

УДК 629.78

А.В. ХИТЬКО, Н.В. МАСЛЯНЫЙ*Днепропетровский национальный университет им. Олесья Гончара, Украина***ПОЛЫЕ КАТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ СХЕМЫ**

Впервые определены условия и реализована параллельная работа нескольких катодов на один анод, что позволило разработать камеру ионизации плазменного ионного двигателя (ПИД) с восьмикатодным узлом и повысить однородность плазмы перед ионно-оптической системой до 98%. Разработана теория скачка потенциала в отверстии полого катода (ПК), которая позволила предложить новые конструкции ПК для ПИД с радиальным магнитным полем и снизить цену иона до 120 Вт/А. Впервые предложен и разработан катод с внутренним вспомогательным разрядом, который позволил снизить давление в полости и расход рабочего вещества на три порядка и обеспечить устойчивую работу ПК в миллиамперном диапазоне. Впервые предложено и реализована работа ПК на солях щелочных металлов (ЩМ), которые стабильны в атмосферных условиях и при рабочих температурах ПК обеспечивают постоянный расход ЩМ. Это позволило решить проблему хранения ЩМ в наземных условиях. Впервые разработан ПК на солях ЩМ с внешней подачей газа, который позволил увеличить тягу двигателя М 70 на 10%, за счет снижения напряжения связи с пучком на 15 В.

Ключевые слова: *полюй катод, космический аппарат, электрический ракетный двигатель, соли щелочных металлов.*

Введение

Одним из способов увеличения срока эксплуатации современных космические аппараты (КА) является оснащение их электроракетными двигателями (ЭРД) с большим ресурсом, удельным импульсом и малым расходом рабочего тела, а, следовательно, высокой экономичностью. Традиционно КА оснащаются ЭРД для задач коррекции орбиты в направлениях север–юг и запад–восток, изменения высоты и наклона орбиты, перевода с низких на высокие (до геостационарных) орбиты, а также осуществления межпланетных перелетов [1].

Активные исследования ЭРД начаты в России и на Украине около 40 лет назад усилиями многих организаций. За это время изучены практически все известные типы электроракетных двигателей в широком диапазоне потребляемой мощности – электронагревные, дуговые, импульсные плазменные, магнитоплазодинамические, холловские с замкнутым дрейфом электронов (стационарные плазменные ЭРД и двигатели с анодным слоем) и ионные двигатели [2].

В большинстве типов ЭРД для получения плазмы и нейтрализации пучка ускоренных ионов используют катод. Именно катоды в большинстве определяют ресурс, время и число запусков, надежность и эксплуатационные характеристики, и значительно влияют на газовую и энергетическую эконо-

мичность ЭРД. Среди применяемых типов катодов наиболее перспективными являются газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды (ГПВК), относящиеся к классу плазменных эмиттеров электронов [3].

Они построены по следующей схеме:

- катод это тонкостенная трубка с диафрагмой на торце;
- подача плазмообразующего газа производится через полость катода;
- в полости помещают контейнер с активирующим веществом для улучшения эмиссионных свойств поверхности за счет снижения работы выхода электронов;
- при работе на щелочных металлах активатор не используют, т.к. пленка щелочного металла сама активирует поверхность;
- для запуска катода используют стартовый нагреватель и электрод поджига.

Описанная схема построения катода является классической. Однако не все требований к ЭРД в настоящее время могут быть выполнены при использовании катода классической схемы.

Например:

- в камере ионизации плазменного ионного двигателя (ПИД) с осевым расходящимся магнитным полем не удается получить равномерный профиль плазмы перед ионно-оптической системой из-за центрального расположения катода, который является точечным источником электронов;

– в ПИД с радиальным магнитным полем расположение катода в полости центрально магнитопровода приводит к неоправданному росту разрядного напряжения и цены иона в камере ионизации (КИ);

– использование одного катода на срезе двигателя для нейтрализации заряда ионного пучка приводит к перекосу вектора тяги;

– катод классической схемы не может обеспечить токи миллиамперного диапазона, которые необходимы для нейтрализации пучков ПИД с диаметром меньшим 0,1 метра;

– при использовании в качестве рабочего тела катода щелочных металлов не решена задача надежного хранения, т.к. они обладают высокой активностью и мгновенно окисляются на воздухе;

– катод классической схемы не позволяет получить высокую газовую эффективность, т.к. 10% расхода рабочего тела необходимо для его работы, что существенно снижает удельный импульс двигателя.

