

УДК 533.9.07

Н.Н. КОШЕЛЕВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ W-ВА КАТОДА ДЛЯ СПД-20**

Показано влияние безнакального полого катода на эффективность работы микро-СПД, перечислены задачи проектирования катодов и методы их решения, приведены результаты испытаний слаботочного катода.

стационарный плазменный двигатель, безнакальный полый катод, эмиттер.

Введение

Последнее десятилетие характеризуется все более интенсивным использованием электрореактивных двигателей (ЭРД) на космических аппаратах (КА) в качестве систем электрической тяги, которые являются более эффективной альтернативой химическим двигателям. С появлением КА микро диапазона весом до 100 кг и энерговооруженностью до 100вт, использование малых стационарных плазменных двигателей (СПД) для удержания КА на орбите, а возможно, и высокоточной ориентации, становится актуальным. Требования по экономичности, надежности и ресурсу таких двигателей сравнимы с киловаттными. Наиболее ответственным узлом в СПД-20, который во многом отвечает за эти параметры, является катод-компенсатор, ток которого не превышает 0,5 А, а потребляемая мощность, которого при минимуме расхода плазмообразующего газа, при этом, должна быть не более 10% полной мощности двигателя.

Примером эффективности работы двигателя в зависимости от работы катода может служить исследование энергетического спектра ионов струи СПД-20 по кривым зависимости ионного тока коллектора многосеточного зонда от задерживающего потенциала (рис. 1), из которых видно, что средняя энергия ионов катода с более низким напряжением нейтрализации (U_n), выше на 12–15 В, что приводит к разнице в удельном импульсе, примерно, в 400 с,

при постоянном катодном расходе. Объектом рассмотрения являются катоды, работающие в авторежиме.

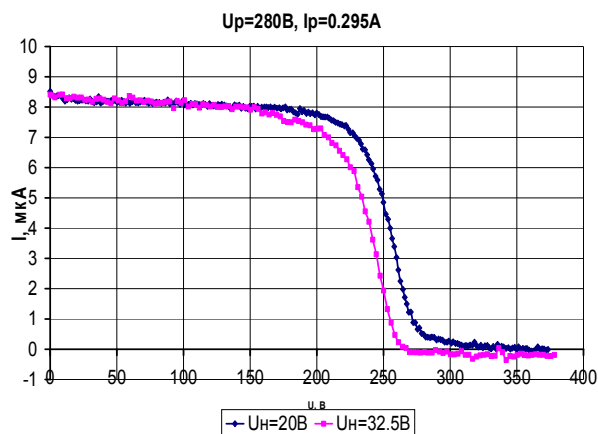


Рис. 1. Исследование энергетического спектра ионов струи СПД-20

Задачи проектирования безнакальных полых катодов до 0,5 А

Как известно, создание слаботочных газовых полых катодов связано с определенными трудностями и не поддается методам масштабного проектирования. Это связано с увеличением тепловых потерь и снижением механической прочности деталей катода при минимизации габаритов конструкции. В то же время доля электрических и газовых потерь в катодной части микродвигателя без ее оптимизации может быть соизмеримой с затратами на создание тяги. Из опыта наших исследований и литературных данных [1, 2], оптимизацию слаботочных катодов

можно разбить на две задачи связанных с потерями в эмиттерной части и зоне ионизированного газа, отвечающей за транспортировку электронов.

Эмиттерная часть катода наиболее сильно связывает вопросы экономичности, надежности и ресурса. В работе не рассматриваются вопросы эмиссионных материалов, как одного из самых важных для построения эффективных катодных эмиттеров. Считается, что применяются лучшие образцы W-Ba систем

Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{ион}} = Q_{\text{эмис}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{тепл}}$$

Так как, ионный нагрев ($Q_{\text{ион}}$) и потери тепла за счет эмиссии ($Q_{\text{эмис}}$) связаны заданным током, конструктив эмиттерной части может влиять на слагаемые $Q_{\text{изл}}$ и $Q_{\text{тепл}}$, однако, рост этих потерь напрямую зависит энергии бомбардирующих ионов, увеличивая при этом, в конце концов, напряжение разряда. При оптимальной плотности тока W-Ba систем 5A/cm² соответствующему максимальному ресурсу размеры эмиссионной вставки не превышают цилиндра 3 мм длиной и 2 мм диаметром, включая запас активатора. Откуда видно, что, выбирая систему с более высокой плотностью тока, оптимизировать габаритные размеры становится еще более сложно.

Соблюдение компромисса между надежным креплением вставки и минимальным тепловым контактом с держателем, позволяющим без потерь проводить номинальный ток, поможет минимизировать потери тепла теплопроводностью ($Q_{\text{тепл}}$), которые как показано в [3], играют решающую роль в тепловом режиме эмиттера. Немаловажным фактором является также применение материалов с низкой теплопроводностью.

