

УДК 533.9.07

Т.А. МАКСИМЕНКО, А.В. ЛОЯН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ МСПД НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Приведены результаты исследования разрядных и тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя малой мощности в зависимости от типа керамики применяемой для изготовления разрядной камеры. Исследовано два образца смеси нитрида бора и оксида кремния, а также четыре образца монокристалла оксида алюминия. Показано, что монокристалл Al_2O_3 по сравнению с $BN+SiO_2$ обладает низкой стойкостью к термоудару и его применение приводит к повышению разрядного тока и снижению тяги, и для его применения в целях повышения ресурсных характеристик двигателя необходимо проводить дополнительные исследования.

Ключевые слова: *стационарный плазменный двигатель, разрядная камера, керамика.*

Введение

В настоящее время в свете миниатюризации и увеличения надежности электроники аппаратуры спутниковых систем значительно расширяется круг задач, решаемых при помощи микроспутников. Однако до сих пор остается нерешенной проблема разработки систем активной коррекции и поддержания орбиты малых космических аппаратов ввиду отсутствия надежных и эффективных двигательных установок с низким уровнем энергопотребления. Ввиду ограничений накладываемых на массу двигательной установки, большую часть которой составляет рабочее тело, стационарный плазменный двигатель (СПД) представляет собой перспективную кандидатуру, т.к. его удельный импульс составляет порядка 1500 с.

Кроме высокого удельного импульса и тягового к.п.д. к двигателю предъявляются требования по обеспечению ресурса на уровне нескольких тысяч часов, что возможно обеспечить лишь при применении специальных материалов для изготовления разрядной камеры (РК) двигателя.

Известны результаты исследований зависимости коэффициента распыления от энергии нормально падающих ионов для различных материалов [1], исходя из которых можно рекомендовать к использованию, с точки зрения обеспечения ресурса, такие материалы как нитрид бора, оксид алюминия.

По результатам испытаний на СПД-20МЗ скорость объемного распыления изолятора из монокристалла Al_2O_3 в 14 раз ниже, чем из АБН [2].

Однако также известно, что материал РК влияет на разрядные характеристики двигателя [3] в зна-

чительной мере за счет коэффициента вторичной электронной эмиссии [4].

Ранее проведенные исследования показали, что введение присадок в монокристалл Al_2O_3 позволяет получить разрядные характеристики не хуже чем для АБН, с точки зрения отношения суммарного ионного тока к разрядному [2].

Исходя из вышесказанного, было принято решение провести исследования влияния различных типов керамики, производимых на территории Украины, на основные интегральные характеристики СПД при уровне энергопотребления до 120 Вт.

Цель исследований. В ходе исследований необходимо определить влияние типа керамики изолятора РК на интегральные характеристики МСПД, оптимальный состав керамики для обеспечения эффективной работы двигателя, а также влияние технологических аспектов изготовления керамики на обеспечение цикличности запусков двигателя.

Результаты исследований

Исследования влияния материала РК проводились на СПД, разработанном в «ХАИ» СПД-20М (рис. 1), который показал хорошие параметры при потребляемой мощности на уровне 100 Вт [2, 5].

Испытания проводились в цилиндрической вакуумной камере из нержавеющей стали длиной 2,5 м и диаметром 1 м. Вакуумная установка позволяла получить предельный безмасляный вакуум $7 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. (при тарировке по воздуху) за счет применения турбомолекулярных насосов суммарной производительностью 7000 л/с. При суммарном массовом расходе ксенона через анод и катод до

0,4 мг/с, динамический вакуум ухудшался до $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Стенд снабжен тягоизмерительным устройством маятникового типа, оценочная погрешность которого при измеряемых тягах порядка 4 мН составляет не более 3%. Двухканальная система хранения и подачи рабочего тела обеспечивает массовый расход через катод (0,01-0,2 мг/с) и анод (0,2-1 мг/с), колебания расхода составляют не более 5%.

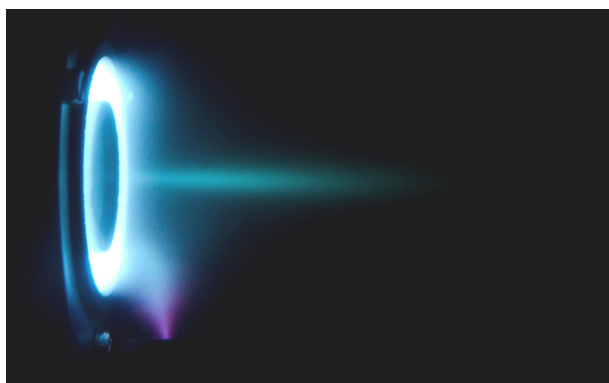


Рис. 1. Работающий СПД-20М

Для обеспечения экспериментов по изучению работы МСПД был разработан и изготовлен газоразрядный полый катод БНК М05.