Целью данной статьи является анализ вариантов изменения классической схемы для повышения эффективности работы ЭРД различных типов.

Решение поставленной задачи

Наилучшие характеристики в области удельных импульсов выше 30000 м/с и К.П.Д. выше 70% имеет ПИД. С целью выравнивания концентрации плазмы в поперечном сечении КИ ПИД с осевым расходящимся магнитным полем пучка возникла необходимость в рассредоточении потока электронов. В связи с этим возникла проблема работы нескольких катодов на один анод [4].

В ДНУ впервые определены условия и реализована параллельная работа нескольких катодов на один анод. Конструкция такого узла представляет восемь катодов, равномерно расположенных по окружности, связаны между собой полостью, через которую осуществляется подача рабочего тела. Нагреватель для всех катодов общий и расположен по периметру катодного узла. Каждый из полых катодов представляет собой трубку, закрытую крышкой. Рабочее тело (цезий) подводится в полость катодного узла. Поджиг разряда осуществлялся при разности потенциалов между катодом и анодом $U_p = 40$ В. При этом разряд загорался одновременно на всех катодах.

Вид вольтамперной характеристики (ВАХ) разряда с многокатодным узлом качественно совпадает с ВАХ одного катода и имеет режим насыщения тока. Снижение разрядного тока до значений, сопровождалось постепенным погасанием части катодов. При минимальных значениях тока разряда

наблюдался режим, когда из восьми катодов работал только один. Увеличение напряжения разряда с одним катодом в режиме насыщения тока разряда приводит к поджигу еще одного катода расположенного рядом с работающим. При этом величина разрядного тока увеличилась вдвое, а напряжение разряда уменьшилось. Аналогичным образом протекал процесс включения остальных катодов. Приращение тока разряда при поджиге очередного катода оставалось постоянным и равным току эмиссии с единичного катода.

С целью обеспечения равномерной нагрузки на катодный узел в целом, т.е. достижения условий, когда разряд горит на всех катодах одновременно, величина тока разряда должна быть больше либо равна суммарному току эмиссии всех катодов. Использование восьмикатодного узла позволило повысить однородность плазмы перед ионно-оптической системой до 98%;

Знание условий при которых возможна параллельная работа нескольких катодов на один анод позволила предложить и реализовать новую схему катода нейтрализатора ЭРД. Использование одного катода приводит к перекосу вектора тяги двигателя. Катод нейтрализатора неклассической схемы представляет собой трубку в виде кольца, которая обхватывает пучок ионов по внешней границе. Через полость трубки подается рабочее тело, в ней выполнены отверстия для экстракции электронов, на внешней поверхности расположен стартовый нагреватель. Кольцевой нейтрализатор был изготовлен и испытан в составе ПИД-200.

Многокатодный узел также был реализован в ПИД с радиальным магнитным полем. Зондовые измерения параметров плазмы в области отверстий в центральном магнитопроводе показали, что на границе между плазмой в полости и плазмой в камере ионизации существует скачок потенциала. Его величина при работе на цезии составляет 10-15 В. Это приводит к росту напряжения горения разряда и цены иона в КИ.

Была предложена и реализована неклассическая схема катода КИ, который представлял собой тор с отверстиями на боковой поверхности. Рабочее тело подавалось через полость тора, стартовый нагреватель расположен на торце. Катод из полости был перемещен к отверстию в центральном магнитопроводе. Таким образом плазмы в нем не было. Это привело к тому, что скачок потенциала исчез напряжение разряда уменьшилось и цена иона снизилась до 120 Вт/А.

При разработке источника ионов для международного эксперимента "Дион" проекта "Фобос" возникла задача создания катода-компенсатора на ток 20мА. Анализ параметров накальных катодов показал,

что они удовлетворяют требованиям по энергетическим затратам, но имеют недостаточный ресурс и невысокую надежность, т.к. высокая температура, вызывает большую эрозию катодного материала.

