

Исследование условий стабильного зажигания несамостоятельного тлеющего разряда при низком давлении в атмосфере воздуха

Н.Н. Коваль^{}, В.В. Денисов, В.В. Яковлев, А.О. Егоров*

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

**koval@opee.hcei.tsc.ru*

Abstract. В работе проводятся исследования возможности стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком (0.02–0.8 Па) давлении в атмосфере воздуха. Для стабильного зажигания тлеющего разряда в полый катод при низком рабочем давлении используется инжекция электронов в полый катод из плазмы вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом. Показано, что при токе вспомогательного разряда 300 мА, стабильно формируемом в аксиальном магнитном поле величиной около 30 мТл, коэффициент усиления тока в основном разряде составляет 1.2 при давлении 0.02 Па. Исследуемый тип разряда может быть перспективен для создания электроракетных двигателей, корректирующих высоту космических летательных аппаратов на сверхнизких орбитах до 200 км над уровнем Земли.

Keywords: инжекция электронов, несамостоятельный разряд, воздух, низкое давление, электроракетный двигатель

1. Введение

В 2021 году на околоземной орбите на высотах 200–2000 км над уровнем Земли функционировало около 8000 спутников. В ближайшие годы планируется увеличение их количества до нескольких десятков тысяч [1]. Условием стабильного выполнения возложенных на спутник задач в течение всего срока эксплуатации, составляющего 5–10 лет, является возможность корректировки орбиты с помощью установленных на них электрореактивных двигателей. Большинство таких двигателей построены по схеме Морозова-Холла [2], в которых в качестве рабочего тела используется Хе, содержащийся в баллонах, выводимых на орбиту вместе со спутником. Опустошение баллонов с Хе приводит к утере возможности использования двигателей. Спутники с двигателями на таком принципе практически не используются на высоте ниже 200 км по причине повышенного расхода Хе. Однако на таких высотах остаточное давление атмосферы, содержащей кислород и азот составляет 10^{-2} – 10^{-3} Па. В работе [3] показано, что в таком диапазоне давлений относительно эффективно формируется аргоновая и азотная плазма с концентрацией 10^8 – 10^{12} см⁻³ в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом как в стационарном, так и импульсном режиме. Определение условий стабильного зажигания и горения разрядов в кислород-азотной атмосфере с составом, характерным для орбит на уровне 200 км над уровнем Земли, в указанном диапазоне рабочих давлений при токах разряда 0.5–1 А могло бы позволить использовать данный тип разряда для создания электроракетных двигателей летательных аппаратов, не требующих использования Хе на орбите.

Целью первого этапа работы, описываемого в данной статье, было определение условий стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом в атмосфере воздуха, содержащего азот и кислород, при низких, около 10^{-2} Па давлениях, имитирующих условия сверхнизких орбит.

2. Экспериментальная установка

Исследования возможности стабильного зажигания и горения тлеющего разряда с полым катодом при низких давлениях в атмосфере воздуха проводились на экспериментальном стенде, представленном на Рис.1.

Внутренние стенки цилиндрической вакуумной камеры диаметром 600 мм, высотой 1200 мм и объемом 0.34 м^3 служили полым катодом основного тлеющего разряда. Основной тлеющий разряд зажигался между полым катодом и кольцевым анодом. Соотношение площадей анода и катода составляло около $S_{a2}:S_{c2} = 1:50$. В работе [4] в тлеющем разряде с полым катодом, в котором происходит электростатическое удержание электронов, в атмосфере аргона было достигнуто рабочее давление 0.005 Па . Однако напряжение горения для получения токов в диапазоне $0.5\text{--}1 \text{ А}$, значения которых коррелируют с значениями концентрации плазмы при рабочем давлении около 10^{-2} Па составляет $500\text{--}1500 \text{ В}$. Использование вспомогательного источника электронов на основе известных типов разрядов низкого давления позволяет снизить в несколько раз рабочее напряжение в основном разряде при тех же значениях тока [3]. Поэтому для стабильного зажигания и горения разряда в воздухе при низком $10^{-1}\text{--}10^{-2} \text{ Па}$ давлении и относительно низком рабочем напряжении (до 350 В) в плазму основного тлеющего разряда осуществлялась инжекция электронов из плазмы вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом через мелкоструктурную эмиссионную сетку с размером ячейки $0.4 \times 0.4 \text{ мм}$. Вспомогательный тлеющий разряд зажигался между внутренними стенками цилиндрического полого катода длиной 250 мм и диаметром 85 мм и анодом, функцию которого выполняла эмиссионная сетка. В работе [3] для улучшения условий инициирования и стабильности горения вспомогательного тлеющего разряда на выходе полого катода использовалась диафрагма с отверстием небольшого диаметра. Это позволяло примерно на порядок величины повысить рабочее давление в нем.