При расходе 0,055 мг/с и рабочем токе 300 мА прикатодное падение потенциала не превышало 20 В. Предусмотрено использование электрода поддержки для обеспечения рабочей плотности тока на эмиттере.

Особое внимание уделялось положению катода относительно двигателя, т.к. ранее было показано его значительное влияние на параметры двигателя [6]. При исследовании различных типов керамики положение катода и массовый расход через него оставались неизменными.

Для исследований были выбраны различные типы керамики на основе смеси BN и SiO₂, а также монокристалла Al₂O₃ с добавкой TiO₂ для снижения вторичной электронной эмиссии (табл. 1).

Таблица 1

Различные типы керамики

№	Тип керамики
1	BN(65%)+SiO ₂ (35%)
2	BN(50%)+SiO ₂ (50%)
3	Al ₂ O ₃ (заряд «-»)
4	Al ₂ O ₃ (99,5%)+TiO ₂ (0,5%)(заряд «-»)
5	Al ₂ O ₃ (99%)+TiO ₂ (1%) (заряд «0»)
6	Al ₂ O ₃ (99%)+TiO ₂ (1%) (заряд «+»)

Исследования проводились при 3-х значениях анодного массового расхода: 0,26; 0,29; 0,33 мг/с

Диапазон варьирования разрядного напряжения составил 150..450В (ограничение по мощности разряда – 150Вт).

Ток в катушке намагничивания был фиксирован на значении, которое обеспечивало величину магнитной индукции в разрядной камере достаточной чтобы снизить разрядный ток без значительных потерь на намагничивание.

Перед началом измерений производился прогрев двигателя до выхода на стационар по тепловому состоянию.

Перед каждым экспериментом производилась тарировка тягоизмерительного устройства. Измерения тяги проводилось с проверкой «нуля» в каждой точке.

В ходе эксперимента проводились измерения разрядных и тяговых характеристик. Количество точек на характеристике составило 7, кратность измерений характеристик – 3.

По результатам измерений был проведен сравнительный анализ полученных данных. Далее на рисунках приводятся вольтамперные и тяговые характеристики двигателя для указанных типов керамики.

На рис. 2, 3 приведены вольтамперные и тяговые характеристики соответственно для анодного массового расхода 0,26 мг/с; на рис. 4, 5 – для 0,29 мг/с; на рис. 6, 7 - для 0,33 мг/с.

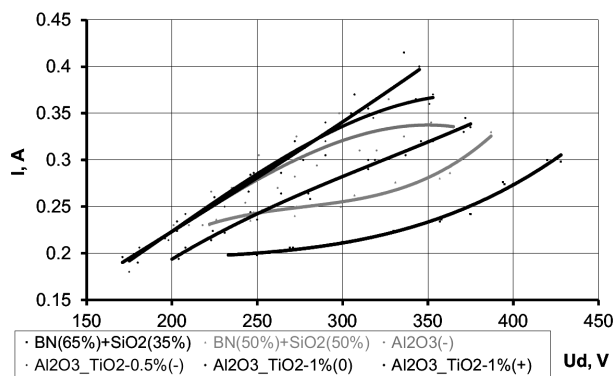


Рис. 2. Вольтамперные характеристики (0,26 мг/с)

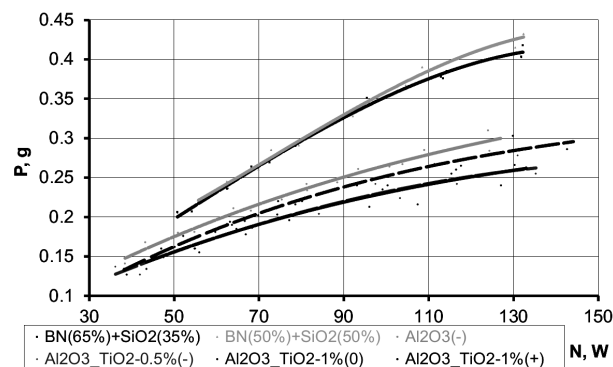


Рис. 3. Тяговые характеристики (0,26 мг/с)

