

УДК 533.9.07

А.В. ЛОЯН, Т.А. МАКСИМЕНКО, Н.Н. КОШЕЛЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В КАНАЛЕ МСПД ПРИ ПОВЫШЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ РАЗРЯДА

Рассмотрена возможность повышения удельного импульса стационарного плазменного двигателя малой мощности (МСПД) за счет повышения разрядного напряжения. Описана методика зондовых измерений в канале высоковольтного МСПД. Разработаны лабораторная модель МСПД и установка для зондовых измерений внутри разрядного канала (РК) двигателя. Приведены результаты экспериментальных исследований распределения параметров плазмы в РК МСПД при повышенных значениях разрядного напряжения (более 300 В). Исследовано изменение расположения зон ионизации и ускорения в РК МСПД в зависимости от разрядного напряжения и массового расхода.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, удельный импульс, зондовые измерения.

Введение

Холловские двигатели прочно заняли свою нишу как удачное решение в области ЭРД и активно используются в системах коррекции орбиты с момента своего внедрения в 60х XX века. На сегодняшний день они не теряют своей актуальности и остаются объектом научного исследования. Ведущие мировые производители ракетно-космической техники работают над задачами повышения к.п.д., а также повышения удельного импульса [1, 2] и снижения потребляемой мощности [3, 4], т.к. это позволит значительно расширить область применения двигателей данного типа.

МСПД СПД-20М, разработанный в «ХАИ», обладает достаточно высокими характеристиками в сравнении с мировыми аналогами: тяговый к.п.д. достигает 38% при потребляемой мощности около 100 Вт (с учетом магнитной системы и катода), тяга при этом составляет 4 мН [5], ресурс двигателя составляет 4000 часов и может быть увеличен за счет применения специальных типов керамики для изготовления РК [6]. Данная модель была выбрана для исследования возможности повышения удельного импульса МСПД.

Повышение удельного импульса МСПД вынуждает повышать разрядное напряжение, что влечет за собой снижение массового расхода для снижения разрядного тока. Это, в свою очередь, может привести к снижению к.п.д. двигателя за счет изменения в распределении зон ионизации и ускорения в РК. В данном случае необходимо проводить исследования параметров плазмы в РК, для чего применяются как зондовая диагностика [7], так и лазерно индуцированная флуоресценция [4] и др. Нами был

выбран первый метод, как наиболее уместный при столь малом типоразмере двигателя.

Цель исследований. Рассмотреть возможность повышения удельного импульса МСПД за счет повышения разрядного напряжения. Разработать методику зондовых измерений в канале высоковольтного МСПД. Экспериментально исследовать распределения параметров плазмы в РК МСПД при повышенных значениях разрядного напряжения (более 300 В). Исследовать расположение зон ионизации и ускорения в РК МСПД в зависимости от разрядного напряжения и массового расхода.

Технология зондовых измерений в канале высоковольтного микро СПД

Получение параметров плазмы в канале микро СПД является сложной задачей. Причина этого находится в возмущении плазмы в узком канале двигателя конструктивными элементами зонда, что приводит к неустойчивой работе СПД и срыву разряда. Одна, может быть единственная, возможность провести измерения – это использовать метод стреляющего малогабаритного зонда. Принцип этого метода заключается в быстром (менее 1 сек.) перемещении зонда в исследуемом пространстве и производством измерительных процедур. Получение традиционных вольтамперных характеристик зонда в этом случае затруднительно по причинам высоких градиентов параметров плазмы в канале СПД. Поэтому предлагается иной метод измерения, основанный на следующих постулатах.

Зонд, нагретый до такой температуры, при которой наблюдается заметная термоэмиссия, используется для определения потенциала пространства.

Для этого измеряются характеристики одного и того же зонда в горячем и холодном состояниях. Та точка, в которой эти характеристики расходятся, соответствует потенциалу пространства. Этот метод основан на нижеследующих допущениях.

Если потенциал зонда отрицателен по отношению к потенциалу пространства, то ток эмиссии течет в направлении, противоположном хаотическому току, и полный ток на зонд меньше, чем полный ток холодного зонда при том же самом потенциале в предположении, что электронный ток холодного зонда больше ионного тока.

