 1) [3]. Это наиболее эффективный вариант работы теплового экрана,

так как он расположен максимально близко к излучающей поверхности. Кроме своей основной функции, экран позволяет повысить надёжность катода. В конструкции применены и другие конструктивные решения, цель которых — повысить надёжность запуска, механическую прочность, а также уменьшить габариты катода.

Эффективность конструктивных решений, реализованных в КВДО, подтверждается не только снижением минимального рабочего тока, но и незначительным снижением напряжения $U_{кз}$ (рис. 2), характеризующим потери в прикатодной области разряда, а значит, техническое совершенство катода [4].

В настоящее время работы с конструкцией КВДО продолжаются — это верификация тепловой модели и усовершенствование тепловой схемы катода. К сожалению, работы с катодом показали ограниченность выбранного пути модернизации: незначительные изменения в конструкции, ухудшающие тепловую схему (прорезка окна в наружном экране, установка термопар), негативно сказываются на стабильности запуска катода и его работы на малых токах.

По грубым оценкам, тепловыделение в катоде, работающем в авторежиме на токе 0,6 А, составляет 8...10 Вт, что при рабочих температурах 1400...1800 °С сопоставимо с погрешностью тепло-

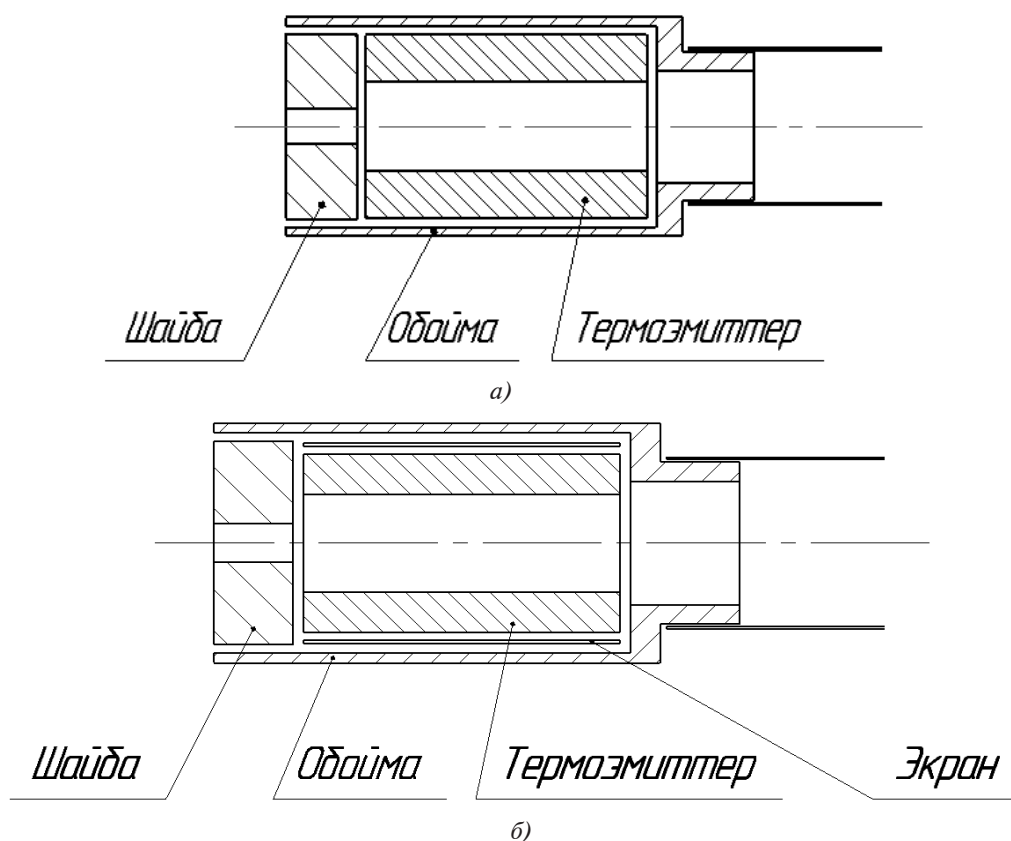


Рис. 1. Конструкция «капсулы» штатного катода КЭ-1 (а) и КВДО (б) [3]