Для расходных диафрагмированных полых катодов существует минимальное давление в полости (~ 1 Тор), начиная с которого реализуется эффект полого катода. Соответствующее значение эмиссионного тока, определяемое концентрацией плазмы в полости, является минимально возможным. Для традиционных катодов эта величина составляет примерно 200 мА и на порядок превышает требуемый ток компенсатора. При этом работа катода у порога зажигания дуги неустойчива и возможен срыв рабочего режима.

С целью снижения величины минимального эмиссионного тока и обеспечения устойчивой работы в полости катода организован вспомогательный внутренний разряд, обеспечивающий существование плазмы при более низких давлениях. Эмиссия электронов в этом случае осуществляется с поверхности внутреннего плазменного образования под действием напряжения, приложенного между катодом и анодом. Снижение давления в полости катода и соответствующее ему снижение расхода позволило уменьшить необходимый запас рабочего тела и перейти к ампульной конструкции катода [5].

Ампульный катод-компенсатор состоит из внутреннего и наружного стаканов-электродов. Между электродами имеется кольцевой зазор, в котором установлен изолированный стартовый нагреватель, подсоединенный своими выводами к электродам. В наружном электроде выполнено отверстие для экстракции электронов из полости катода. Таблетка рабочего тела помещена в полости внутренне-го электрода.

Использование чистого щелочного металла затруднено, т.к. он активно взаимодействует с кислородом и влагой воздуха и требует проведения мероприятий по герметизации.

Анализ параметров ампульных катодов показал, что в качестве рабочих тел необходимо использовать соединения щелочных металлов, которые химически пассивны к атмосфере воздуха, а температура их разложения не превышает эмиссионную температуру катода и имеет стабильный расход щелочного металла при разложении.

Исследование карбоната цезия показало, что температура разложения лежит в интервале 450 – 550° С, при этом стабильность токовых характеристик составляет 15 – 20%.

Исследование алюмината цезия показало, что температура разложения лежит в интервале 550 – 650° С, при этом стабильность токовых характеристик составляет 5 – 10%.

Таким образом, в качестве рабочих тел малорасходных полых катодов необходимо использовать карбонаты щелочных металлов, тогда уровень потребляемой мощности ограничен, а требования к стабильности не строгие (до 20%).

При повышенных требованиях к стабильности и отсутствии ограничений по уровню потребляемой мощности необходимо использовать алюминаты щелочных металлов.

Для ЭРД расход через катод обычно составляет до 10% от основного расхода через двигатель, что приводит к снижению удельного импульса. Ввиду этого естественным является стремление разработчиков к снижению расхода через катод и повышению его газовой эффективности.

Снижение расхода для диафрагмированного полого катода приводит к снижению разрядного тока, но при предельных граничных значениях расхода разряд гаснет, двигатель не работает. Следовательно, проблема обеспечения работы катода и двигателя при снижении расхода рабочего тела через катод и малых уровнях токов (меньших 0,5-0,8 А), актуальна и требует оригинальных решений на основе новых подходов к организации плазменного катода.

Внутренний разряд позволяет обеспечить устойчивую работу катода при давлениях меньших 1 Торр на три порядка и снизить расход до 10^4 - 10^2 мг/с. Для создания в межэлектродном зазоре квазинейтральной плазмы, обеспечивающей прохождение тока необходимой плотности, можно использовать дополнительную подачу газа не через полость катода, а извне – газовый катод с внешней подачей.

Экспериментально установлено, что увеличение расхода щелочного металла для газового катода с внешней подачей рабочего тела приводит к существенному снижению катодного скачка потенциала и как следствие напряжения горения разряда. Также известно что, аналогичным образом влияет на напряжение разряда и изменение величины основного расхода газа, с ростом расхода напряжение падает. Расход активатора, в нашем случае щелочного металла, на четыре-пять порядков меньше расхода основного плазмообразующего газа. Поэтому можно существенно увеличить газовую эффективность катода, построив его по схеме с внешней подачей и при этом изменив соотношение между расходом активатора и плазмообразующего газа

Заключение

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что:

– впервые определены условия и реализована параллельная работа нескольких катодов на один анод ;

- впервые предложен и разработан катод с внутренним вспомогательным разрядом;
- впервые предложено и реализована работа ПК на солях ЩМ;
- впервые разработан ПК на солях ЩМ с внешней подачей газа.