При потенциалах зонда, близких к потенциалу пространства, в плазму перед зондом будет дрейфовать лишь немного электронов.

При увеличении потенциала зонда до величин, намного более положительных, чем потенциал пространства, эмиссия подавляется, поскольку тормозящее поле возвращает эмитированные электроны на поверхность зонда, и зондовые токи холодного и горячего зонда становятся равными [8].

Для использования этого эффекта, зонд изготавливался из танталовой проволоки (0,08 мм) и нагревался до высокой температуры (~ 2000° С) и измерялся плавающий потенциал. Полученная характеристика напряжения от координаты зонда соответствует распределению потенциала плазмы в пространстве.

Для оценки концентрации электронов в канале СПД методом стреляющего зонда предлагаем использовать формулу Боба.

$$I_+ = 0,4n_0e \left(\frac{2kT_e}{m_+} \right)^{1/2} S.$$

Из формулы видно, что концентрация прямо пропорциональна ионному току насыщения, и поэтому может быть оценена с точностью до корня из температуры. Ошибка определения концентрации при этом не превысит пол порядка. Таким образом, подавая на стреляющий зонд небольшой отрицательный потенциал и измеряя протекающий через него ток (ионный), получаем изменение в пространстве концентрации электронов.

Оценка температуры электронов производилась с помощью выражения [9]:

$$U_{пл} = U_0 + T_e \ln \left[\left(\frac{e}{\sqrt{4\pi}} \right) \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right].$$

Из формулы видно, что разница потенциалов нагретого и холодного зонда пропорциональна температуре электронов.

Как видно из предложенной методики, наиболее точно измеряется потенциал плазмы. Результаты измерений концентрации и температуры электронов наиболее искажены в зоне максимального магнит-

ного поля [10]. Однако использование полученных результатов для сравнительного анализа режимов двигателя является полезной информацией.

Оборудование и схема эксперимента

Для проведения исследований на базе ранее описанного двигателя СПД-20М была разработана лабораторная модель, позволяющая вводить зонд в РК со стороны анода и перемещать к срезу двигателя (рис. 1). Такое введение зонда позволяет производить исследование прианодной области без возмущений в зоне ионизации и ускорения.

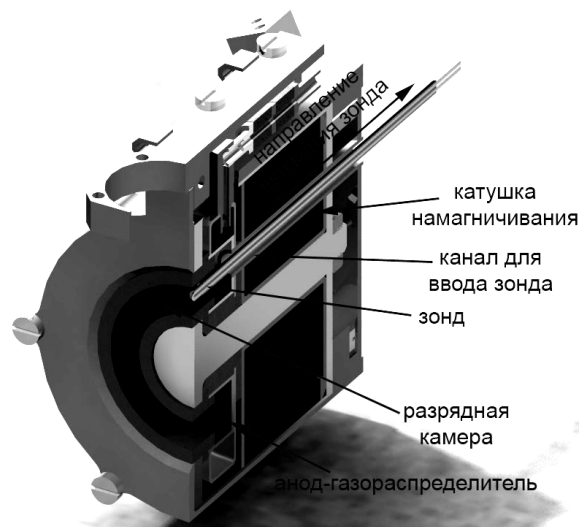


Рис. 1. Схема МСПД для зондовых измерений плазмы внутри РК

Также было разработано устройство для перемещения зонда (рис. 2), обеспечивающее равномерное движение вдоль РК. Скорость движения зонда составила 86,4 мм/с, время нахождения зонда в РК при этом около 110 мс.



Рис. 2. Устройство для перемещения зонда внутри РК МСПД

Для измерения потенциала плазмы применялся накальный эмиссионный зонд. В качестве державки зонда применялась алундовая «соломка» диаметром 1,2 мм, сам зонд был выполнен из танталовой проволоки диаметром 0,08 мм. Также измерялся плавающий потенциал и ионный ток насыщения при помощи того же зонда в холодном состоянии.