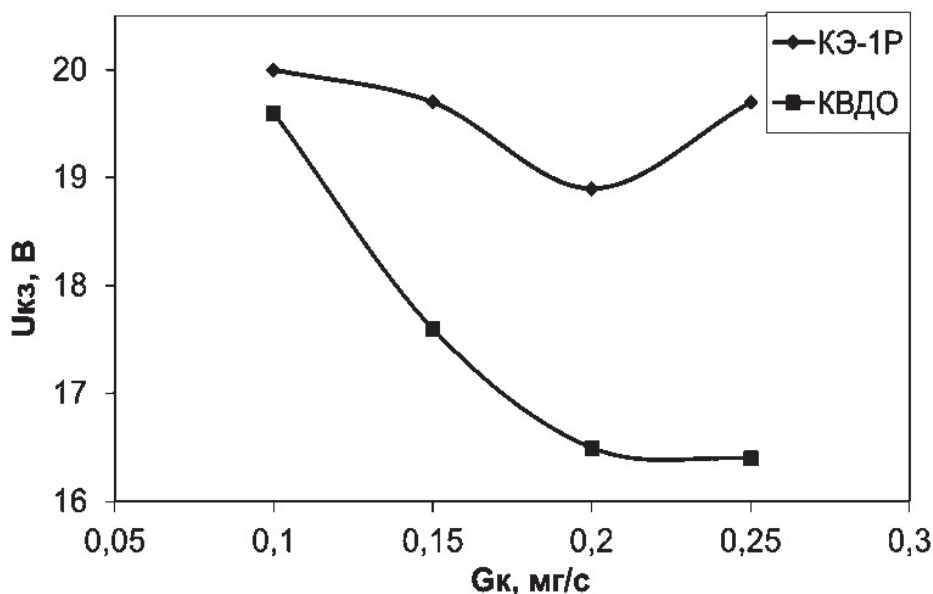


Рис. 2. Сравнение вольт-расходных характеристик катодов КЭ-1Р и КВДО при работе в составе двигателей СПД-50 и СПД-50М соответственно на токе 1,25 А

вых расчётов. Вероятно, КВДО на малых токах не способен поддержать минимальную рабочую температуру эмиттера, и поэтому при малейшем нарушении теплового баланса он гаснет [5]. Стабильность работы катода можно повысить путём дальнейшего улучшения тепловой схемы, а именно:

- уменьшения сечения тепловой развязки капсулы;
- уменьшения диаметра термоэмиттера и, следовательно, площади излучающей поверхности;
- установки в капсулу второго теплового экрана.

В данный момент ведутся работы по первому направлению (отработана технология контактной точечной сварки проставок из фольги толщиной 0,05 мм).

2. Бариевый катод

Все катоды, разработанные в ОКБ «Факел», имеют термоэмиттеры из гексаборида лантана LaB₆, исследований же по альтернативным эмиссионным материалам до сих пор не проводилось. В то же время за рубежом исследование новых эмиссионных материалов ведётся уже на протяжении многих лет, и большое количество информации о составах и функционировании таких эмиттеров имеется в открытой печати [6–9].

Каждый эмиссионный материал имеет свою работу выхода. Для поддержания теплового баланса катода необходимо определённое тепловыделение. Чем меньше работа выхода, тем ниже рабо-

чая температура. Так, например, LaB₆ имеет работу выхода ~ 2,7 эВ и функционирует при температуре не ниже 1400 °С. Так называемые «бариевые» катоды имеют работу выхода ~ 2,2 эВ и имеют рабочую температуру около 1000 °С. Естественно, чем ниже температура эмиттера, тем меньше потери и требуемая мощность стартового нагревателя [10].

