

УДК 533.9.07

А.В. ХИТЬКО

*Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск, Украина***РАБОТА МАЛОРАСХОДНОГО ПОЛОГО КАТОДА В СРЕДЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА**

Рассмотрена проблема снижения расхода рабочего тела через полый катод электрического ракетного двигателя. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность построения малорасходного полого катода на комбинированном рабочем теле при низких давлениях газа в разрядном объеме.

**полый катод, электрический ракетный двигатель, расход рабочего тела, активатор, плазменный мост, ток, напряжение, внутренний разряд**

**Введение**

В последние годы особый интерес проявляется к разработке малых космических летательных аппаратов (микроспутников, МС) и расширению диапазона их применений [1]. Уменьшение массы оборудования, связанное с миниатюризацией электронных приборов, стимулирует работы по созданию соответствующих двигательных систем, которые могут быть использованы для ориентации и коррекции орбит данного класса аппаратов. Одной из технологий, которые можно применять на борту МС, следует рассматривать электрические ракетные двигатели (ЭРД), в частности, холловские двигатели, как проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя устройства. Такие несомненные преимущества как конструктивная простота, легкость управления, высокий уровень выходных характеристик позволят им занять свое место среди расположенного на борту оборудования.

Для ЭРД характерно использование, в качестве основного катода и катода-нейтрализатора, полого плазменного катода с протоком рабочего тела. Расход через катод обычно составляет до 10% от основного расхода через двигатель, что при прочих равных условиях приводит к снижению удельного импульса. Ввиду этого естественным является стремление разработчиков к снижению расхода через катод и повышению его газовой эффективности.

**1. Формулирование проблемы**

Непосредственное снижение расхода для дифрагмированного полого катода приводит к снижению разрядного тока, а при предельных граничных значениях расхода разряд гаснет, двигатель не работает [2]. Следовательно, проблема снижения расхода рабочего тела через катод, при малых уровнях токов (меньших 0,5 – 0,8 А), и повышения его газовой эффективности актуальна и требует оригинальных решений на основе новых подходов к организации плазменного катода.

**1.1. Общие закономерности**

Для обеспечения работоспособности плазменного источника электронов необходимо решить две основные задачи:

- ввод электронов с поверхности катода во внешний объем;
- транспортировку электронов из катодной области в анодную или в пучок источника плазмы.

Для эффективного ввода электронов с поверхности во внешний объем необходимо обеспечить требуемый уровень тока эмиссии, который определяется работой выхода поверхности и ее температурой. Также необходимо обеспечить компенсацию объемного пространственного заряда эмитированных электронов за счет потока ионов из разрядного объема. В противном случае у поверхности образуетсяся

виртуальный катод и ее эмиссионная способность будет ограничена [3].

При решении второй задачи следует учитывать то, что для эффективной транспортировки электронов из прикатодной области к аноду или к ионному пучку двигателя необходимо организовать "плазменный мост", в котором плазма квазинейтральна и имеет достаточную концентрацию для прохождения тока требуемой плотности [4].

## 2. Решение проблемы

Расход через катод состоит из двух составляющих: расхода активирующего вещества и плазмообразующего газа. Для традиционных газовых катодов с активаторами на основе солей бария или гексаборида лантана характерным является ничтожно малая величина расхода активатора по сравнению с расходом плазмообразующего газа. Поэтому вопрос повышения газовой эффективности связывают только с снижением расхода плазмообразующего газа.

Особенностью катода работающего на цезии является то, что он выполняет роль активатора и плазмообразующего газа (пара). Поэтому снижение расхода паров цезия через катод будет влиять как на эмиссию электронов, так и на прохождение их к аноду.

Ранее было показано, что полый катод с внутренним разрядом [5] позволяет обеспечить устойчивую работу при низких давлениях в полости и как следствие при более малых расходах щелочного металла. При снижении его расхода снижается количество нейтральных атомов в разрядном промежутке, падает концентрация плазмы и величина тока, который может быть перенесен через разрядный промежуток. Таким образом возникает ситуация при которой расхода рабочего тела проходящего через катод недостаточно для организации «плазменного моста».

Недостаток нейтральных атомов может быть пополнен за счет дополнительного введения газа в

разрядный промежуток, минуя полость катода. При этом роль щелочного металла заключается в снижении работы выхода эмитирующей поверхности и ее температуры (задача 1), а роль дополнительного расхода инертного газа (химически пассивного) - к созданию в межэлектродном зазоре квазинейтральной плазмы обеспечивающей перенос электронов к пучку (задача 2).

