

УДК 533.9.07

А.В. ХИТЬКО

Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск, Украина

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КАТОДОВ НА КОМБИНИРОВАННОМ РАБОЧЕМ ТЕЛЕ

Приведены варианты построения катодов электроракетных двигателей малой мощности на комбинированных рабочих телах. Они отличаются расходами рабочего тела и давлением газа при котором существует газовый разряд с цезиевым полым катодом.

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

Введение

В течение последних лет установилась тенденция увеличения роли микроспутников (МС) и расширения диапазона их применений [1]. Это стимулирует работы по созданию двигательных систем малой мощности (до 100 Вт), которые могут быть использованы в системах ориентации и коррекции орбиты МС.

Как одну из двигательных технологий, которую можно применять на борту МС, следует рассматривать электрические ракетные двигатели (ЭРД), в частности, холловские двигатели (ХД) [2]. Такие несомненные преимущества как конструктивная простота, легкость управления, высокий уровень выходных характеристик позволят им занять свое место среди расположенного на борту оборудования.

Основным фактором, сдерживающим использование холловских двигателей на борту малых космических аппаратов с низкой энерговооруженностью, является их относительно большая потребляемая мощность (100Вт, СПД-25).

1. Формулирование проблемы

Один из способов снижения уровня потребляемой мощности связан с реализацией режимов

работы катода и двигателя при малых токах разряда (до 0,5А).

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.

Непосредственное снижение расхода для дифрагмированного полого катода приводит к желаемому снижению разрядного тока, но при предельных граничных значениях расхода разряд гаснет, двигатель не работает [3]. 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.

Обзор публикаций. Анализ результатов исследований цезиевых полых катодов показал, что организация в полости катода вспомогательного внутреннего разряда позволяет обеспечить его устойчивую работу при давлениях меньших 1 Торр на один три порядка [5]. Как следствие этого удалось снизить расход щелочного металла до $10^{-4} - 10^{-2}$ мг/с. Также

получено, что 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 [4].

Экспериментально установлено, что увеличение расхода щелочного металла для газового катода с внешней подачей рабочего тела приводит к существенному снижению прикатодного скачка потенциала и как следствие напряжения горения разряда. Также известно [6] 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 [7]. 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.

2. Решение проблемы

Катодный расход состоит из двух составляющих: расхода активирующего вещества и плазмообразующего газа. При построении катода на комбинированном рабочем теле необходимо действовать следующим образом, уменьшить расход газа, что приведет к увеличению напряжения горения разряда. Затем увеличением расхода активатора добиться прежнего его значения. При этом параметры разряда (ток, напряжение) останутся неизменными, но суммарный расход существенно уменьшится, т.к. расход активатора значительно меньше и его доля в суммарном расходе мала. Катод будет работать на комбинированном рабочем теле (газ + щелочной металл), но соотношение расходов и суммарный расход существенно уменьшатся, газовая эффективность возрастет.

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, а роль дополнительного расхода инертного газа (химически пассивного) – к созданию в межэлектродном зазоре квазинейтральной плазмы обеспечивающей перенос электронов к пучку.

Постановка задачи исследования. Задачей данного исследования является разработка вариантов и рекомендаций по построению катодов ЭРД на комбинированных рабочих телах.

Основной материал

Изменяя соотношение между расходами газа и щелочного металла можно предложить несколько вариантов построения катодов на комбинированном рабочем теле, обеспечивающих необходимый уровень разрядного тока ($I_p > 0,8$ А):

1. Цезиевый полый расходный катод.

Подачи газа нет.

2. Цезиевый катод + струя ускорителя.

Наиболее предпочтительное расположение катода в центральном магнитопроводе двигателя.

3. Цезиевый катод + газовая ступень.

Катод с внешней подачей

Наиболее предпочтительное расположение катода в центральном магнитопроводе двигателя.

4. Газовый катод с активатором на основе солей цезия.

Выбор конкретного варианта построения катода необходимо осуществлять исходя из требований, которые являются определяющими для всей двигательной установки и космического летательного аппарата в целом.

