

УДК 629.7.087 : 538.4 : 001.2

**А.В. ХИТЬКО***Днепропетровский национальный университет, Украина***ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТУПЕНИ ПОЛОГО ПЛАЗМЕННОГО КАТОДА**

Приведено обоснование необходимости организации дополнительной ступени полого плазменного катода для ЭРД малой мощности.

**электроракетный двигатель, полый расходный цезиевый катод, работа выхода, внутренний вспомогательный разряд, ионизация, эффект полого катода**

**Введение**

Значительно, до 10...15 лет, увеличилось время функционирования спутников связи, и уменьшилась масса полезной нагрузки за счет миниатюризации электронных приборов. В свою очередь, применение электроракетных двигателей (ЭРД) для задач ориентации и коррекции космических аппаратов (КА) [1] позволило существенно снизить запас рабочего тела, в сравнении с химическими реактивными двигателями.

**1. Формулирование проблемы**

Масса современных спутников лежит в пределах от 100 до 500 кг с потреблением мощности не превышающем нескольких сотен ватт [2]. Основной проблемой создания ЭРД малой мощности является работа с существенно меньшим (50 – 200 Вт) уровнем энергопотребления, чем у существующих образцов (0,5 – 50 кВт) [1, 3] при сохранении высокой эффективности. Очевидно, что эффективность работы двигательного блока существенно зависит от организации работы катода-нейтрализатора. Создание маломощного эффективного катода представляет проблему и требует изменения традиционной схемы построения эмиттера.

**1.1. Общие соотношения.** Диапазон требуемых токов катода-нейтрализатора маломощных ЭРД лежит в пределах от 0,2 до 1 А. Использование тради-

ционных полых катодов с протоком рабочего тела для требуемого диапазона токов затруднено неустойчивой работой, высоким уровнем плазменных колебаний, высоким напряжением связи с ионным пучком [4]. Это вызвано тем, что уменьшение тока катода достигается снижением давления плазмообразующего газа в полости. При этом снижается концентрация плазмы, изменяются параметры, определяющие процесс ионизации, что и приводит к срыву режима работы катода.

Проведем анализ условий при которых реализуется эффект полого катода.

Для эффективной работы полого катода необходимо обеспечить:

- эмиссию электронов с поверхности;
- существование плазмы в полости;
- токоперенос через диафрагму.

Реализацию эффекта полого катода традиционно связывают с условием существования плазмы в полости:

$$P_K \cdot d_K \approx (1...2) \text{ Торр} \cdot \text{см}, \quad (1)$$

где  $P_K$  – давление в полости катода;

$d_K$  – диаметр полости катода.

При этом условии длина свободного пробега первичных электронов до ионизации нейтрала будет меньше радиуса катода. Соотношение (1) подтверждено экспериментально как для открытых [6], так и для диафрагмированных катодов [5].

Минимальная величина тока катода при условии (1) для традиционной геометрии катода ( $d_K - 3...5$  мм) и давлении в полости 1 Торр, диаметре отверстия (0,3...0,5) мм и плотности тока ( $\sim 100$  А/см<sup>2</sup>) составит 0,5 А. Дальнейшее снижение давления в полости катода приводит к погасанию разряда.

Не менее важным для работы катода при малых токах является условие самоподдержания разряда. Ионы, образующиеся в полости катода за счет ионизации рабочего вещества электронным ударом, стремятся попасть на стенки катода. Если плотность газа в полости мала, так что длина свободного пробега иона больше размеров полости, то ионы будут уходить на стенки без столкновений и гибнуть на них. Необходимо обеспечить достаточную плотность газа, при которой уход ионов на стенки будет происходить только за счет диффузии. При этом количество образовавшихся в полости ионов будет больше, чем их уход на стенки катода. Условие самоподдержания работы катода можно представить в виде [5]:

$$\langle \sigma_0 V_e \rangle (n_0 \cdot r_{\text{вн}})^2 \times \frac{m_i \langle \sigma_{i0} V_i \rangle}{e U_0 \chi_i} \geq 1, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – сечение ионизации атомов электронами;

$\sigma_{i0}$  – сечение столкновения ион-нейтрал;

$V_e, V_i$  – скорость электронов, ионов;

$n_0$  – концентрация нейтральных частиц в полости катода;

$r_{\text{вн}}$  – радиус полости катода;

$m_i$  – масса иона рабочего тела;

$U_0$  – потенциал электрического поля на оси полости.