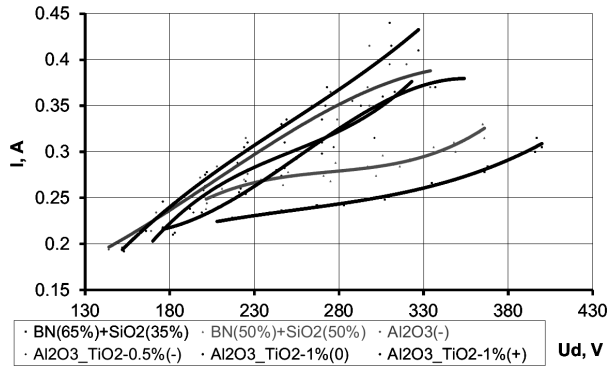


Рис. 4. Вольтамперные характеристики (0,29 мг/с)

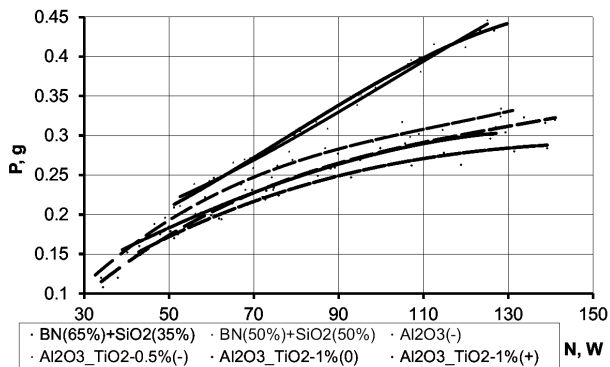


Рис. 5. Тяговые характеристики (0,29 мг/с)

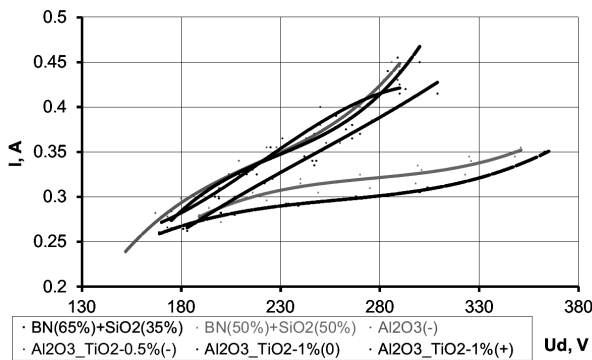


Рис. 6. Вольтамперные характеристики (0,33 мг/с)

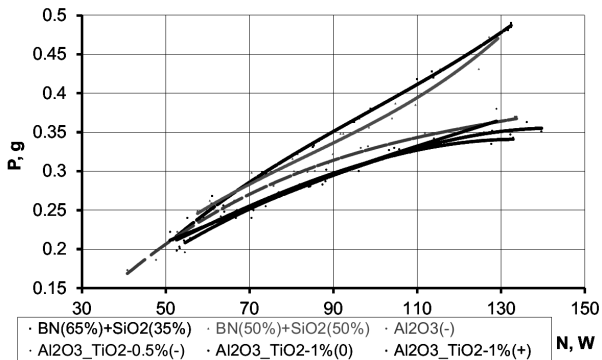


Рис. 7. Тяговые характеристики (0,33 мг/с)

Из полученных характеристик хорошо видно, что при применении монокристалла Al_2O_3 в качестве

материала стенок РК МСПД разрядный ток с увеличением напряжения быстро возрастает, а скорость увеличения тяги с ростом разрядной мощности снижается, что говорит о значительном сквозном электронном токе, который приводит к снижению тяговой эффективности двигателя. При использовании $BN+SiO_2$ на всех расходах скорость возрастания разрядного тока начинает увеличиваться лишь при повышенных напряжениях, что может быть связано с увеличением выделяемой тепловой мощности в двигателе. Характер зависимости тяги от мощности при этом практически монотонный.

Кроме снижения тяги и повышения разрядного тока при применении монокристалла Al_2O_3 в качестве материала стенок РК МСПД наблюдалась проблема их разрушения в процессе работы двигателя, в основном на первоначальном этапе запуска, что свидетельствует о низкой стойкости монокристалла Al_2O_3 к термоудару. В то же время в местах растрескивания керамики визуально наблюдался значительный локальный перегрев, что в свою очередь могло привести к ухудшению параметров двигателя. Все четыре образца в ходе испытаний были разрушены (рис. 8). При применении керамики из $BN+SiO_2$ таких эффектов не наблюдалось.