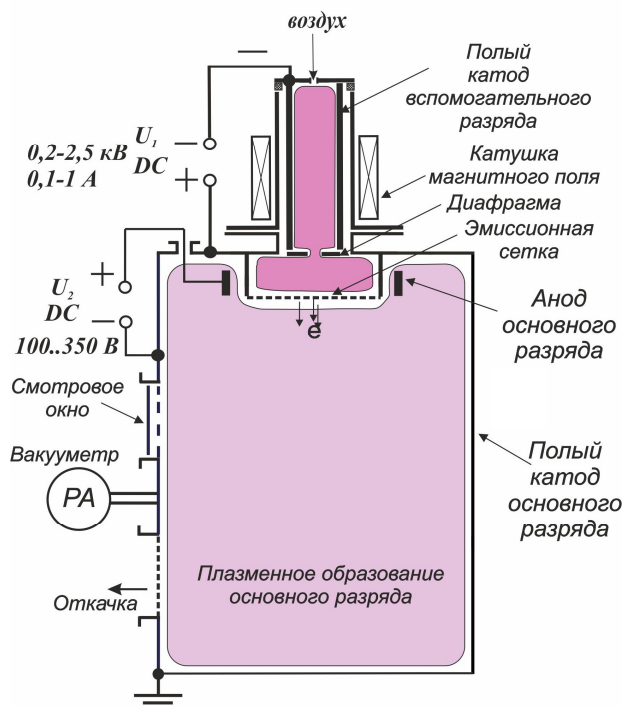


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Поэтому для создания перепада рабочего давления между объемами полых катодов вспомогательного (первая ступень) и основного (вторая ступень) разрядов в используемой экспериментальной установке (Рис.1) в ряде экспериментов на торце катодной полости вспомогательного разряда устанавливалась диафрагма с отверстиями диаметром 5 мм и 10 мм. Исследование влияния аксиального магнитного поля величиной около 30 мТл на процесс

зажигания и горения вспомогательного тлеющего разряда проводилось с использованием электрической катушки магнитного поля.

Электропитание основного тлеющего разряда осуществлялось от инверторного источника напряжения с выходным напряжением 30–350 В и мощностью до нескольких кВт. Источник имел возможность работы в частотно-импульсном режиме до 1000 Гц с коэффициентом заполнения импульсов 1–100%. Электропитание вспомогательного тлеющего разряда осуществлялось от импульсного источника питания с выходным напряжением до 2.5 кВ и выходным током до 1 А. Измерение токов в цепях источников электропитания первой и второй разрядных ступеней производилось с использованием шунтов и цифрового осциллографа.

Порядок проведения эксперимента был следующий. Вакуумная камера стенда откачивалась турбомолекулярным насосом до давления 5×10^{-3} Па. Затем через полый катод вспомогательного тлеющего разряда напускался воздух, прошедший фильтрацию от водяных паров. Расход воздуха контролировался регулятором расхода газа РРГ-10. Поскольку дополнительный поджиг во вспомогательном разряде не использовался, рабочее давление устанавливалось изначально на уровне около 0.8 Па для инициирования вспомогательного тлеющего разряда. Затем происходило уменьшение потока поступающего в катодную полость воздуха и установление требуемого значения давления. Далее между катодом и анодом основного тлеющего разряда прикладывалось напряжение U_2 величиной 300 В. Вспомогательный тлеющий разряд иницировался между полым катодом вспомогательного разряда и анодом – плоской эмиссионной сеткой, электрически соединенной с потенциалом полого катода основного тлеющего разряда при подаче напряжения U_1 от источника питания с крутопадающей выходной характеристикой. На холостом ходу напряжение U_1 имело величину около 2.5 кВ, а при зажигании разряда от 260 до 550 В. Часть потока электронов, замыкающихся во вспомогательном разряде на анод – эмиссионную сетку, проходила через ячейки сетки, эмитировалась и ускорялась в прикатодном падении потенциала основного тлеющего разряда. Ускоренные электроны осциллировали в электростатической ловушке, ограниченной стенками полого катода тлеющего разряда, до момента термализации или ухода на анод тлеющего разряда и производили ионизацию газа.