Литература

1. Козлов, Н.П. Плазменные ускорители и ионные инжекторы. [Текст] / Н.П.Козлов. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
2. Overview of Russian activities in electric propulsion / O.A. Gorshkov, A.S. Koroteev, V.M. Murashko

et.al. // 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. – AIAA-2001-3229. – V.4., No. 2. – P. 59 – 68.

3. Архипов, Б.А Опыт создания полых высокоэмиссионных катодов. [Текст] / Б.А. Архипов, В.М. Мурашко, А.И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология. – 1999. – №.10. – С. 360 – 363.

4. Хитко, А.В. Работа газоразрядной камеры источника ионов с многокатодным узлом [Текст] / А.В. Хитко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 181 – 183.

5. Хитко, А.В. Ампульный источник плазмы [Текст] / А.В. Хитко // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 6. – С. 101 – 105.

Поступила в редакцию 30.05.2012.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.М. Дронь, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск.

ПОРОЖНИСТІ КАТОДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ НЕКЛАСИЧНОЇ СХЕМИ

А.В. Хитко, М.В. Масляний

Вперше встановлені умови і здійснена паралельна праця декількох катодів на один анод, це дозволило розробити камеру іонізації іонного плазмового двигуна (ПД) з восьмикатодним вузлом і підвищити однорідність плазми перед іонно-оптичною системою до 98%. Розроблена теорія стрибка потенціалу в отворі порожнистого катоду (ПК), яка дозволила запропонувати нові конструкції ПК для ПД з радіальним магнітним полем, що дозволило зменшити ціну іона до 120 Вт/А. Вперше запропоновано і розроблен катод з внутрішнім допоміжним розрядом, який дозволив зменшити тиск в порожнині і витрати робочої речовини на три порядки і забезпечити працю ПК в міліамперному діапазоні. Вперше запропоновано і здійснено працю ПК на солях лужних металів (ЛМ), які стабільні в атмосферних умовах та при робочій температурі ПК забезпечують постійні витрати ЛМ. Це дозволяє вирішити проблему зберігання в наземних умовах. Вперше розроблено ПК на солях ЛМ з зовнішніми витратами газу, який дозволив збільшити тягу двигуна М70 на 10%, завдяки зменшенню напруги зв'язку з пучком на 15 В.

Ключові слова: порожнистий катод, космічний апарат, електроракетний двигун, солі лужних металів.

HOLLOW CATHODES OF ELECTRIC PROPULSION NON-CLASSICAL SCHEMES

A.V. Khitko, N.V. Maslynij

For the first time conditions are determined and parallel activity of several cathodes on one anode that has allowed to develop the ion chamber of ion thruster (IT) with eight-cathode knot is realized and to raise uniformity of plasma before ionic-optical system to 98 %. The theory of jump of potential in an aperture of the hollow cathodes (HC), new designs of the HC for IT with a radial magnetic field is developed and to reduce the price of an ion to 120 W/A. For the first time the cathode with internal discharges which has allowed reducing working pressure in cavities and the expense of working substance on three orders is offered and developed and to supply a HC stable running in milliamper a range. For the first time it is offered and activity HC on salts AM which are stable in atmospheric conditions is realized and at HC operation temperatures supply constant flow AM; it has allowed to solve a problem of storage AM in land conditions. For the first time the personal computer on salts AM with external submission of gas which has allowed increasing engine thrust of M 70 at 10 %, at the expense of a voltage reduction of communication with a bunch for 15 V is developed.

Keywords: hollow cathode, a space vehicle, electric propulsion, solid of alkalain metals.

Хитко Андрей Владимирович – канд. техн. наук, с.н.с., старший научный сотрудник НИИ энергетики Днепропетровского национального университета им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: a.khitko@gmail.com.

Масляний Николай Витальевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателестроения Днепропетровского национального университета им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: a.khitko@gmail.com.