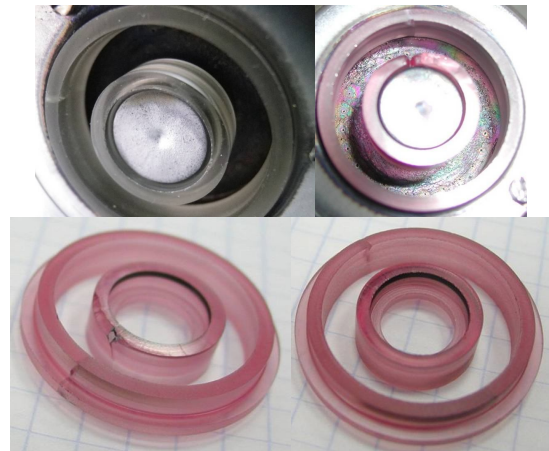


Рис. 8. Разрушение элементов РК из монокристалла Al_2O_3

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Отмечено существенное влияние типа керамики на интегральные характеристики МСПД. Применение керамики из Al_2O_3 приводит к возрастанию разрядного тока (до 50%) и снижению тяги (до 37%). Отмечена низкая стойкость Al_2O_3 к термоудару, что приводит к растрескиванию изолятора РК при выходе двигателя на режим.

С точки зрения тяговой эффективности МСПД целесообразно использовать для изолятора РК керамику из $BN+SiO_2$.

В продолжение данных работ необходимо исследовать эрозионные характеристики керамики из BN с различными добавками и прогнозировать ресурс МСПД, определить влияние соотношений BN и добавок на тяговые и ресурсные характеристики МСПД, исследовать причины негативного воздействия Al_2O_3 на тяговую эффективность МСПД с возможностью его устранения, исследовать возможность повышения стойкости Al_2O_3 к термоудару.

Литература

1. Семенов, А.А. Распыление потоками ионов поверхностей элементов конструкций ионно-плазменных источников [Текст] / А.А. Семенов, И.И. Шкарбан // Ракетно-космическая техника. – 1991. – Вып. 3 (131). – С. 42 – 53.

2. Loyan, A.V. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Effect Thruster [Electronic resource] / A.V. Loyan, T.A. Maksymenko. – Access mode: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007/index/IEPC-2007-100.pdf – 22.05.2012 г.

3. Kim, V. Investigation Of Operation And Characteristics Of Small Spt With Discharge Chamber Walls Made Of Different Ceramics [Electronic resource] / V. Kim, V. Kozlov, A. Skrylnikov, A. Veselovzorov. – Access mode: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA417041> – 22.05.2012 г.

4. Jolivet, L. Effects of the secondary electron emission on the sheath phenomenon in a Hall Thruster [Text] / L. Jolivet, J.-F. Roussel // 3rd International Spacecraft Propulsion Conference, Cannes, France, 10-13 October 2000. – P. 367-384.

5. Максименко, Т.А. Исследование эрозии разрядной камеры МСПД в ходе продолжительных ресурсных испытаний [Текст] / А.В. Лоян, Т.А. Максименко, О.П. Рыбалов, В.А. Подгорный // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 8(65). – С. 121-124.

6. Максименко, Т.А. Экспериментальное исследование влияния положения катода-компенсатора на интегральные характеристики МСПД [Текст] / А.В. Лоян, Т.А. Максименко, Н.Н. Кошелев, В.А. Федотенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10(57). – С. 96-99.

Поступила в редакцию 22.05.2012

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАТЕРІАЛУ РОЗРЯДНОЇ КАМЕРИ МСПД НА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Т.О. Максименко, А.В. Лоян

Наведено результати досліджень розрядних і тягових характеристик стаціонарного плазмового двигуна малої потужності в залежності від типу кераміки, що застосовується для виготовлення розрядної камери. Досліджено два зразки суміші нітриду бору та оксиду кремнію, а також чотири зразки монокристалу оксиду алюмінію. Показано, що монокристал Al_2O_3 у порівнянні з $BN+SiO_2$ має низьку стійкість до термоудару і його використання призводить до підвищення розрядного струму і зниженню тяги. Для його використання з метою підвищення ресурсних характеристик двигуна необхідно проводити додаткові дослідження.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, розрядна камера, кераміка.

INVESTIGATIONS OF LP SPT DISCHARGE CHAMBER MATERIAL ON ITS CHARACTERISTICS

T.A. Maksymenko, A.V. Loyan

Investigation results of discharge and thrust characteristics of low power Hall thruster in dependence of ceramics used for discharge chamber manufacturing are described. Two specimens of boron nitride and silicon oxide mixture and four specimens of aluminum oxide monocrystal were investigated. It was shown that Al_2O_3 monocrystal in comparison with $BN+SiO_2$ has low resistance for thermal shock. Using Al_2O_3 monocrystal results discharge current increasing and thrust decreasing. It is necessary perform additional investigation for using Al_2O_3 monocrystal with purpose of thruster lifetime increasing.

Key words: stationary plasma thruster, discharge chamber, ceramic.

Максименко Тарас Александрович – н.с. кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: taras@d4.khai.edu.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, с.н.с. кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.