3. Результаты исследований и обсуждение

Описанный выше порядок проведения эксперимента, как уже отмечалось, осуществлялся с установкой на торце катодной полости вспомогательного тлеющего разряда диафрагмы с центральным отверстием диаметром 5 мм и 10 мм.

Необходимо отметить, что зажигание вспомогательного разряда автоматически означало зажигание основного тлеющего разряда с указанным выше напряжением горения U_2 с определенным коэффициентом усиления K_{yc} , равным отношению токов основного и вспомогательного разрядов I_2/I_1 . Поэтому особое внимание уделялось определению условий, обеспечивающих стабильное зажигание вспомогательного разряда.

При зажигании вспомогательного разряда без магнитного поля (отверстие в диафрагме 5 мм) с током 0.1 А напряжение горения U_1 составляло 360 В при давлении 0.1 Па и 390 В при давлении 0.06 Па. Токи в основном разряде составляли при этих условиях 0.18 и 0.16 А соответственно, то есть ток в полой катодной второй ступени уменьшался с уменьшением рабочего давления, также как и K_{yc} . Без аксиального магнитного поля разряд первой ступени горит нестабильно и погасает при давлении около 0.05 Па. Нестабильность горения, видимо, вызвана срывами в дугу при пробое диэлектрических пленок на поверхности катода. Источник питания не позволял перейти разряду в режим горения с катодным пятном. При подаче тока в катушку магнитного поля практически не наблюдается колебаний тока.

Помимо этого, происходит снижение рабочего давления до 0.01 Па, при котором тлеющий разряд стабильно горит в воздухе.

На Рис.2 представлены зависимости напряжения горения разряда U_1 от рабочего давления воздуха во второй ступени при токе вспомогательного разряда $I_1 = 0.3$ А. Из сравнения результатов экспериментов, в которых использовались отверстия в диафрагме 5 и 10 мм видно, что напряжение горения разряда для диаметра отверстия 5 мм примерно на 10% ниже, чем для диаметра 10 мм, и примерно на 25% ниже, чем для случая без диафрагмы. Вероятнее всего это связано с улучшением условий утилизации энергии электронов в полном катоде первой ступени за счет уменьшения величины отношения $Sa_1:Sc_1$, оптимальное значение которого равно $(2m_e/M_i)^{1/2}$ [5] (m_e – масса электрона, M_i – средняя масса ионов в рабочей газовой смеси), и использования дополнительного аксиального магнитного поля. Отсутствие диафрагмы не позволяет эффективно утилизировать энергию электронов, ускоренных в прикатодном падении потенциала.

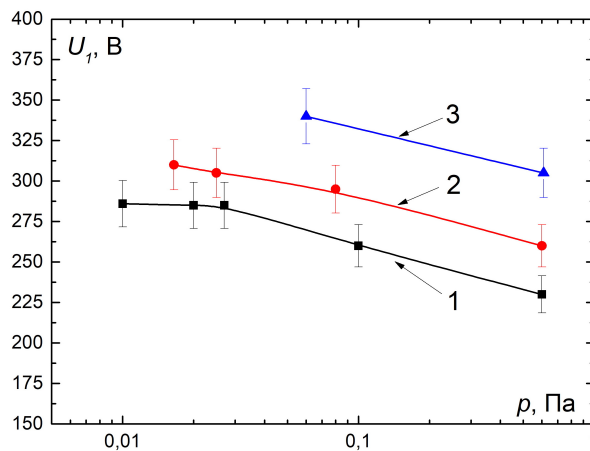


Рис.2. Зависимости U_1 от давления во второй ступени (при $I_1 = 0.3$ А и $U_2 = 300$ В): 1 – диаметр отверстия в диафрагме – 5 мм; 2 – диаметр отверстия в диафрагме – 10 мм; 3 – без диафрагмы.