Зонд перемещался вдоль центра РК, схема которой представлена на рис. 3.

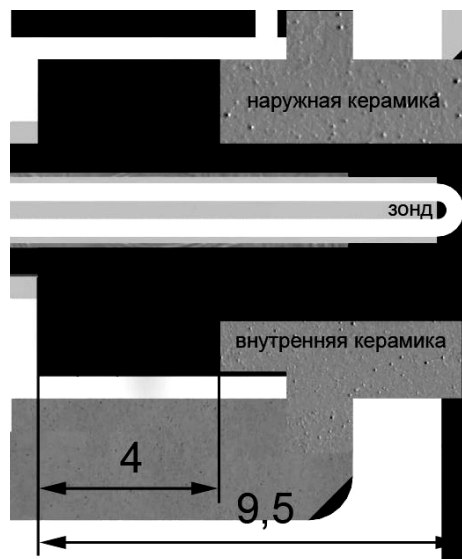


Рис. 3. Схема области перемещения зонда

Сигнал с зонда измерялся при помощи цифрового запоминающего осциллографа Tektronix DPO 3052. Период нахождения зонда в РК (глубина 9,5 мм) фиксировался при помощи сигнала с концевого выключателя.

Результаты измерений

В ходе эксперимента варьировались значения массового расхода при фиксированной мощности разряда (рис. 4). Максимальное значение магнитного поля на срединной поверхности РК составляло 33 мТл.

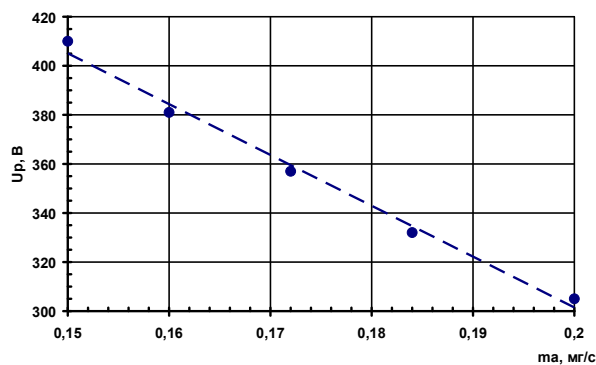


Рис. 4. Зависимость разрядного напряжения от массового расхода при фиксированной мощности разряда

Видно, что исследованном диапазоне наблюдается линейное возрастание напряжения со снижением массового расхода.

Также варьировалось разрядное напряжение при фиксированном массовом расходе. Вольт-амперная характеристика представлена на рис. 5.

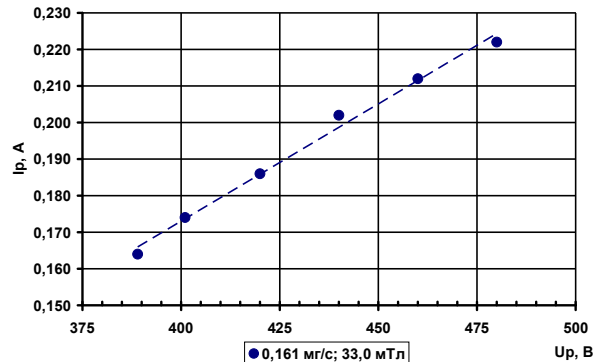


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика МСПД

Хорошо видно, что с увеличением разрядного напряжения разрядный ток монотонно возрастает. Это явление может быть связано с увеличением потока ионов на стенки РК вблизи выхода, что вызывает перегрев керамики и более интенсивное ее распыление.

В результате проведенных измерений были получены распределения плавающего потенциала (рис. 6) и потенциала плазмы (рис. 7) вдоль РК.