Бариевый эмиттер представляет собой спеченную пористую вольфрамовую матрицу, в порах которой содержится смесь активных компонентов: оксида бария, кальция, алюминия и др. С одной стороны, эти вещества в исходном состоянии имеют низкую работу выхода, с другой – разлагаясь на отдельные компоненты при нагреве до высоких температур, они обеспечивают снижение работы выхода материала матрицы. Указанный тип термоэмиттеров широко и успешно применяется за рубежом [6–9], а также в СВЧ-технике и вакуумных лампах в России. Наиболее показательным примером являются катоды NSTAR, которые отработали в составе ионного двигателя более 16000 часов в космосе [6], а их аналоги более – 30000 часов на стенде, причём испытания были остановлены не по причине выхода из строя термоэмиттеров. Катоды такого же типа были установлены в плазменный контактор Международной космической станции [11].

В 2013 г. в ОКБ «Факел» была начата работа по отработке технологии изготовления бариевых термоэмиттеров. Несмотря на огромное число литературных источников, описывающих приме-

нение импрегнированных термоэмиттеров, подробного и полного описания технологии их производства найти не удалось. Технологию производства импрегнированных термоэмиттеров пришлось собирать по фрагментам из различных источников, заполняя недостающие пробелы собственной экспериментальной обработкой.

За основу разрабатываемой технологии была взята схема совместного прессования исходных порошков с последующим спеканием. Указанная схема опирается на явление «спекаемости» мелкодисперсных порошков тугоплавких металлов при значительно меньших температурах, чем температура плавления этих металлов [12–14]. Преимуществами схемы являются относительная простота оборудования и технологического процесса, хорошая наполняемость пор матрицы активным компонентом.

Недостатки схемы (испарение активных компонентов при увеличении температуры выше 1000 °С, окисление зёрен вольфрама, препятствующее их спеканию) носили теоретический характер и на практике либо не были выявлены вообще, либо преодолевались простыми мерами. Спекание производилось в вакууме, температура подбиралась экспериментально из условия обеспечения минимальной температуры, при которой происходит спекание вольфрама. Была выбрана схема термообработки спрессованных заготовок, включающая предварительное обезгаживание, была разработана специальная оснастка, уменьшающая унос активных компонентов, и выработана оптимальная схема прессования, позволяющая получить однородный материал.

Для определения требуемого качества исходных материалов (чистота, дисперсность) был проанализирован ряд литературных источников, наиболее полная информация содержалась в [15–18].

Работа выхода электрона с поверхности как оксидного, так и импрегнированного эмиттера зависит от наличия монослоёв химических элементов на этой поверхности [16]. Основными системами, уменьшающими работу выхода импрегнированного эмиттера, являются: «слой оксида бария на вольфраме», «слой чистого бария на вольфраме», «слой чистого бария на оксиде бария». Оксиды алюминия и кальция способствуют транспортировке бария к поверхности, снижают температуру спекания губки и также способствуют уменьшению работы выхода электронов с рабочей поверхности эмиттера. Наличие других примесей, как показано на рис. 3, приводит к увеличению работы выхода.

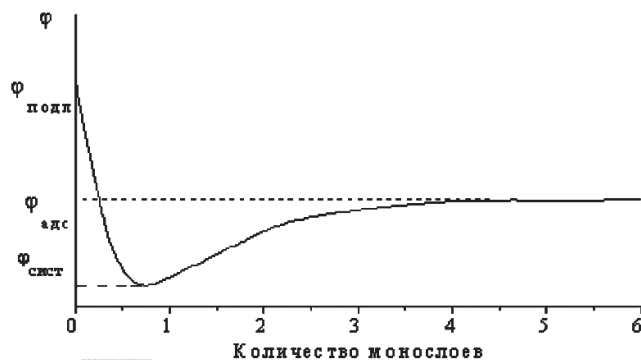


Рис. 3. Вид зависимости работы выхода электронов от количества адсорбированных монослоёв примесей: $\Phi_{\text{сист}}$ — работа выхода системы «оксид бария на вольфраме»; $\Phi_{\text{подл}}$ — работа выхода подложки; $\Phi_{\text{адс}}$ — работа выхода адсорбированных примесей

Была разработана конструкция бариевого термоэмиттера, представляющая собой цилиндр диаметром 3 мм, длиной 7 мм со сквозным осевым отверстием диаметром 0,8...1 мм (рис. 4). При таком варианте конструкции исключаются некоторые низкопроизводительные технологические процессы. Термоэмиттер предполагалось изготавливать токарной обработкой из предварительно спечённой заготовки.

