

УДК 629.7.087:538.4:001.2

С.Н. КУЛАГИН, А.В. ДРОБОТ, Л.Г. ДУБОВИК, В.П. БАБИЦКИЙ

Днепропетровский национальный университет, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОВОДИМОСТИ СТЕНОК РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния проводимости стенок разрядной камеры на эффективность холловского двигателя малой мощности при различных расходах рабочего тела (ксенона). Показано, что в рассмотренном диапазоне мощностей (40-160 Вт) использование проводящих полюсных наконечников приводит к увеличению КПД холловского двигателя по сравнению с двигателем с диэлектрическими наконечниками на ~1-2 %. При этом слой ионизации и ускорения смещается к аноду, а уровень колебаний возрастает.

микроспутник, холловский двигатель, интегральные характеристики, проводимость стенок разрядной камеры, полюсные наконечники, колебания, потенциал плазмы, спектр электромагнитных полей

Введение

В последнее время растет интерес к использованию космических аппаратов (КА) малой массы – микроспутников (МС), не требующих использования двигательных установок с большой тягой, позволяющих выполнять задачи, ранее решавшиеся с помощью КА большой и средней массы. Это связано с возможностью уменьшения массы космических аппаратов за счет миниатюризации электронных приборов. Применение микроспутников требует разработки соответствующих подсистем, в том числе двигательных.

Как вариант, может быть рассмотрена электрореактивная двигательная установка (ЭРДУ) на базе холловского двигателя (ХД).

Формулирование проблемы. Главной проблемой, сдерживающей использование ЭРДУ на борту МС, является слабая энерговооруженность микроспутников. Так, полная потребляемая мощность МС может составлять 100-300 Вт для околоземных орбит и 300-650 Вт для длительных перелетов [1]. Соответственно мощность, которая может быть выделена для работы двигательной

установки, находится в диапазоне 50-200 Вт в зависимости от конкретной задачи.

Имеющийся опыт разработки ХД относится к диапазону мощностей 0,5–5,0 кВт. При изменении мощности и габаритов двигателей в этом диапазоне не происходит каких-либо качественных изменений в характере работы двигателя. При уменьшении мощности (менее 0,5 кВт) и габаритов можно ожидать появления некоторых масштабных факторов, которые будут оказывать влияние на характер работы и характеристики ХД.

Основными из этих факторов являются:

- опасность перехода в аномальный режим работы;
- необходимость уменьшения площади сечения разрядной камеры двигателя для обеспечения высокой степени ионизации при малых расходах рабочего вещества;
- нарушение оптимальной геометрии элементов магнитной системы и профиля магнитного поля, что приводит к нарушению фокусировки и снижению эффективности;
- возрастание роли краевых эффектов на границе плазма/стенка разрядной камеры двигателя и

увеличение потерь энергии на элементах конструкции;

– невозможность в полной мере применения в конструкции двигателя малого размера всех технических решений, обеспечивающих минимальную эрозию стенок разрядной камеры и высокую эффективность холловских двигателей.

В имеющихся на настоящий момент публикациях показана возможность получения КПД холловского двигателя 20–25 % при мощности ~100 Вт [2]. Увеличение эффективности двигателя до 30–40 % требует проведения исследований, направленных на совершенствование конструкции и оптимизацию рабочих процессов. Поэтому экспериментальные исследования возможности использования в ХД малой мощности способов, разработанных для улучшения характеристик двигателей средней и большой мощности, представляет несомненный интерес.

Решение проблемы

В работе [3] предлагается новая концепция холловского двигателя с разделением проводящего канала на несколько секций. Эта схема по сравнению с традиционной позволяет увеличить ресурс, уменьшить вторичную электронную эмиссию и снизить потери разрядной мощности, что приводит к увеличению КПД. Подтверждена принципиальная возможность создания ХД средней мощности с проводящим секционированным каналом при сравнительно высокой эффективности (около 60 %).

Постановка задачи исследований. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния проводимости стенок разрядной камеры (РК) в районе переднего среза на характеристики ХД малой мощности.

Результаты исследований. Конструктивная схема экспериментальной модели ХД с наружным диаметром РК 37 мм (условное название Д-37)

представлена на рис. 1, а распределение радиальной составляющей магнитной индукции по длине РК для различных сечений – на рис. 2.