Требования и соответствующие приоритетные варианты построения катода можно представить следующим образом:

1. Малая допустимая доза напыления щелочного металла на поверхность и узлы КЛА. Низкий расход щелочного металла.

В этом случае наиболее предпочтительным является использование газового катода с активатором на основе солей цезия [7]. Катод может быть построен, как по традиционной схеме с протоком рабочего вещества через полость, так и по схеме с внешней подачей газа. В качестве активирующей соли щелочного металла необходимо использовать алюминат цезия или калия, которые имеют более низкое значение давления насыщенного пара и при рабочей температуре катода обеспечат более низкую величину расхода активатора.

Если допустимый уровень напыления позволяет поднять расход ЩМ, то следует использовать схему с внешней подачей газа, которая позволит повысить газовую эффективность катода. Менее привлекательными являются варианты использования чисто цезиевого катода без газовой компенсации разрядного промежутка. В этом случае уровень напыления будет максимальным.

2. Высокая газовая эффективность, минимальный расход через катод и как следствие минимальный запас рабочего тела.

Такая постановка задачи при проектировании катода правомочна для малых летательных аппаратов – микроспутников [1]. Использование на их борту электрических ракетных двигателей обусловлено возможностью, благодаря более высокому значению удельного импульса, существенно снизить запас рабочего тела необходимый для выполнения задачи полета. Расход рабочего тела через катод не участвует в создании тяги двигателя и является прямыми потерями, которые необходимо снижать.

В этом случае наиболее предпочтительным вариантом построения катода является цезиевый катод с использованием проводимости граничных областей ускоренного пучка ионов для создания «плазменного моста». При этом отсутствует подача газа через

катод в разрядный промежуток "пучок-катод". Компенсация пространственного заряда электронов обеспечивается плазмой и доионизированным газом струи ускорителя. Расход щелочного металла меньше, чем у цезиевого катода традиционной схемы. Его величина определяется давлением в полости, необходимым для создания на поверхности катода пленки активатора.

Менее привлекательным является вариант традиционного цезиевого катода или катода на солях цезия. Крайне не желательными, но возможными являются варианты газовых катодов.

3. Низкий уровень потребляемой мощности.

Наиболее жестко это требование предъявляется для катодов микродвигателей, которые используются на малых летательных аппаратах. Энерговооруженность малых и микроспутников находится на уровне 1 – 2 Вт на килограмм общей массы спутника [1]. Мощность, которая может быть выделена для обеспечения работоспособности катода, составляет 10 – 15 Вт.

Потребляемая катодом мощность определяется в первую очередь необходимым уровнем рабочих температур, который зависит от используемого активатора. Поэтому варианты цезиевого катода в различных модификациях (традиционная схема, схема с внутренним разрядом) более предпочтительны. Катоды, работающие на чистом жидком металле, будут иметь меньший уровень температур в зоне генерации паров, чем работающие на солях. Поэтому с точки зрения энергозатрат работа на чистых металлах предпочтительнее.

При рассмотрении энергопотребления катодом важным параметром является величина катодного скачка потенциала, которая находится на уровне потенциала ионизации рабочего тела. С этой точки зрения газовые катоды более энергоемки, т.к. потенциал ионизации Хе в 3 раза выше, чем у Cs. Прикатодное падение потенциала обеспечивает только перенос электронов в разрядный промежуток. При

питании двигателя источником напряжения его увеличение приводит к снижению ускоряющего напряжения, уменьшению уровня тяги, росту цены тяги двигателя. Поэтому в этом случае работа на чистом цезии более предпочтительна.

4. Максимальный ресурс.

Наибольшее влияние на ресурс катода-компенсатора оказывает материал эмиттера.