Для получения заготовки была разработана и изготовлена специальная оснастка (рис. 5). Идея

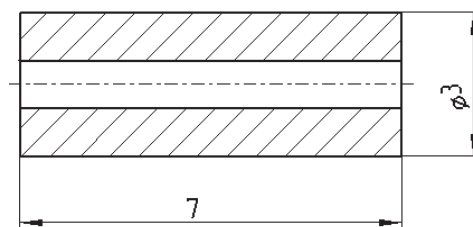


Рис. 4. Эскиз импрегнированного бариевого эмиттера

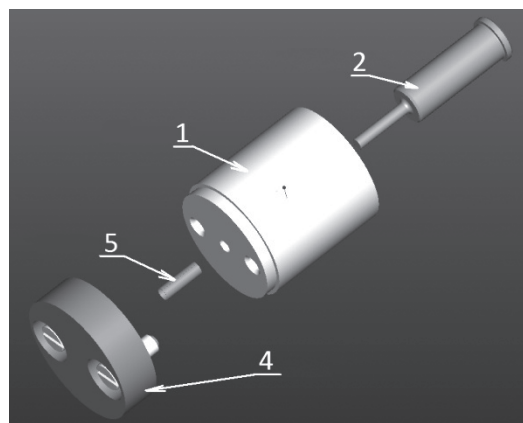


Рис. 5. Модель оснастки для прессования термоэмиттеров: 1 — матрица; 2 — пуансон; 4 — поддон; 5 — втулки

оснастки заключалась в том, чтобы запрессовать порошок в молибденовую втулку, которая механически удерживала бы порошок до спекания и служила экраном, уменьшающим испарение бария, и геттером, поглощающим газы, выделяющиеся при разложении оксидов из состава пропитки.

Для испытаний полученных образцов эмиттеров была разработана конструкция «узла катодного» катода типа КН-3Б, незначительно отличающаяся от штатного катодного узла и обеспечивающая при этом возможность быстрой замены термоэмиттера. Катоду на основе описанного «узла катодного» присвоено наименование КН-3БЭИ.

Основной проблемой при создании технологии стал подбор времени и температуры спекания заготовки. С целью экспериментального подбора оптимальной температуры были определены границы диапазона, в котором она находится – 1000...1800 °С, а затем методом половинного деления определено оптимальное значение температуры с точностью 25 °С. В качестве критериев оптимальности были взяты эксплуатационные характеристики и механическая прочность заготовок. Для подбора температуры были выполнены четыре итерации, в ходе которых отрабатывались также другие нюансы (схема прессования, время обезгаживания, время спекания).

В итоге были получены работоспособные образцы бариевых термоэмиттеров (рис. 6), показавшие отличные результаты по сравнению с гексаборид-лантановыми термоэмиттерами (табл. 1). Имея аналогичную конструкцию, катод с бариевым термоэмиттером запускался при меньшей стартовой мощности, работая даже с меньшим

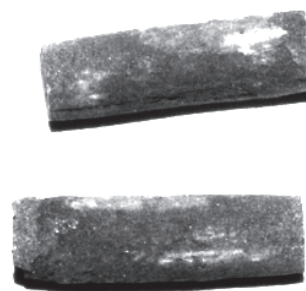


Рис. 6. Общий вид образцов после спекания и извлечения из втулок

расходом. При этом катод имел более низкий параметр $U_{кз}$ (рис. 7) и более широкий диапазон рабочих токов (до 0,25 А). Достигнуть столь низкого тока в указанной конструктивной схеме при применении гексаборид-лантанового термоэмиттера невозможно.