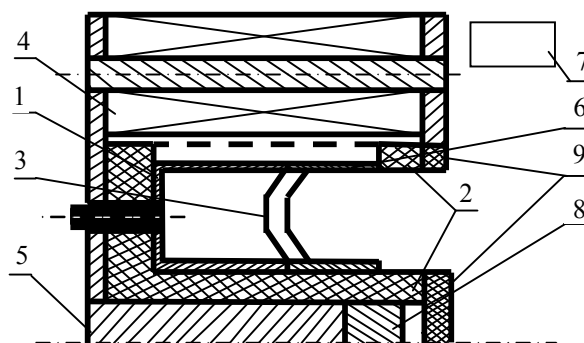


Рис. 1. Конструктивная схема Д-37:

- 1 – анод-газораспределитель; 2 – изоляторы; 3 – радиальные переемы; 4 – катушка намагничивания; 5 – магнитопровод; 6 – магнитный экран; 7 – катод-компенсатор; 8 – постоянный магнит; 9 – полюсные наконечники



Рис. 2. Распределение магнитного поля по длине РК ($L=12$ мм – передний срез двигателя)

Конструкция двигателя, включающая магнитный экран, выполняющий функции анода [4], позволяла менять полюсные наконечники при сохранении без изменений геометрии магнитной системы. В качестве материалов для изготовления наконечников с различной проводимостью использовались графит (проводник) и алюмонитрид бора АБН (диэлектрик).

В экспериментах снимались вольт-амперные и тяговые характеристики при расходах рабочего тела

(ксенона) в диапазоне 0,28-0,87 мг/с при фиксированном токе катушки намагничивания. Ток катушки подбирался по минимуму тока разряда для расхода ксенона $\dot{m}=0,53$ мг/с (среднее значение из указанного диапазона) при напряжении 150 В. Зависимость тока разряда I_p от тока катушки I_k представлена на рис. 3, из которого видно, что при токе катушки в диапазоне 2-8 А ток разряда остается практически неизменным.

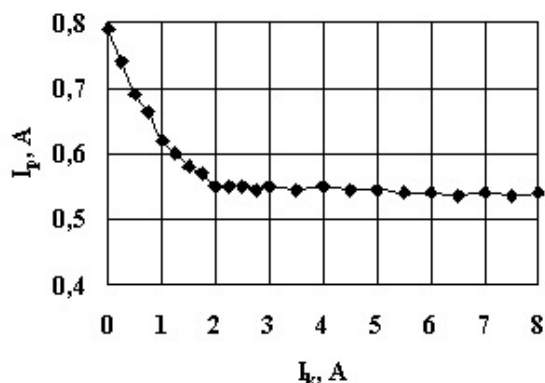


Рис. 3. Зависимость тока разряда от тока катушки

Так как оптимальный ток катушки зависит от расхода рабочего тела и разрядного напряжения [5], для проведения дальнейших исследований ток катушки выбран "с запасом" и составлял 3 А, что уменьшало влияние магнитной индукции на характеристики двигателя при изменении расхода и напряжения. Это позволило проводить все эксперименты при фиксированном значении магнитной индукции, что значительно упрощает сравнительный анализ характеристик, полученных при использовании проводящих и диэлектрических полюсных наконечников.

Для различных материалов полюсных наконечников при токе катушки 3 А и напряжении разряда $U_p=150$ В получены зависимости тока разряда и тяги от расхода рабочего тела (рис. 4, 5), а также зависимости тягового КПД η от потребляемой мощности при тех же расходах ксенона (рис. 6).

