

УДК 629.78

А.М. ЧЕРКУН

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина***МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДВОЙНОГО ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ НА ГАЗОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛОГО КАТОДА**

Практически во всех типах электрореактивных двигателях применяют катод. Он играет основную роль в организации процессов получения и нейтрализации ионов. Его параметры существенно влияют на ресурс, надежность и энергетическую эффективность двигателя. Двойной слой образуется в отверстии диафрагмы катода и определяет ток электронов и ионов через нее, оказывает существенное влияние на характеристики катода. Изучение этого влияния является важной и актуальной проблемой, требующей детальных экспериментальных исследований. В статье приведена методика исследования влияния двойного слоя на газовую эффективность полого катода с внутренним разрядом.

Ключевые слова: электрореактивный двигатель, полый катод, вспомогательный разряд, двойной плазменный слой, газовая эффективность, цена электрона.

Введение

В ближайшее время ожидается значительное увеличение разнообразия и числа задач, для решения которых будут необходимы электрореактивные двигатели (ЭРД) различных типов, обладающих широким набором требуемых параметров. Актуально применение ЭРД для решения задач коррекции орбиты, изменения высоты и наклона орбиты, перевода с низких на высокие орбиты, а также осуществление межпланетных перелетов. Основным преимуществом ЭРД является их высокий удельный импульс, превышающий аналогичный показатель химических двигателей на порядок и выше. Это ведет к значительному сокращению требуемых запасов рабочего тела [1].

Катод как источник электронов играет определяющую роль в организации рабочих процессов получения и ускорения плазмы, ионов и нейтрализации во всех (за исключением электронагревных двигателей (ЭНД) с резистивным (омическим) нагревом рабочего тела) современных типах ЭРД [1, 2]. Именно поэтому они в большей степени определяют стабильность параметров и диапазон устойчивой работы ЭРД, ресурс и надежность, динамические характеристики (время и количество запусков) и значительно влияют на энергетическую и газовую эффективность и эксплуатационные свойства двигателей в целом.

Постановка задачи

Около 10 % расхода рабочего тела ЭРД проходит через полый катод. Этот расход снижает удельный импульс двигательной установки, так как не

учувствует в создании тяги. Определение всех факторов влияющих на эффективность работы катодов является важной задачей с точки зрения обеспечения эффективности работы двигательной установки в целом. Одним из явлений влияющих на течение частиц плазмы через диафрагму полого катода является двойной плазменный слой. Исследование влияния двойного плазменного слоя на характеристики полого катода является важной и нерешенной в настоящее время задачей.

Обзор публикаций

Полый катод представляет собой цилиндрическую трубку с диафрагмой через которую пропускается расход инертного газа, который в дальнейшем ионизуется. Наличие диафрагмы в полом катоде ЭРД приводит к изменению геометрических размеров плазменного столба. Резкое сужение плазменного столба приводит к пространственному разделению зарядов [3]. В зоне отверстия образуется двойной плазменный слой.

Двойной слой (рис.1) разделяет всю популяцию частиц плазмы внутри полого катода на 4 сорта: свободные электроны и ионы, которые могут преодолевать потенциальный барьер двойного слоя и переносят ток через него; и частицы, запертые в двойном слое, которые образуют в нем электрическое поле [4]. Таким образом, двойной слой, образованный в отверстии диафрагмы катода определяет ток электронов и ионов через нее. Электрическое поле внутри двойного слоя ускоряет электроны из внутрикатодной плазмы в столб внешнего разряда. Ионы из внешнего столба плазмы ускоряются в про-

тивоположном направлении, то есть внутрь катода. Формирование двойного слоя в отверстие полого катода оказывает существенное влияние расходные характеристики катода.