Потери излучением ($Q_{\text{изл}}$) сокращаются применением экранной изоляции. Расположению которой, в безнакальных катодах с внутренним поджигом, предъявляются особые требования. Экраны, которые со временем могут покрыться высокоэмиссион-

ной присадкой, должны иметь температуру возгонки Ba для его повторного использования. Необходимо также минимизировать поверхности под катодным потенциалом по причине потерь, связанных с частичным отводом потока «греющих» ионов от эмиттера.

Вторым существенным вкладом в уменьшение потерь является организация режима течения плазмообразующего газа и процессов в нем. В ранних исследованиях [4] были обнаружены две стабильные формы разряда с полым катодом. Режим со светящимся внешним столбом разряда, с характерным высоким напряжением (plume mode) и «темным», энергетически более выгодным (spot mode). Однако реализовать последний режим удавалось за счет прокачки повышенного расхода газа, что не приемлемо при использовании катода в качестве компенсатора в СПД.

«Темный» режим характеризуется тепловой контракцией нагретого до высоких температур, что позволяет снизить потери тепла на стенки. В то же время в нагретом шнуре идут интенсивные процессы генерации ионов, которые компенсируют объемный заряд, чем увеличивают проводимость плазмы, при этом, измерения внутреннего давления газа в этом режиме превысили отметку сотни тор.

Экономии газа предлагается произвести за счет уменьшения диаметра и увеличения глубины диафрагмы [5]. Однако, в рассматриваемом диапазоне токов, диаметр отверстия приближается к 0,12 мм, а при соблюдении оптимальной формы диафрагмы, сложности ее изготовления возрастают на порядок.

Результаты испытаний катода

Режим работы экспериментальной модели слабботочного катода, в конструкции которого были использованы вышеизложенные рекомендации, снизил разрядное напряжение, примерно, на 15 В. Вольтамперные характеристики работы макета катода в диодном режиме представлены на рис. 2.

Верхняя характеристика с наибольшим напряжением соответствует работе неоптимизированного катода со светящимся режимом «plume mode». Кривые с более низким потенциалом - модернизации эмиттерной вставки и полной оптимизации, соответственно.

Также были проведены испытания этой модели катода в составе СПД-20 с измерением всех двигательных характеристик. Процент электрических потерь компенсатора не превысил десяти, а газовых - двадцати, что приближается к параметрам более мощных штатных моделей.

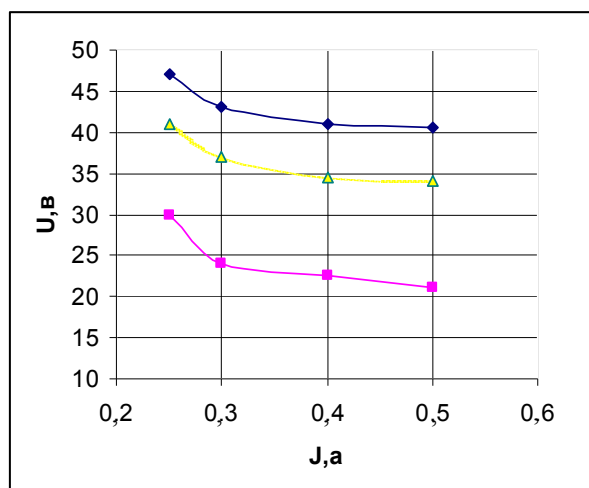


Рис. 2. Вольтамперные характеристики работы макета катода в диодном режиме

Заключение

В работе рассмотрены некоторые вопросы оптимизации конструкции слаботочного, безнакального полого катода, использующего импрегнированную W-Ва систему в качестве эмиттера.

Предложены температурные и газовые режимы работы и способы их реализации.

Исследования показали возможность построения высокоэффективных газовых полых катодов в диапазоне меньше 0,5 А.

Задачи полной оптимизации должны включать исследования стойкости материалов, ресурса применяемых эмиссионных вставок, влияния чистоты газа и трактов его подачи при повышенном катодном давлении, процессов в плазме.

Данная работа проводилась в рамках проекта УНТЦ №1936.

Литература

1. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки. – М.: Мир, 1992. – 344 с.
2. Ferreira C. M., Delcroix J. L., Theory of the Hollow Cathode Arc. // Journal of Applied Physics Vol. 49, No.4, April 1978, P. 2380-2395.
3. Patterson M. J., Oleson S.R., Low-Power Ion Propulsion for Small Spacecraft, Paper No 97-3060, 33 // AIAA Joint Propulsion Conference, July 1997, Seattle, WA.
4. Rawlin V.K., Pawlik E.V. A Mercure Plasma-Bridge Neutralizer // Journal of Spacecraft and Rockets. – July 1968. – Vol. 5, No. 7. – P. 814-820.
5. Domonkos M. T., Gallimore A. D., Parametric Investigation of Orifice Aspect-Ratio on Low Current Hollow Cathode Power Consumption. 33 // AIAA Joint Propulsion Conference, July 1997, Seattle, WA.

Поступила в редакцию 5.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.