Важнейшим для исследуемой разрядной системы являлось определение коэффициента усиления тока K_{yc} при низких рабочих давлениях в воздухе. Исследования показали, что при уменьшении рабочего давления с 0.5 до 0.02 Па при токе вспомогательного разряда $I_1 = 0.3$ А и напряжении горения $U_2 = 300$ В K_{yc} падает с 4 до 1.2 (Рис.3).

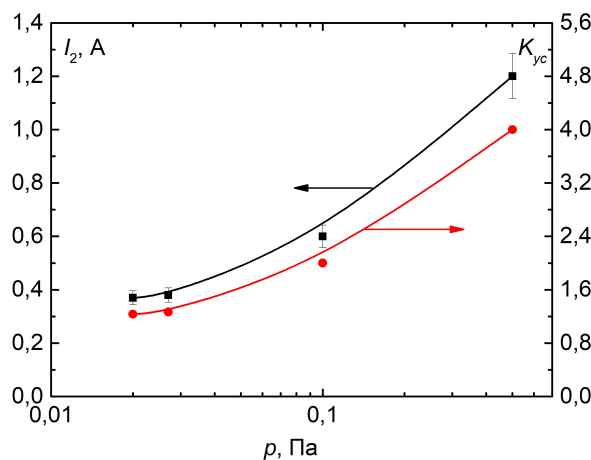


Рис.3. Зависимости I_2 и K_{yc} от давления во второй ступени ($I_1 = 0.3$ А).

Уменьшение тока I_2 и K_{yc} при снижении рабочего давления связаны, по-видимому, с неоптимальным значением $Sa_2:Sc_2$ во второй разрядной ступени и уменьшением концентрации вступающих в реакции ионизации молекул газовой смеси.

Полученные данные показывают возможность эффективной работы в воздушной атмосфере с токами разряда около 0.5 А при давлении 0.02 Па.

4. Заключение

Исследования процессов инициирования и горения основного и вспомогательного тлеющих разрядов низкого давления с полым катодом в двухступенчатой разрядной системе в атмосфере воздуха показывает возможность стабильного горения разряда при давлении около $\approx 10^{-2}$ Па, напряжении горения около 300 В и токе около 0.5 А.

Критическое влияние на возможность стабильного горения вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении остаточной атмосферы в набегающем потоке ионов и нейтралов, который может быть обеспечен на околоземной орбите на высоте около 200 км, играет соблюдение оптимальных значений соотношения площади катода и анода, которые должны удовлетворять условию $Sa/Sc < (2m_e/M_i)^{1/2}$. Коэффициент усиления тока основного разряда K_{yc} при рабочем давлении 0.02 Па составляет 1.2.

Данный тип разряда может рассматриваться в качестве альтернативы существующей разрядной системе Морозова-Холла, на основе которой построены большинство электроракетных двигателей для корректировки орбит спутников, и не требует использования для функционирования рабочего газа Хе.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-69-46034.

5. Список литературы

- [1] Миллс М. Сколько сейчас спутников на орбите Земли? [online], 2021; <https://itigic.com/ru/how-many-satellites-are-there-right-now-orbiting-the-earth>
- [2] Скворцов В.В., *Аэродинамические исследования при участии потоков синтезированной и низкотемпературной плазмы*. (Москва: Физматлит, 2013).
- [3] Визирь А.В., Юшков Г.Ю., Окс Е.М., Щанин П.М., *ЖТФ*, **67**(6), 27, 1997.
- [4] Метель А.С., Григорьев С. Н., Мельник Ю.А., Прудников В.В., *Физика плазмы*, **37**(7), 674, 2011.
- [5] Метель А.С., *ЖТФ*, **54**(2), 241, 1984.