Кроме того, была проверена стабильность запусков катода с бариевым термоэмиттером. При мощности накала 53,5 Вт десять из одиннадцати запусков произошли раньше 160-й секунды, что соответствует требованиям к катоду электрического ракетного двигателя (ЭРД), предъявляемым в ОКБ «Факел». Тенденции к увеличению времени запуска выявлено не было [19].

Работая в слаботочном режиме, бариевый термоэмиттер способен обеспечить ресурс 1000 ч – достаточный для двигателей малого типоразмера. Из литературных источников известно, что используемый материал имеет склонность к отравлению кислородом атмосферы при хранении и примесями в рабочем теле при работе [20]. Особых мер при хранении опытных образцов термоэмит-

Таблица 1

Параметры катода КН-3Б и аналогичного катода с бариевым термоэмиттером

Наименование параметра	КН-3Б	КН-3БЭИ
Расход рабочего тела, мг/с	0,45	0,32
Ток разряда, А	4,5	4,5
Напряжение разряда, В	25,3...25,6	24,4...25,1
Напряжение поджигного электрода, В	3,01...3,65	~3,2 (образец 1)
Напряжение «зонд—земля», В	14...14,1	18,4...18,8
$U_p-U_{зз}$, В	11,3...11,5	6...6,3
Ток накала, А	12,3	9,5
Мощность нагрева, Вт	93	46
Время запуска, с	~160	~160

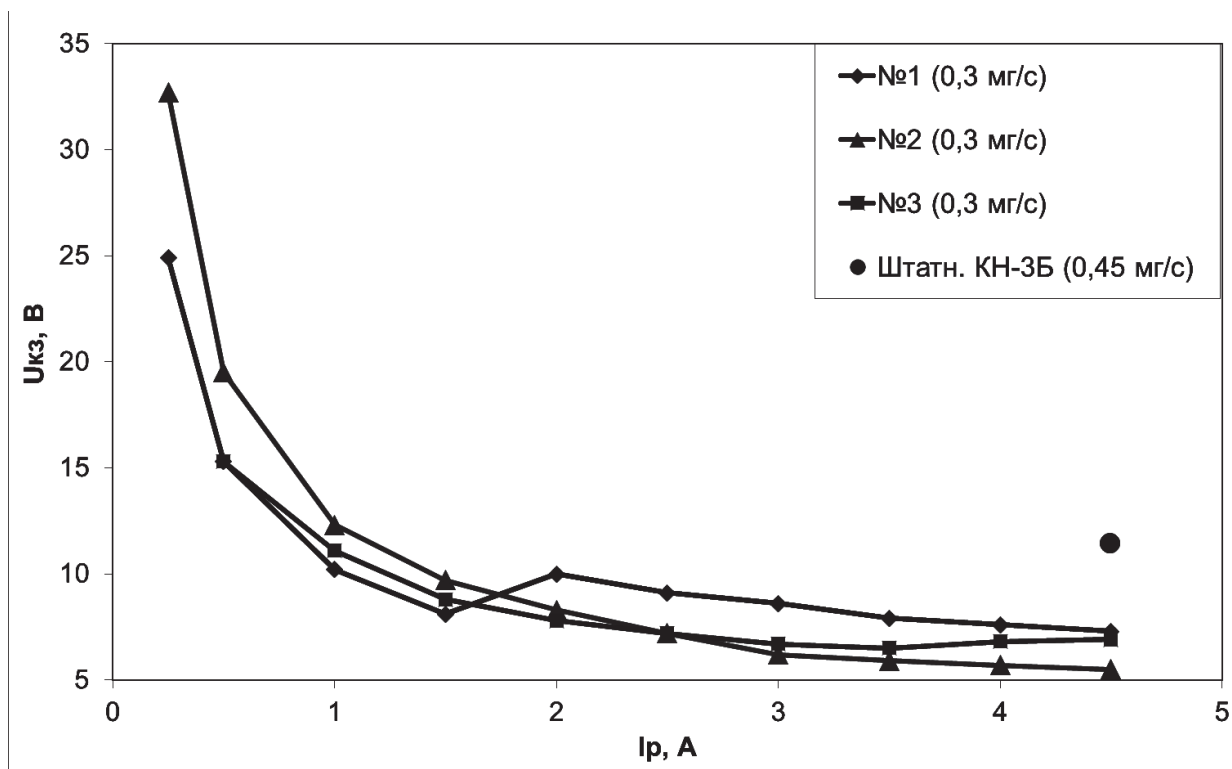


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики образцов термоэммиттеров, спечённых при различных температурах, и рабочая точка катода КН-3Б