Применяемый в настоящее время в качестве эмиттера компенсаторов ОКБ «ФАКЕЛ» прессованный гексаборид лантана наряду со своими замечательными свойствами (низкая работа выхода электронов $\phi_K = 2,8$ эВ), высокая температура плавления ~ 2100 С, высокие плотности эмиссионного тока на уровне 25 А/см² при температуре 1600 °С и т.д. [8], обладает и существенными недостатками, которые ограничивают его использование в системах с ресурсом в несколько тысяч часов. Так, при температурах ~ 1600 °С и давлениях $30 \dots 40$ мм рт. ст., которые реализуются в компенсаторах, прессованные гексаборид лантановые катоды подвергаются диссоциативному испарению со значительными потерями массы по сравнению со скоростями испарения наиболее тугоплавких металлов.

Другим существенным недостатком этих катодов является их высокая химическая активность при высоких температурах, приводящая к интенсивному взаимодействию с металлическими конструкционными материалами компенсатора, в частности, с молибденом и его сплавами.

В этой связи представляется целесообразным применение между молибденом и гексаборидом лантана барьерных слоев из нитрида или карбида циркония, либо изготовление конструкционного материала катода из вакуумно-плотного графита. Это может несколько расширить область разрядных токов и повысить ресурс компенсатора, однако, полностью не решит проблему нейтрализатора СПД на требуемые времена работы.

Термоэмиттеры, разработанных в Харьковском авиационном институте импрегнированных вольфрамо-бариевых термокатодов ГПВК (ХАИ-2, БКН-5, БНК-Л, КМ-290 и др.), выполнены из пористого вольфрама, пропитанного алюминатом бария-кальция [8].

На основании имеющихся опытных данных установлено, что при правильной организации режимов работы вольфрамо-бариевых термоэмиттеров в составе ГПВК происходит унос только активатора, вольфрамовая губка (основа) эмиттера при этом практически не эродирует, массоунос вольфрама на $2 - 3$ порядка меньше скорости массоуноса активатора.

Опыт показывает, что при работе полых вольфрамо-бариевых катодов в дуговом разряде, скорость массоуноса активатора изменяется. Сначала она резко уменьшается на этапе приработки, затем медленно уменьшается в период установившегося износа (на этом этапе ее можно считать практически постоянной), в самом же конце ресурса, (последние минуты и секунды работы катода), – в период разрушения – резко скачком возрастает. Поскольку по продолжительности этап установившегося износа на $2 - 3$ порядка превышает период приработки, и на несколько порядков - период разрушения, то для оценочных расчетов можно использовать скорость массоуноса активатора, измеренную на этапе установившегося износа, приняв ее постоянной. Наконец, нерасходуемый остаток массы активатора обычно настолько мал, что им можно пренебречь. Следовательно, ресурс эмиттера обусловлен величиной запаса активатора и скоростью его массоуноса.

В нашем случае при любой схеме построения катода в качестве активатора использует щелочной металл – цезий. Пленка цезия на эмиссионной поверхности динамическая. Ее параметры в основном определяются давлением в полости катода. Поэтому

ресурс катода обусловлен необходимым запасом и величиной расхода щелочного металла.

К положительным моментам с точки зрения ресурса следует отнести существенно более низкую рабочую температуру катода и более низкое значение прикатодного скачка потенциала. Это позволяет утверждать, что скорость термического испарения материала катода и скорость ионного распыления в случае цезиевого активирования ниже, чем при использовании других активирующих веществ.

Среди рассматриваемых вариантов катодов с цезиевым активатором предпочтение, с точки зрения обеспечения максимального ресурса, следует отдать чисто цезиевым вариантам без использования газа. В этом случае катодное падение потенциала будет ниже порога ионного распыления материала катода, что положительно скажется на его ресурсе.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена возможность построения малорасходного полого катода на базе ампульного полого катода на комбинированном (активатор + газ) рабочем теле.

2. Определены варианты построения катодов, отличаются расходами рабочего тела и давлением газа при котором существует газовый разряд с цезиевым полым катодом.

Заключение

В каждом конкретном случае для выбора варианта построения катода необходимо дополнительно проводить комплекс прикладных экспериментальных исследований для согласования рабочих режимов катода и ускорителя.

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

Поступила в редакцию 27.05.2005

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