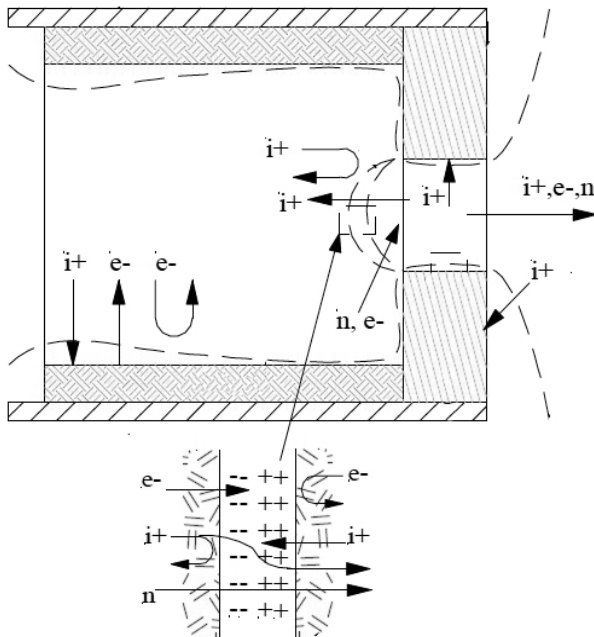


Рис. 1. Схема полого катода с двойным слоем

Современные полые катоды работают при давлении 1 – 10 мм рт.ст. (классическая схема построения катода) и 10⁻³ – 1 мм рт.ст (катод с внутренним разрядом). При таких давлениях и геометрии, характерной для полого катода, число Кнудсена изменяется в широком диапазоне 10⁻² – 10⁴. В полости катода наблюдаются переходный и свободномолекулярный режимы течения жидкости.

В таких условиях предположение о сплошности среды не выполняется, уравнения Навье-Стокса не позволяют получить корректные решения. Для расчета характеристик истечения применяют эмпирические данные, полуэмпирические выражения

теории диффузии газов, используют более общее уравнение Больцмана.

С развитием компьютерных технологий стало возможным применение численных методов исследования потоков сильно разреженных газов. Для диапазона 0,1 < Kn < 100 наиболее распространенным является метод прямого моделирования предложенный Г.А. Бердом [5]. Суть метода заключается в аппроксимации уравнения Больцмана первого порядка, применение прямого метода Монте-Карло. Метод Монте-Карло позволяет учитывать взаимодействия частиц в плазме (столкновения, ионизация). Однако учет влияние двойного слоя на движение частиц через диафрагму полого катода является более комплексной задачей. К тому же для реализации метода Берда требуется значительная мощность вычислительной техники. Это ограничивает его применение при выполнении инженерных расчетов.

Применение подобных методов для расчета течения в полой катоде не дает полную картину движения плазмы вследствие существенного ионного и электронного давления, перераспределения потока частиц под влиянием скачка потенциала в двойном плазменном слое.

В статье [6] приведены результаты исследования зависимости газовой эффективности и цены электрона катода с вспомогательным разрядом в диапазоне давлений 10⁻² – 1 мм.рт.ст (рис. 2). Исследования проводились, используя разработанную ранее методику расчета [7]. Параметры эмиттера и соответствующее значение плотности эмиссионного тока находились для оптимальной температуры. Это обеспечивает минимальное энергопотребление катода. Установлено, что заданный разрядный ток необходимо получать, применяя катод с вспомогательным разрядом, при минимальном давлении в полости (~10⁻² мм.рт.ст.) [6]. При этом газовая эффективность максимальна, а рост потребляемой мощности незначительный.



Рис. 2. Зависимость газовой эффективности полого катода от давления в его полости

Для определения влияния двойного плазменного слоя на характеристики полого катода в диапазоне давлений в полости 10-3 – 10 мм рт.ст. необходимы детальные экспериментальные исследования.

Планируемая методика эксперимента

Исследование влияние двойного слоя в диафрагме полого катода планируется разделить на следующие этапы.

На первом этапе предполагается получение расходных характеристик катода в диапазоне давлений в полости 10-2-10 мм рт.ст. при различных диаметрах отверстия диафрагмы.

На втором этапе снятие расходных характеристик производится с работающим по диодной схеме

катодом (рис. 3). При помощи натекателя фиксируется секундный массовый расход плазмообразующего газа через полый катод. Для измерения давления в полости используется манометрический термопарный преобразователь (ПМТ-2).

При фиксированных значениях тока и напряжения внутреннего разряда снимается вольтамперная характеристика внешнего разряда. При этом колебания параметров плазмы в области диафрагмы полого катода снимаются с помощью зондов Ленгмюра.