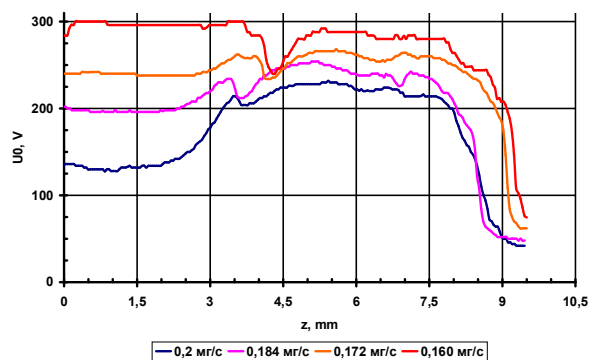


Рис. 6. Распределение плавающего потенциала вдоль РК

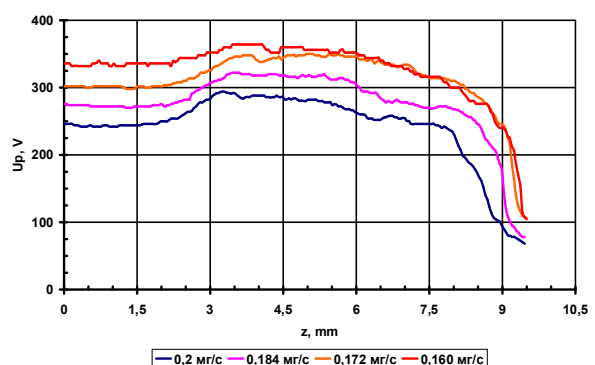


Рис. 7. Распределение потенциала плазмы вдоль РК

Исследования распределения потенциала плазмы вдоль РК показали следующее:

- с уменьшением расхода и увеличением разрядного напряжения возрастает потенциал плазмы в канале;

- наблюдается присутствие характерных зон ионизации и ускорения в РК на всех режимах;

- в прианодной зоне наблюдается пониженное значение потенциала плазмы;

- при повышении напряжения зона ускорения сужается (что говорит о повышении напряженности электрического поля) и смещается к выходу РК.

В результате анализа, выполненного по описанной методике, были получены распределения температуры электронов вдоль РК (рис. 8).

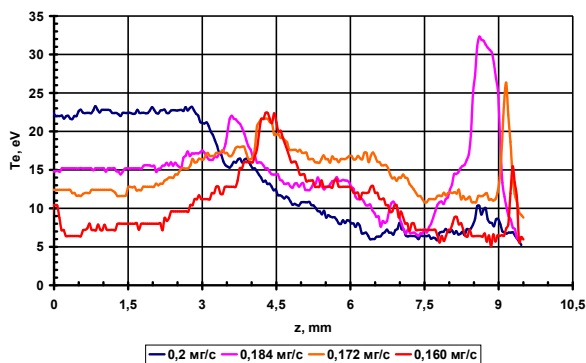


Рис. 8. Распределение температуры электронов

Из полученных зависимостей видно следующее:

- наблюдается характерный экстремум по температуре электронов в зоне ускорения;

- положение пика температуры электронов может колебаться в пределах 1 мм от среза РК;

- значение максимальной температуры электронов может изменяться в зависимости от режима в диапазоне от 10 до 32 эВ;

- наблюдается заметное изменение температуры электронов вдоль РК при пересечении зондом границы анод-изолятор.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Разработанные методика измерений, модель МСПД и устройство для перемещения зонда позволяют проводить исследования распределения параметров плазмы вдоль РК.

Исследования, проведенные при помощи зондовых измерений в РК МСПД, показали, что с уменьшением расхода и увеличением разрядного напряжения возрастает потенциал плазмы в канале. Наблюдается присутствие характерных зон ионизации и ускорения в РК на всех режимах. Однако при

повышении напряжения зона ускорения сужается и смещается к выходу РК. Пиковое значение температуры электронов приходится на зону ускорения и может колебаться от 10 до 32 эВ. Положение пика температуры электронов может колебаться в пределах 1 мм от выхода РК.

Для получения лучшего представления о процессах, происходящих в МСПД, необходимо продолжить исследования при помощи одиночного зонда в РК на более высоких напряжениях, однако при этом необходимо уделить внимание профилю РК а также оптимизации конфигурации магнитного поля для высоковольтных режимов с целью снижения эффекта возрастания разрядного тока, который приводит к снижению к.п.д. Провести исследования эрозионных характеристик двигателя на высоковольтных режимах.