Для традиционных полых диафрагмированных катодов на ксеноне для самоподдержания разряда необходимо в полости обеспечить плотность нейтрального газа  $n_0 > 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При этом давление в полости должно быть  $P_K > 10$  Торр, а соответ-

ствующий расход ксенона составит величину  $\dot{m} > 0,08$  мг/с. С уменьшением плотности газа эффективность ионизации снижается. При этом уменьшается поток энергии приносимой ионами на стенку, снижается температура поверхности и нарушается условие самоподдержания разряда. Разряд гаснет, что наблюдается в экспериментах.

Повышение устойчивости и обеспечение работоспособности полого катода при низких давлениях в полости, пытаются достигнуть за счет дополнительного внешнего нагрева [5]. Требуемую температуру эмиссионной поверхности обеспечивают в этом случае не за счет ионной бомбардировки поверхности катода, а за счет подвода дополнительной энергии с помощью нагревателя. Однако это может нарушить условие существования монослоя активатора на поверхности. С уменьшением давления в полости падает поток частиц (ионов) на поверхность. Внешний нагрев увеличивает их десорбцию. Поэтому пленка активатора в этих условиях может не сформироваться.

## 2. Решение проблемы

Обеспечение устойчивой работы полого катода при низких ( $P_K < 1$  Торр) давлениях в полости может быть достигнуто, по мнению автора, за счет организации второй, дополнительной ступени разряда в полости катода с помощью автономного источника электропитания.

Схема двухступенчатого полого плазменного катода представлена на рис. 1.

При предложенной схеме построения катода условия существования плазмы в полости, ее параметры (концентрация и температура частиц), напряженность электрического поля, поток энергии и частиц на эмиссионную поверхность будут определяться параметрами дополнительной ступени. Улучшатся условия эмиссии электронов, поскольку возрастет энергия и поток ионов на поверхность.

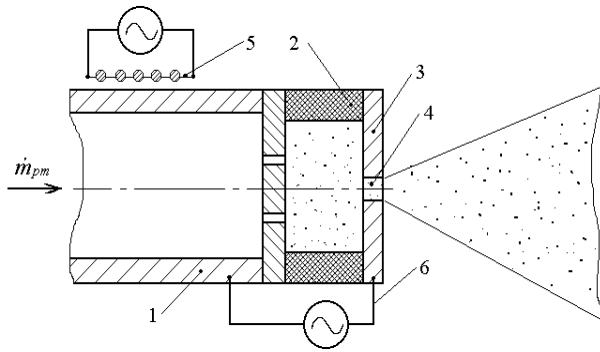


Рис. 1. Схема катода:

- 1 – внутренний электрод; 2 – изолятор;  
3 – внешний электрод; 4 – экстракционное отверстие; 5 – стартовый нагреватель;  
6 – источник электропитания дополнительной ступени

Рост напряженности поля в полости катода за счет дополнительного источника электропитания позволит повысить проводимость плазмы, и обеспечить существование плазменного мостика независимо от источника внешнего электропитания.

Таким образом, организация второй дополнительной ступени разряда в полости катода положительно скажется на его работоспособности и может позволить снизить рабочее давление и обеспечить устойчивую его работу при токах разряда требуемых для ЭРД малой мощности.

### Заключение

Для подтверждения работоспособности схемы построения катода необходимо экспериментально определить и подтвердить границы возможного снижения давления в полости, при которых дополнительный разряд второй ступени существует устойчиво и существенно влияет на ток основного разряда.

Также необходимо экспериментально определить диапазон токов катода и подтвердить возможность работы при токах ( $0,3 \div 0,4$  А), которые представляют интерес для ЭРД малой мощности (100 – 200 Вт).

### Литература

1. Garkusha V. with col. Modern status of Hall Thrusters Development in Russia // AIAA 99-2157.
2. Micci M., Ketsdever A. Micropropulsion for small spacecraft // Progress in astronautics and aeronautics. – 2000. – Vol. 187. – AIAA. – 2000.
3. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989. – 140 с.
4. Белан Н.В., Оранский А.И., Бахмет Г.К. Некоторые особенности рабочих процессов в прикатодной области электроракетных двигателей // Сб. тр. 7-х научн. чтений по космонавтике. – М.: Машиностроение, 1993. – С 123-129.
5. Arhipov B. Krochar L. Numerical and Experimental Researches of Thermal Process in Cathodes / Neutralizes for Electric Plasma // AIAA 98-3479.
6. Delcroix S. Minoon H. High pressure operation in hollow cathode are discharge // Proc Int. Conf. Hollow Cathode discharges. – 1971. – Appl. Ins. – P. 18-26.

Поступила в редакцию 1.06.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.