### 2.1. Обзор публикаций и выделение нерешенных задач

Подобный подход к построению сильноточного дугового полого катода для термоэмиссионного преобразователя, без протока рабочего тела через его полость, приведен в работах Ф.Г. Бакшта, Г.А. Дюжева [6, 7]. Экспериментальные и теоретические исследования дугового режима разряда с полым катодом проведены для ксеноновой плазмы при средних ( $P = 200 - 700$  тор) и низких ( $P = 1 - 10$  тор) давлениях газа в разрядном объеме. Эмиссия электронов с поверхности катода обеспечивалась малой добавкой цезия ( $P_{Cs} = 0,1$  тор), которая подавалась в разрядный объем. Установлено, что влияние давления ксенона на вольтамперные характеристики (ВАХ) полого катода мало и рост его величины приводит к сдвигу ее в область более высоких напряжений. Рассмотренный катод можно считать газовым, т.к. давление активирующего вещества значительно меньше давления плазмообразующего газа.

### 2.2. Постановка задачи данного исследования

Исследуемый диапазон рабочих давлений значительно превышает рабочие давления в разрядных промежутках ЭРД малой мощности. В связи с этим возникла необходимость проведения экспериментальных исследований газового разряда с цезиевым полым катодом при минимально возможных давлениях газа и расходах цезия, обеспечивающих требуемый ток рассматриваемого класса ЭРД [8].

Целью исследований, приведенных в данной статье, являлось определение граничных значений напряжения и давления газа в объеме, при которых разряд на комбинированном рабочем теле существует устойчиво.

### 2.3. Основной материал

Исследования включали изучение особенностей вольтамперных характеристик разряда с цезиевым полым катодом в атмосфере инертного газа при различных величинах давления в объеме. Расход цезия через катод принимался минимально возможным. Для этого давление цезия в полости поддерживалось постоянным у порога зажигания внутреннего разряда ( $P_k - 10^{-2}$  Тор). Давление газа (ксенон) в разрядном объеме изменялось в диапазоне ( $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-2}$ ) Тор, характерном для ЭРД малой мощности.

Анализ вольтамперных характеристик, полученных экспериментальным путем, показал, что они имеют характерный ступенчатый вид (рис. 1).

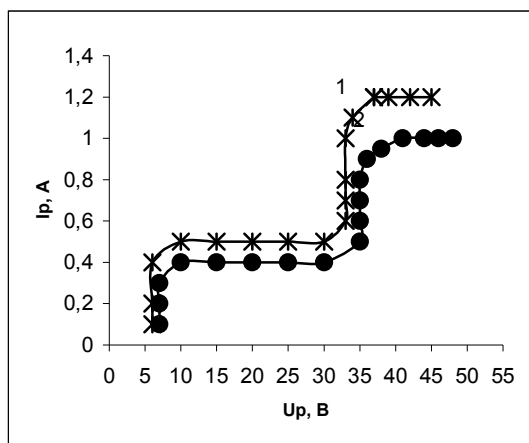


Рис. 1. Вольтамперная характеристика:  
1 –  $T_{\text{бСs}} = 210^\circ\text{C}$ , 2 –  $T_{\text{бСs}} = 240^\circ\text{C}$

При низких напряжениях (5 – 7)В горит цезиевый низковольтный разряд, с характерным участком насыщения разрядного тока. Повышение разрядного напряжения выше (33 – 35)В приводит к ионизации атомов ксенона и дальнейшему росту разрядного тока. Следовательно, существует пороговое значе-

ние разрядного напряжения, начиная с которого происходит ионизация газа во внешнем объеме. Для ксенона пороговое значение напряжения в исследуемом диапазоне давлений равно 33 – 35 В.

Целью дальнейших исследований являлось определение влияния давления ксенона в разрядном объеме на приращение тока, вызванное его ионизацией, при постоянном расходе цезия через катод. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость разрядного тока от давления ксенона при фиксированном расходе цезия. Разрядное напряжение фиксировалось, и его величина выбиралась больше порогового значения для исследуемого газа.