теров в процессе работы не принималось, что на практике не повлияло на работу катода. С целью обеспечения гарантий надёжности, для устранения явления «отравляемости» в состав смеси активных компонентов достаточно ввести оксид скандия. Обладая сравнимыми с оксидом бария эмиссионными свойствами, оксид скандия образует на поверхности катода плёнку, снижающую унос бария и препятствующую отравлению катода кислородом.

Выводы

Для решения актуальной для ОКБ «Факел» задачи создания катода, способного работать с малым расходом на малых токах разряда, ведётся поиск мер, подразумевающих как изменения конструкции, так и разработку и внедрение новых для предприятия технологий. Оба пути ведут к одной цели и при совмещении опыта, полученного на каждом из них, обеспечат максимальный результат. Исходя из этого формируется облик максимально эффективного слаботочного катода — это конструктивная схема КВДО с новым скандатно-бариевым термоэммиттером. Такой катод планируется создать в ОКБ «Факел» в ближайшем будущем, для этого было сделано следующее:

1) благодаря совершенствованию тепловой схемы в КВДО с эммиттером из LaB6 удалось снизить разрядный ток до 0,6 А;

2) освоена технология изготовления экспериментальных образцов перспективных, более эффективных бариевых катодов.

Прежде чем объединить оба направления по снижению рабочего тока применительно к одной конструкции, нужно сделать следующие шаги:

1) доработать конструктивную схему КВДО — внести в конструкцию более эффективную тепловую развязку путем уменьшения ее сечения и увеличения длины при уменьшении габаритов геттерного узла;

2) начать работы по освоению технологии скандатно-бариевых термоэммиттеров, которые имеют более низкую рабочую температуру и являются более стойкими к окислению.

Библиографический список

- Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 12-27.
- Ткачук А.В., Козубский К.Н., Румянцев А.В. Двигательная установка с плазменными двигателями для космических микроаппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 49-54.
- Гопанчук В.В., Горбачев Ю.М. Плазменный катод. Патент RU 2502238 С2. Бюл. №35, 20.12.2013.
- Ким В.П., Меркурьев Д.В., Сидоренко Е.К. Исследование параметров плазмы и радиальных потоков