Литература

1. Pinero, Luis R. *Integration Testing of a Modular Discharge Supply for NASA's High Voltage Hall Accelerator Thruster* [Текст] / Luis R. Pinero, Hani Kamhawi, Geoff Drummond // TM-2010-216111.-IEPC-2009-275., February [2009].
2. Hofer, Richard R. *High Specific Impulse Hall Thrusters, Part 1: Influence of Current Density and Magnetic Field* [Текст] / Richard R. Hofer, Alec D. Gallimore, Robert S. Jankovsky // *Journal of Propulsion and Power*.-Jul-Aug [2006]. – Vol.22, №4. – P. 721-731.
3. *Optimization on Magnetic Field and Acceleration Channel For Low Power Hall Thrusters* [Текст] / Hirokazu Tahara, Takashi Fujioka, Takahisa Kitano, Atsushi Shirasaki, Takao Yoshikawa, Kenji Fuchigami, Fujio Iinoya, Fumihiko Ueno // 28th Int. Electric Propulsion Conference, Toulouse, France, 17-21 March. [2003]. – IEPC2003-015.
4. Hargus, W.A. *Ion Velocity Measurements Within the Acceleration Channel of a Low-Power Hall Thruster* [Текст] / W.A. Hargus, M.R. Nakles // *Plasma Science, IEEE Transactions on*. – 2007. – №5(36). – С. 1989-1997.
5. Loyan, A.V. *Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Effect Thruster* [Текст] / A.V. Loyan, T.A. Maksymenko // 30th Int. Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 16-20 Sept. [2007]. – IEPC2007-100.
6. *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.
7. *Recent Results From Internal and Very-Near-Field Plasma Diagnostics of a High Specific Impulse Hall Thruster* [Текст] // 28th Int. Electric Propulsion

Conference, Toulouse, France, 17-21 March. [2003]. – IERCS2003-037.

8. Методы исследования плазмы [Текст]/ под ред. В. Лохте-Хольтгрейва. – М.: Мир, 1971. – 126 с.

9. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда [Текст]: учеб. пособие к самостоятельной работе

студентов и аспирантов / Ю.П. Райзер. – М.: Мир, 1981. – 536 с.

10. Алексеев, В.В. Зондовый метод диагностики плазмы [Текст] / В.В. Алексеев, В.А. Котельников. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 239 с.

Поступила в редакцию 3.06.2011

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ В КАНАЛІ МСПД ПРИ ПІДВИЩЕНИХ НАПРУГАХ РОЗРЯДУ

А.В. Лоян, Т.О. Максименко, М.М. Кошелев

Розглянуто можливість підвищення питомого імпульсу стаціонарного плазмового двигуна малої потужності (МСПД) за рахунок підвищення розрядної напруги. Описано методику зондових вимірювань в каналі високовольтного МСПД. Розроблено лабораторну модель МСПД и установку для зондових вимірювань всередині розрядного каналу (РК) двигуна. Наведено результати експериментальних досліджень розподілу параметрів плазми в РК МСПД за підвищених значеннях розрядної напруги (більше 300 В). Досліджено зміну розміщення зон іонізації і прискорення в РК МСПД в залежності від розрядної напруги і масових витрат.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, питомий імпульс, зондові вимірювання.

INVESTIGATIONS OF PLASMA PARAMETERS IN DISCHARGE CHAMBER OF LOW-POWER SPT AT HIGH VOLTAGE DISCHARGE

A.V. Loyan, T.A. Maksymenko, N.N. Koshelev

Possibility of low-power stationary plasma thruster (LP SPT) specific impulse increasing at the expense of discharge voltage increasing is described. The methodic of probe measurements inside high-voltage LP SPT is shown. Laboratory model of LP SPT and devise for probe measurements inside thruster are developed. Results of experimental investigations of plasma parameters distributions provided high-level of discharge voltage (more than 300V) are given. Location of ionization and acceleration zones provide discharge voltage and mass flow rate are investigated.

Key words: stationary plasma thruster, specific impulse, probe measurements.

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

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

Кошелев Николай Николаевич – ст. научн. сотр. кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.