



УДК 629.7.036.74

М. И. Каташова, Г. А. Парахин, А. В. Румянцев**СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА
ДЛЯ МИКРОСПД**

Намечен круг задач, которые возникают в процессе разработки и изготовления катода компенсатора для микроСПД, и возможные пути их решения. Такой катод должен иметь меньшие по сравнению со штатными моделями габариты, расход рабочего тела, мощность накала, энергопотребление в авторежиме, работая при этом в диапазоне токов 0,3...1 А или ниже.

This paper presents the scope of challenges which are faced in development and manufacturing of the cathode-compensator dedicated for micro-SPTs, and possible ways of how to overcome them. As compared to standard models, such a cathode shall be smaller in dimensions, shall have a lower propellant flow rate, as well as lower heater power and power consumption when self-operated; and it shall be able to operate in the current range of 0.3...1A or lower.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель (СПД), микро-СПД, катод-компенсатор, термоэмиссия, скандатно-бариевые катоды, экранно-вакуумная теплоизоляция.

Key words: stationary plasma thruster (SPT), micro-SPT, cathode-compensator, thermal emission, scandium barium cathode, screen vacuum heart-insulation.

Активные исследования электроракетных двигателей (ЭРД) начаты в России около 60 лет назад. За прошедшее время изучены практически все известные типы ЭРД. К настоящему моменту наибольшие успехи достигнуты в разработке и практическом применении стационарных плазменных двигателей (СПД) [1]. Востребованность СПД объясняется его существенно более высоким удельным импульсом тяги в сравнении с химическими двигателями (ЖРД, РДТТ). Кроме того, он обладает относительно простой конструкцией и достаточно высокой надежностью [2]. Для решения перспективных задач в ОКБ разработаны двигатели типоразмерами от Plus-40 до СПД-140, причем линейка двигателей продолжает расширяться.

Катод-компенсатор является важным элементом СПД. Он представляет собой наиболее теплонапряженный элемент в конструкции двигателя и может значительно ограничить его ресурс и надежность. Для двигателей малых типоразмеров катод может заметно снижать тяговые характеристики вследствие того, что катодный расход рабочего тела и энергопотребление становятся сопоставимыми с анодными. Разработанные в ОКБ «Факел» катодные узлы обеспечивают требуемые тяговые характеристики, ресурс и надежность имеющихся двигателей, но для перспективных малых типоразмеров СПД необходимо создание



более эффективного катода с меньшими габаритами и более низким рабочим током.

В ОКБ «Факел» планируется создание двигателя СПД-40 с ориентировочной мощностью 100–150 Вт. Даже при работе в низковольтном режиме двигатель будет потреблять ток 0,3–0,5 А. Минимальный ток, при котором может работать наименьший типоразмер серийного катода КЭ-1, составляет 0,7 А, что делает невозможным применение указанного катода с перспективной моделью двигателя.

Серийный катод КЭ-1 двигателя СПД-50 наиболее близок по диапазону рабочих токов к перспективному двигателю СПД-40, поэтому сравнение будет проводиться с этим катодом. Номинальный расход рабочего тела через катод КЭ-1 составляет 0,1...0,15 мг/с, а анодный расход двигателя СПД-50 – 1,25 мг/с, то есть катодный расход составляет 7,5...10,7 % от общего расхода, что согласуется с теорией [3], но для двигателя меньшего типоразмера катодный расход должен быть снижен. Становится очевидной необходимость разработки нового слаботочного катода, в конструкции которого имеется возможность учесть опыт предыдущих серийных конструкций, и отдельные, отработанные ранее удачные технические решения. Рассмотрим более подробно задачи, решение которых позволит достигнуть поставленную цель.

В основе работы катода лежит явление термоэмиссии, то есть для работы в авторежиме катод должен иметь определенную рабочую температуру. При снижении этой температуры ниже некоторого критического минимума термоэмиссия прекращается и разряд гаснет.

Запишем упрощенное выражение теплового баланса для эмиттера:

$$Q_i + Q_e + Q_{\text{диафр}} + Q_{\text{пл}} = Q_{\text{рад}} + A_{\text{эмис}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{теплонр}}, \quad (1)$$

где Q_i – тепловой поток, приносимый ионами плазмы; Q_e – тепловой поток, приносимый обратными электронами; $Q_{\text{диафр}}$ – тепловой поток, выделяемый на диафрагме из-за омического сопротивления плазмы; $Q_{\text{пл}}$ – тепловой поток, излучаемый плазмой на стенки эмиттера; $Q_{\text{рад}}$ – радиационные потери с наружных поверхностей эмиттера; $A_{\text{эмис}}$ – «эмиссионное охлаждение» катода – энергия, затрачиваемая на выход электронов с поверхности и на их ускорение; $Q_{\text{конв}}$ – конвективный тепловой поток (охлаждающий эмиттер); $Q_{\text{теплонр}}$ – тепловой поток, отводимый от эмиттера теплопроводностью.