- ионов вблизи выходной плоскости стационарного плазменного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 95-103.
5. Чубов П.Н., Саевец П.А., Румянцев А.В. Тепловой расчет стационарного плазменного двигателя СПД-50 // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 70-79.
 6. Sengupta A. Destructive Physical Analysis of Hollow Cathodes from the Deep Space 1 Flight Spare Ion Engine 30,000 Hr Life Test // 29th International Electric Propulsion Conference IEPC-2005 (Princeton University, New Jersey, October 31 — November 4, 2005). URI: <http://hdl.handle.net/2014/39521>
 7. Albarède L., Lago V., Lasgorceix P., Dudeck M., Bugrova A.I., Malik K. Interaction of a hollow cathode stream with a hall thruster. — Orlean: Laboratoire d'Aérothermique, 2005. — 18 p.
 8. Пильников А.В. Некоторые проблемные вопросы создания в России электроракетной двигательной установки большой мощности // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 97-103.
 9. Лоян А.В., Кошелев Н.Н., Солонинко Е.П., Агеева Е.Г. Предварительные испытания W-Va-Sc эмиттеров катодов ЭРД // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 8(75). С. 68-72.
 10. Семенихин С.А., Сысоев Д.В., Тихонов В.Б. Экспериментальное исследование влияния присадки бария на работу магнитоплазменного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т. 14. № 1. С. 20-29.
 11. Штырлин А.Ф. Нейтрализация пучка заряженных частиц коллоидного электроракетного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 1. С. 54-59.
 12. Стрелецкий А.Н., Портной В.К., Леонов А.В., Борунова А.Б., Пшеченков П.Ф., Лейпунский И.О., Берёзкина Н.Г., Бутягин П.Ю. Механохимическая активация и спекание вольфрама и его смесей с медью и никелем // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 1-2. С. 245-254.
 13. Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Баранов Г.В., Москвичева А.В., Лопатин Ю.Г., Котков Д.Н., Благовещенский Ю.В., Козлова Н.А., Шотин С.В., Коньчев Д.А., Пискунов А.В. Исследование структуры и механических свойств нано- и ультрадисперсных механоактивированных вольфрамовых псевдосплавов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 2-1. С. 47-59.
 14. Эспе В. Технология электровакуумных материалов: Пер. с нем. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. — Т. 1. — 632 с.
 15. Никонов Б.П. Оксидный катод. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.
 16. Светцов В.И. Вакуумная и плазменная электроника: Учебное пособие. — Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2003. — 172 с.
 17. Калинин М.В., Копылов В.В., Лучин А.А., Михайлова Н.М. Способ изготовления импрегнированного катода. Патент RU 2 278 438 С1. Бюл. № 17, 20.06.2006.
 18. Копылов В.В., Лучин А.А., Михайлова Н.М. Способ изготовления импрегнированного катода. Патент RU 2340035 С2. Бюл. № 33, 27.11.2008.
 19. Ермошкин Ю.М., Галайко В.Н., Ким В.П., Кочев Ю.В., Меркурьев Д.В., Остапущенко А.А., Попов Г.А., Смирнов П.Г., Шилов Е.А., Якимов Е.Н. Особенности переходных процессов в разрядной цепи при запуске стационарного плазменного двигателя СПД-140Д // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 80-88.
 20. Гнздор Р.Ю., Митрофанова О.А., Румянцев А.В. Исследование влияния магнитного поля стационарного плазменного двигателя на разность потенциалов между катодом и «землей» // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 47-52.

LOW-CURRENT CATHODE DESIGNING FOR SMALL STATIONARY PLASMA THRUSTER

Parakhin G.A.^{1*}, Rumyantsev A.V.^{2**}, Pankov B.B.^{1***}, Katashova M.I.^{1****}

¹ Experimental Design Bureau "Fakel",
181, Moskovsky av., Kaliningrad, 236001, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University,
IKBFU, 14, A. Nevskogo str., Kaliningrad, 236041, Russia

* e-mail: parahin@fakel-russia.com

** e-mail: albert37@list.ru

*** e-mail: boris.pankoff@yandex.ru

**** e-mail: katashova@fakel-russia.com

Abstract

At present, the interest of spacecraft producers to low-power electric propulsions and propulsion installations on their basis is growing. The above mentioned fact imparts topicality to the task of expanding the family of cathodes for such thrusters towards decreasing discharge current maintained by the cathode.

It is well known, that effective cathode of the electric propulsion does not require any additional heat source in a steady-state operation, and thermoemitter operating temperature maintaining is ensured by the ion current on its surface. This article describes two complementary trends of works aimed at such cathode designing.

The first trend consists in the cathode thermal scheme optimization and thermal losses reduction. Some of design solutions, related to this field of work, were employed in the cathode experimental design and demonstrated their efficiency. On the other hand, the optimized design appeared to be sensitive to the smallest changes in the thermal scheme and, thus, needed a retrofit.

The second trend is a development and application of new thermal emissive materials with a lower operating temperature. The article presents the results of the works which have been in progress with some intermittences since 2013. The article demonstrates the results of Barium oxide-based thermoemitter samples developed and tested at EDB Fakel. The issues of thermoemitter manufacturing procedure; raw materials (powders) purity and dispersity; sintering temperature, and tool set, developed in the course of the works, are tackled.

As the result of handling of work, the authors came to a conclusion that for a higher efficiency of the new cathode design being developed it is necessary to consolidate the results of works in both trends. Further

additional measures for the design optimization are planned.