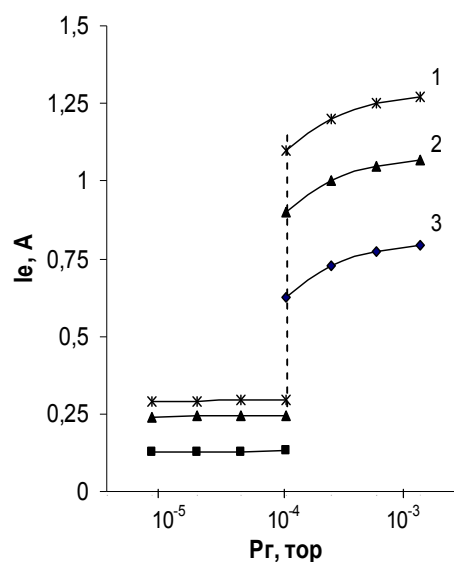


Рис. 2. Зависимость тока разряда от внешнего давления:

1 –  $T_{\text{бСs}} = 210^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{\text{бСs}} = 240^\circ\text{C}$ ; 3 –  $250^\circ\text{C}$

Анализ экспериментальных кривых показал, что в диапазоне давлений ( $10^{-5} - 10^{-4}$  тор) прирост разрядного тока, связанный с ионизацией ксенона, не велик и составляет доли миллиампер. Увеличение давления ксенона в разрядном объеме выше  $1,5 \times 10^{-4}$  тор вызывает скачкообразный рост разрядного тока. Визуально наблюдается возникновение свечения заполняющего весь разрядный объем. Дальнейшее повышение давления  $10^{-4} - 10^{-3}$  тор не приводит к значительному увеличению разрядного тока.

Следовательно, существует пороговое значение давления газа в разрядном объеме, при котором загорается газовый разряд с цезиевым полым катодом, и прирост разрядного тока при этом существенен. Для ксенона величина порогового давления в разрядном объеме равна  $1,5 \times 10^{-4}$  тор.

### Выводы

Проведенные экспериментальные исследования разряда с цезиевым полым катодом и подачей плазмообразующего газа в разрядный промежуток позволяют сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность построения малорасходного полого катода на базе ампульного полого катода на комбинированном (активатор + газ) рабочем теле при низких давлениях газа в разрядном объеме ( $P_r \leq 10^{-3}$  тор).

2. Определены пороговые значения разрядного напряжения (33В) и давления газа ( $1,5 \times 10^{-4}$  тор), начиная с которых возможен поджиг дуги с малорасходным полым катодом на комбинированном рабочем теле и существенное приращение разрядного тока.

### Заключение

Представленный подход к проблеме создания малорасходного слаботоchnого полого катода на токи меньше 0,5 – 0,8 А требует принятия дальнейших оригинальных решений и ставит ряд проблем. Среди них можно выделить проблему взаимовлияния плазмообразующего и активирующего рабочих веществ комбинированного полого катода, надежная защита химически активных компонент рабочего тела, при малых уровнях расхода и ряд других.

Перечисленные проблемы имеют ряд вариантов решений. При этом задачи согласования работы катода с внутренним разрядом с различными

типами ЭРД малой мощности является основной и требует проведения дальнейших специальных исследований с конкретной привязкой к определенному двигателю.

### Литература

1. Университетские проекты микроспутников: тенденции, технологии, реализация. Материалы международного семинара-практикума. – Днепропетровск, 2002. – 90 с.

2. Small SPT unit development and test / Arkhipov B. et al. // 3-rd International Conference Spacecraft Propulsion. Cannes, France 10–13 Oct. 2000.

3. Термоэлектронные катоды. / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.Н. Никонов. – М.: Энергия., 1966. – 386 с.

4. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. – М.: Атомиздат, 1978. – 328 с.

5. Хитько А.В. Двухступенчатый полый катод. Современные проблемы ДЛА: Тр. III-й Всесоюз. НТК. – М.: МАИ, 1986. – 620 с.

6. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса. – М., 1973. – 480 с.

7. Дюжев Г.А., Бакшт Ф.Г., Юрьев В.Г. Теория сильноточного дугового полого катода // ЖТФ. – 1981. – Т. 51. – С. 1846 – 1857.

8. Разработка электродугового двигателя малой мощности для коррекции и ориентации спутника / А.В. Лоян, А.А. Рыбаков // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 1998. – Вып. 5. – С. 225 – 228.

*Поступила в редакцию 27.05.2004*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Н.В. Белан, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.