Далее снятие вольтамперных характеристик внешнего разряда производится для различных значений расхода плазмообразующего и диаметров отверстия диафрагмы газа при фиксированных параметрах внутреннего разряда.

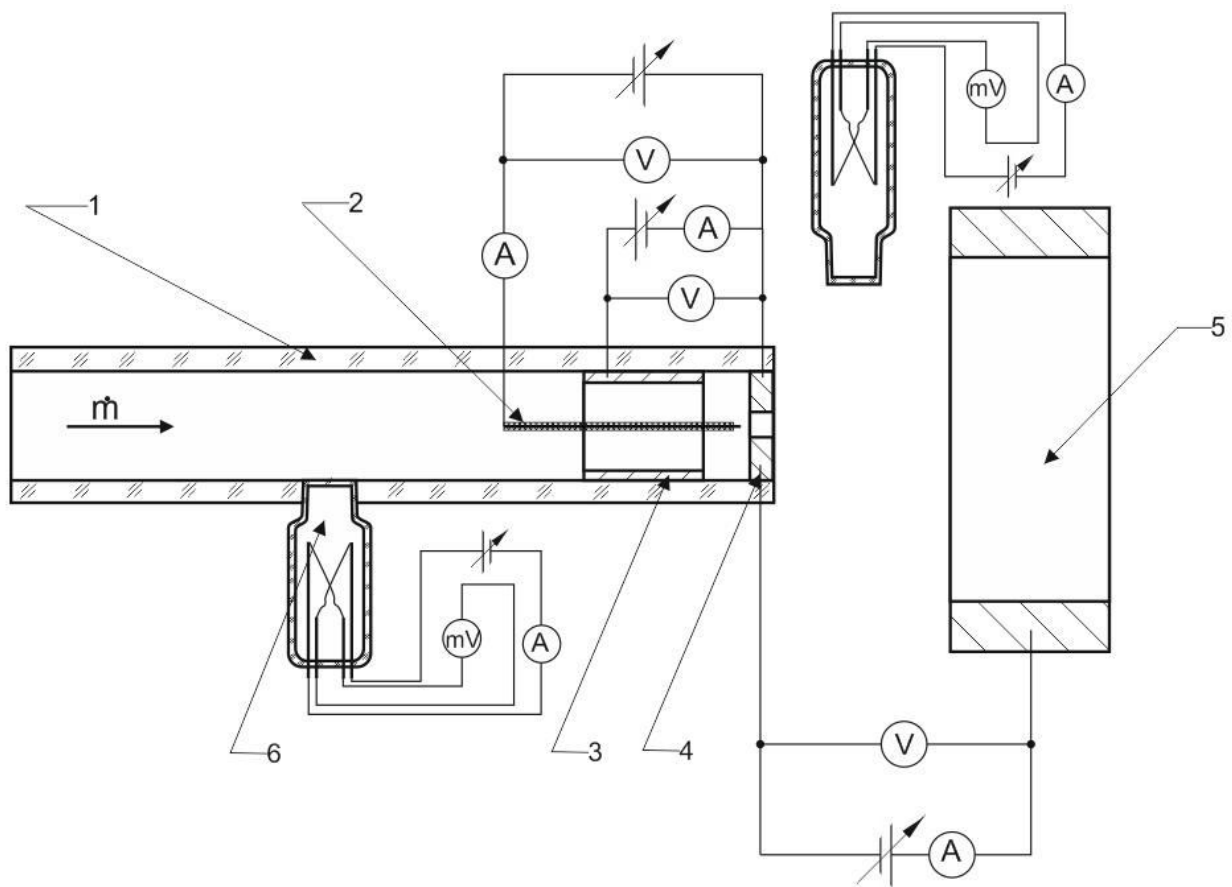


Рис.3. Схема экспериментальной установки. 1 – кварцевая трубка, 2 – зонд Ленгмюра, 3 – анод внутреннего разряда, 4 – катод внешнего и внутреннего разряда, 5 – анод внешнего разряда, 6 - преобразователь манометрический термопарный (ПМТ-2).

Таким образом каждому значению секундного расхода будет поставлено в соответствие значение диаметра отверстия диафрагмы, параметры внутреннего разряда, зондовые характеристики плазмы в области отверстия диафрагмы и вольтамперная характеристика внешнего разряда.