Keywords: low-current cathode, thermal screen, impregnated cathode, thermoemission, thermal scheme.

References

1. Makridenko L.A., Boyarchuk K.A. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIEM*, 2005, vol. 102, pp. 12-27.
2. Tkachuk A.V., Kozubski K.N., Rumyantsev A.V. Propulsion system with stationary plasma thrusters aboard small spacecraft. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 49-54.
3. Gorbachev Yu.M., Gopanchuk V.V. *Patent 2502238 C2*, 20.12.2013.
4. Kim V.P., Merkur'ev D.V., Sidorenko E.K. Investigation of plasma and radial ion flow parameters in the vicinity of the SPT exit plane. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 95-103.
5. Chubov P.N., Saevets P.A., Rumyantsev A.V. Thermal calculation of the SPT-50 stationary plasma thruster. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 70-79.
6. Sengupta A. Destructive Physical Analysis of Hollow Cathodes from the Deep Space 1 Flight Spare Ion Engine 30,000 Hr Life Test. *29th International Electric Propulsion Conference IEPC-2005* (Princeton University, New Jersey, October 31 - November 4 2005). URL: <http://hdl.handle.net/2014/39521>
7. Albarède L., Lago V., Lasgorceix P., Dudeck M., Bugrova A.I., Malik K. *Interaction of a hollow cathode stream with a hall thruster*. Orlean, Laboratoire d'Aérothermique, 2005, 18 p.
8. Pil'nikov A. V. Certain problem questions of high-power electric rocket propulsion system creation in Russia. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 97-103.
9. Loyan A.V., Koshelev N.N., Soloninko E.P., Ageeva E.G. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 8(75), pp. 68-72.

10. Semenikhin S.A., Sysoyev D.V., Tikhonov V.B. Experimental investigation of barium additive influence on functioning of magnetoplasma thrusters. *Aerospace MAI Journal*, 2007, vol. 14, no. 1, pp. 20-29.
11. Shtyrlin A.F. Neutralizing of colloidal electrorocket thruster charged particles beam. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 54-59.
12. Streletskii A.N., Portnoi V.K., Leonov A.V., Borunova A.B., Pshechenkov P.F., Leipunskii I.O., Berezkina N.G., Butyagin P.Yu. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 1-2, pp. 245-254.
13. Chuvil'deev V.N., Nokhrin A.V., Baranov G.V., Moskvicheva A.V., Lopatin Yu.G., Kotkov D.N., Blagoveshchenskii Yu.V., Kozlova N.A., Shotin S.V., Konychev D.A., Piskunov A.V. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2010, no. 2-1, pp. 47-59.
14. Espe W. *Werfestofitamde der Hochvakuumtedinik*. Band 1, Metalle und metallisch leitende Werbsioffe, VEB Deutscher Verlag der Wissen- schaften, Berlin, 1959.
15. Nikonov B.P. *Oksidnyi katod* (Oxide cathode), Moscow, Energiya, 1979, 240 p.
16. Svettsov V.I. *Vakuumnaya i plazmennaya elektronika* (Vacuum and plasma electronics), Ivanovo, Ivanovskii gosudarstvennyi khimiko-tekhnologicheskii universitet, 2003, 172 p.
17. Kalinin M.V., Kopylov V.V., Luchin A.A., Mikhailova N.M. *Patent RU 2 278 438 C1*, 20.06.2006.
18. Kopylov V.V., Luchin A.A., Mikhailova N.M. *Patent RU 2340035 C2*, 27.11.2008.
19. Ermoshkin Yu.M., Galaiko V.N., Kim V.P., Kochev Yu.V., Merkur'ev D.V., Ostapushenko A.A., Popov G.A., Smirnov P.G., Shilov E.A., Yakimov E.N. Specifics of transients in the discharge circuit during the SPT-140D plasma engine starting. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 80-88.
20. Gnizdor R.Yu., Mitrofanova O.A., Rumyantsev A.V. Investigation an influence of SPT magnetic field on efficiency of cathode-compensator operation. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 47-52.