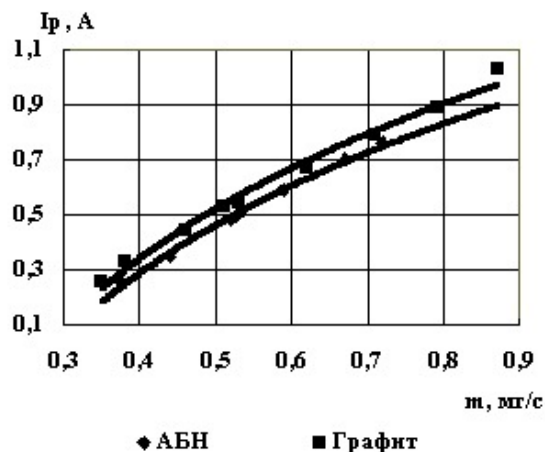


Рис. 4. Зависимость тока разряда двигателя Д-37 от расхода

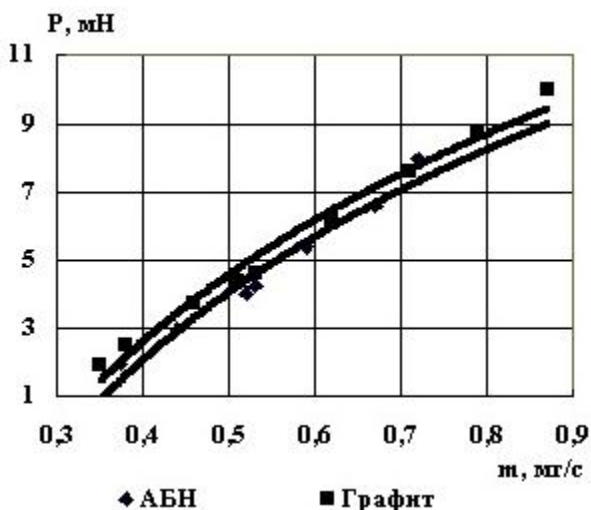


Рис. 5. Зависимость тяги двигателя Д-37 от расхода

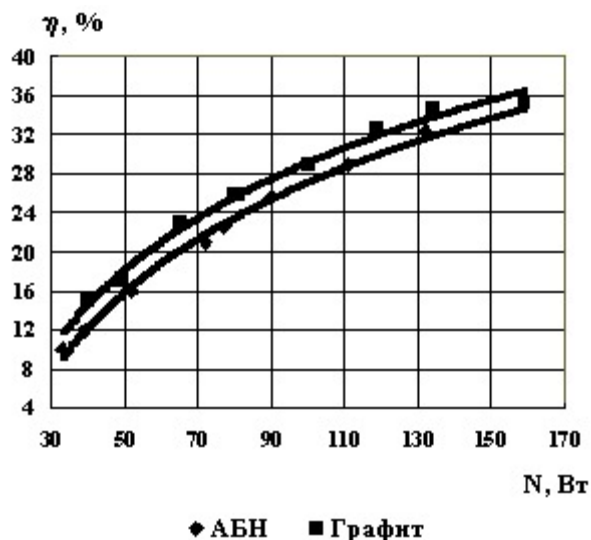


Рис. 6. Зависимость тягового КПД двигателя Д-37 от мощности

Как видно из рис. 4, 5 ток разряда и тяга для графитовых полюсных наконечников больше, чем для наконечников из АБН. При этом КПД двигателя с проводящими полюсными наконечниками оказывается выше (рис. 6).

Зондовые измерения потенциала плазмы (зонд вводился через заднюю стенку РК) показали, что при использовании проводящих наконечников потенциал плазмы на выходе из анода падает «быстрее», чем в случае диэлектрических, что приводит к смещению слоя ионизации и ускорения в сторону анода. Это можно объяснить «замыканием» слоев плазмы с различным потенциалом проводящими стенками РК.

Измерения спектра электромагнитных полей, генерируемых работающим двигателем, производилось при помощи штыревой антенны, расположенной в непосредственной близости от переднего среза двигателя. Проведенные измерения показали, что в исследованном диапазоне частот (0-1 МГц) спектральный состав электромагнитных колебаний при смене полюсных наконечников меняется незначительно. Однако амплитуда колебаний при использовании проводящих наконечников увеличивается на 18-20 дБ.

Заключение

Проведенные исследования показали, что в рассмотренном диапазоне мощностей (40-160 Вт) использование проводящих полюсных наконечников приводит к увеличению КПД холлового двигателя по сравнению с двигателем с диэлектрическими на-

конечниками на ~1-2 %. При этом слой ионизации и ускорения смещается к аноду. Спектральный состав колебаний изменяется незначительно, но их амплитуда увеличивается на 18-20 дБ.

Литература

1. Bugeat I., Koppel C. Development of a second generation of SPT // 24 th International Electric Propulsion Conference. IEPC 95-35. – Moscow, September, 1995. – P. 995-997.
2. Small SPT Unit Development and Tests / B. Arkhipov, V. Kim, A. Koryakin, V. Murashko, A. Nesterenko, A. Skrylnikov // 3th International Conference on Spacecraft Propulsion. ESA SP-465. – Cannes, France, 2000. – P. 399-401.
3. Zhakupov A., Khartov S., Latyshev L. Hall Thruster With a Sectioned Conducting Channel // Proc. 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion. ESA SP-465. – Cannes, France, 2000. – P. 277-279.
4. Деклараційний пат. 69865 Україна, МКІ F03H1/00. Плазмовий холовський двигун малої потужності / С.М. Кулагін, Л.Г. Дубовик, Ю.В. Манець.- № 20031211412; Заявл. 11.12.03; Опубл. 15.09.04, Бюл. № 9. – 3 с.
5. Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И. Стационарные плазменные двигатели. – Х.: ХАИ, 1989. – 316 с.

Поступила в редакцию 24.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.