На третьем этапе расходная характеристика снимается при постоянных параметрах источника

питания внешнего разряда, варьируя параметрами внутреннего разряда.

На третьем этапе каждому значению расхода будет поставлено в соответствие значение диаметра отверстия диафрагмы, параметры внешнего разряда, зондовые характеристики плазмы в области отверстия диафрагмы и вольтамперная характеристика внутреннего разряда.

Заключение

Полый катод является важным компонентом электрической цепи ЭРД, наиболее теплонапряженным узлом двигателя и во многом определяет надежность, эффективность и ресурс двигателя.

Повысить эффективность работы полого катода можно за счет уменьшения давления в его полости. Двойной слой образуется в отверстии диафрагмы катода и определяет ток электронов и ионов через нее, оказывает существенное влияние на характеристики катода. Вопрос о влиянии двойного слоя на характеристики полого катода ЭРД в настоящее время является актуальной и нерешенной задачей.

В статье приведена методика исследования влияния двойного плазменного слоя на газовую эффективность полого катода с внутренним разрядом. Методика позволяет определить газовую эффективность полого катода при различных параметрах внешнего и внутреннего разряда в широком диапазоне рабочих давлений, установить наиболее оптимальные режимы работы катода с точки зрения газовой эффективности и цены электрона.

Литература

1. Гориков, О.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О.А. Гориков, В.А. Муравлёв, А.А. Шагайда; под ред. А.С. Корохеева. – М., 2008. – 280 с.
2. Гришин, С.Д. Плазменные ускорители [Текст] / С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов. – М.: Машиностроение, 1989 – 216 с.
3. Грановский, В.Л. Электрический ток в газе [Текст] / В.Л. Грановский. – М., 1971. – 526 с.
4. Andrews, J.G. Theory of a Double Sheath between Two Plasmas [Text] / J.G. Andrews, J.E. Allen // Proc. R. Soc. Lond. A January 5, 1971. – P. 459 – 472
5. Bird, G.A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows / G.A. Bird. – Oxford: Clarendon Press, 1994. – 458 p.
6. Хитко, А.В. Оценка эффективности работы полого катода с вспомогательным разрядом [Текст] / А.В. Хитко, А.М. Черкун // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 4. – С. 50 – 52.
7. Хитко, А.В. Методика расчета полого катода с внутренним разрядом [Текст] / А.В. Хитко, А.М. Черкун // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – Т. 10. – С. 103 – 105.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.М. Дронь, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОДВІЙНОГО ПЛАЗМОВОГО ШАРУ НА ГАЗОВУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОРОЖНИННОГО КАТОДА

О.М. Черкун

Практично в усіх типах електрореактивних двигунів застосовують катод. Він відіграє визначальну роль в організації процесів отримання та нейтралізації іонів. Його параметри істотно впливають на ресурс, надійність і енергетичну ефективність двигуна. Подвійний шар утворюється в отворі діафрагми катода і визначає струм електронів та іонів через неї, істотно впливає на характеристики катода. Вивчення цього впливу є важливою і актуальною проблемою, яка потребує детальних експериментальних досліджень. У статті наведено методику дослідження впливу подвійного шару на газову ефективність полого катода з внутрішнім розрядом.

Ключові слова: електрореактивний двигун, порожнистий катод, допоміжний розряд, газова ефективність, ціна електрона.

RESEARCH METHOD OF PLASMA DOUBLE LAYER INFLUENCE ON HOLLOW CATHODE'S GAS EFFICIENCY

A.M. Cherkun

Practically in all types of electrically powered propulsion systems cathodes are applied. Cathode has a basic role in organizing processes of production and neutralization of ions. Its parameters substantially influence on a resource, reliability and power efficiency of electric thrusters. Plasma double layer develops in hollow cathode's orifice and determines electron and ion current through it, it has dramatic influence on cathode's characteristics. Study of this influence is important and urgent problem that requires detailed experimental researches. The paper presents method of research of double layer influence on hollow cathode's gas efficiency.

Keywords: electric thruster, hollow cathode, internal discharge, gas efficiency, electron cost.

Черкун Алексей Михайлович – аспирант Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, E-mail: xenoy@mail.ru.