Левая часть равенства (1) характеризует механизмы поступления тепла в эмиттер, правая – механизмы сброса тепла. При оценке источников тепла, поступающего на эмиттер, излучение плазмы является малой величиной по сравнению с другими механизмами, и им можно пренебречь для получения более наглядной связи между током и тепловыми потерями. Тогда все члены, стоящие слева, будут прямо пропорциональны току разряда:

$$Q_i + Q_e + Q_{\text{диафр}} = I_p \cdot (U_{\text{прк}} + I_p \cdot R_{\text{диафр}}), \quad (2)$$



где I_p — ток разряда; $U_{\text{прик}}$ — прикатодное падение потенциала; $R_{\text{диафр}}$ — сопротивления плазмы в канале отверстия диафрагмы.

Из выражений (1) и (2) видно, что для уменьшения тока разряда необходимо уменьшить один или несколько членов, стоящих справа в равенстве (1).

Ввиду малого расхода газа через катод величиной конвективного теплосброса, как правило, пренебрегают. Очевидно, что снижение катодного расхода уменьшит количество тепла, отводимое конвективным теплообменом, но при этом изменятся параметры разряда и величина $U_{\text{прик}}$. Следовательно, снижение расхода рабочего тела неоднозначно влияет на снижение потерь энергии с эмиттера.

Более значимым механизмом отвода тепла служит теплопроводность. Количество тепла, отводимое теплопроводностью, зависит от качества тепловой развязки (свойств материала развязки, ее длины и площади поперечного сечения), а также от разницы температур эмиттера и места крепления развязки. Эту разницу из-за конструктивных и технологических требований к соединениям в катоде можно уменьшить снижением температуры эмиттера и варьированием длины тепловой развязки.

Через слагаемое $A_{\text{эмис}}$ в уравнении энергетического баланса эмиттера учитывается влияние двух физических процессов: выхода электронов с эмитирующей поверхности и ускорения электронов в прикатодном падении потенциала. Величина $A_{\text{эмис}}$ зависит от свойств эмиссионного материала (в т. ч. и от работы выхода электрона с поверхности материала) и параметров разряда. Уменьшить величину $A_{\text{эмис}}$ можно только выбором материала эмиттера с более низкой работой выхода.

Учитывая диапазон рабочих температур эмиттера LaB_6 (1673...1873 К) и малость расхода рабочего тела, можно утверждать, что теплосброс с эмиттера осуществляется излучением его поверхности. Снижение рабочей температуры с 1673 К (минимальная рабочая температура гексаборида лантана) до 1373 К (минимальная рабочая температура скандатно-бариевого термоэмиттера) понизит тепловые потери с эмиттера более чем в два раза.

Нанесение специальных покрытий на капсулу катода, возможно, позволило бы снизить коэффициент черноты ϵ поверхности, но неизвестны покрытия, работающие при температурах 1673 ± 1873 К, которые снизили бы коэффициент черноты до значения ниже 0,65 (ϵ молибдена при температуре выше 1573 К). Уменьшить площадь излучающей поверхности также не представляется возможным.

Следует отметить, что весьма эффективным средством снижения радиационных тепловых потерь является экранирование излучающей поверхности. Во всех конструкциях катодов ОКБ «Факел» применяются тепловые экраны, но эти элементы весьма габаритны, поэтому для со-



здания слаботочного катода актуально применение элемента, имеющего малые габариты при большом количестве экранов. Подытожив все описанное выше, отметим технические решения, позволяющие создать слаботочный катод с малым расходом:

- снижение рабочей температуры термоэммиттера;
- снижение работы выхода эмиссионного материала;
- увеличение длины и уменьшение площади сечения тепловых связей;
- применение эффективного экранирования.

Первые два пункта возможно реализовать применением широко используемых за рубежом скандатно-бариевых термоэммиттеров, что и станет задачей последующих этапов разработки эффективного катода-компенсатора для микроСПД.

Список литературы

1. Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б. Стационарные плазменные двигатели. Харьков, 1989.
2. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М., 2008.
3. Горшков О.А., Муравьев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М., 2008.

Об авторах

Мария Ильинична Каташова — асп., Балтийской федеральный университет им. И. Канта, инженер, ОКБ «Факел», Калининград.
E-mail: ami_tender_heart@mail.ru

Григорий Александрович Парахин — асп., Балтийской федеральный университет им. И. Канта, инженер, ОКБ «Факел», Калининград.
E-mail: grif1988@mail.ru

Альберт Владимирович Румянцев — канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийской федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: albert37@list.ru

About the authors

Maria Katashova — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, engineer, EDB «Fakel», Kaliningrad.
E-mail: ami_tender_heart@mail.ru

Gregory Parakhin — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, engineer, EDB «Fakel», Kaliningrad.
E-mail: grif1988@mail.ru

Albert Rummyantsev — PhD, Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: albert37@list.ru