

04

Зависимость характеристик высокочастотного катода от его конструктивных параметров

© А.М. Никонов,¹ К.В. Вавилин,¹ И.И. Задириев,¹ С.А. Двинин,¹ Е.А. Кралькина,¹ Г.В. Швыдкий,¹ А.А. Голиков,¹ А.Э. Сагалаков,¹ В.В. Сазонов,¹ А.С. Филатьев,¹ Д.А. Бондаренко,² С.Ю. Маринин,² А.А. Ходов²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

²Научно-производственная корпорация „Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы“ им. А.Г. Иосифьяна, 107078 Москва, Россия

e-mail: ekralkina@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 10 января 2024 г.

Принято к публикации 14 января 2024 г.

Изучены характеристики модели высокочастотного индуктивного катода-нейтрализатора, работающего на аргоне и его смеси с воздухом, при изменении конструктивных параметров устройства — диаметра выходного отверстия и площади коллектора ионов. Экспериментально показано, что наибольший ток электронов удастся получить с отверстием диаметром 2.2 mm и коллектором ионов наибольшей площади. При условии, что напряжение между коллектором ионов и анодом составляет величину менее 100 V, при всех рассмотренных условиях наблюдается слабое падение концентрации электронов по сравнению с чисто индуктивным разрядом в катоде, в то же время ток электронов на анод сильно возрастает. Интерпретация полученных результатов выполнена в предположении, что разряд между катодом и анодом является комбинацией индуктивного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока.

Ключевые слова: катод-нейтрализатор, индуктивный высокочастотный разряд, плазма, ионы, ток электронов.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57531.291-23

Введение

В последние годы в литературе широко обсуждается возможность полетов космических аппаратов (КА) на ультранизких околоземных орбитах (120–250 km), которые открывают новые перспективы для мониторинга поверхности планет, связи и научных исследований ионосферы [1]. Проблемой поддержания КА на таких орбитах является испытываемое КА значительное аэродинамическое сопротивление. Существенными преимуществами для этих целей обладают электроракетные двигатели (ЭРД), имеющие на порядок больший удельный импульс по сравнению с жидкостными ракетными двигателями и позволяющие значительно сократить необходимый запас топлива. Кардинального же снижения требуемого запаса можно достичь, если использовать в качестве рабочего тела газы окружающей КА атмосферы в воздушных электрореактивных двигателях (ВЭРД).

Анализ необходимых условий поддержания КА с ВЭРД на околоземных ультранизких орбитах [2] показывает, что скорость истечения газов из ВЭРД должна быть более 25 km/s, что в настоящее время реализуется в летных образцах только ионных двигателей (с ионно-оптической системой разгона). В последнее десятилетие проводились экспериментальные исследования работы ионных двигателей на атмосферных газах [2]. Одной

из проблем реализации ВЭРД является необходимость длительного функционирования его систем в среде, содержащей значительную часть химически активного атомарного кислорода, что может потребовать использования нетрадиционных решений. В частности, необходимо рассмотреть способы нейтрализации ионной струи на выходе из ВЭРД, для чего в современных ЭРД используются накальные и дуговые полые катоды [3–6]. Их основным недостатком является малое время жизни, которое существенным образом понижается при наличии примеси химически активных газов к рабочему инертному газу [4]. В работах [7–18] показано, что альтернативой традиционным устройствам могут служить катоды, основанные на безэлектродном индуктивном высокочастотном (ВЧ) разряде. Они имеют значимое преимущество перед безэлектродными катодами, работающими на емкостном ВЧ и микроволновых разрядах, так как позволяют получить заданный ток электронов при меньших энергозатратах [11].

Фундаментальной основой конструкции современных ВЧ индуктивных катодов является модель физических процессов, происходящих в его объеме, предложенная в работе [7]. Предполагается, что при прохождении ВЧ тока через индуктор в разряд вкладывается мощность, которая приводит к образованию плотной плазмы в объеме катода. Между специальным металличе-

ским электродом (коллектором ионов), расположенным в катоде, и анодом, вынесенным за пределы катода, подается постоянное напряжение, которое способствует извлечению электронов из объема катода в пространство между катодом и анодом через специальное отверстие, выполненное в торцевой поверхности катода. Предполагается, что в пространстве между катодом и анодом ионизации рабочего газа не происходит. Извлекаемый ток электронов должен быть равен току ионов, идущему на коллектор. В связи с этим разработчики ВЧ катодов прилагают усилия, чтобы сделать площадь коллектора ионов максимальной. В работе [7] построена численная модель разряда и выполнены расчеты основных характеристик катода. Результаты, полученные расчетным путем, близки к наблюдавшимся экспериментально.

1. Применение ВЧ катода в ВЭРД

Условия окружающей среды, в которых предполагается функционирование ВЧ катода как части ВЭРД, и основные требования к катоду могут быть определены на основании анализа возможных замкнутых орбит КА и требуемых для их поддержания характеристик двигателя. В работе [19] приведена методика оптимизации параметров КА, ВЭРД и эллиптических орбит КА по критерию пиковой потребляемой мощности ВЭРД. Полученные с помощью данной методики зависимости оптимальной высоты перигея и потребляемой мощности от минимальной допустимой концентрации газа в ионизационной камере ВЭРД приведены на рис. 1. Зависимости получены для КА с площадью поперечного сечения $A_{in} = 0.04 \text{ m}^2$ при характеристиках атмосферы, соответствующих средней солнечной активности по стандарту ISO/FDIS 14222 [20], и тяговом КПД двигателя $\eta_T = 0.4$.

Проведенные экспериментальные исследования ионных двигателей (ИД) на атмосферных газах [2] по-

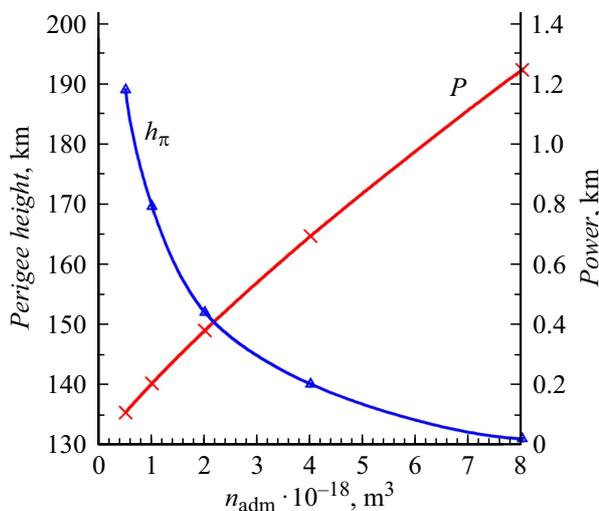


Рис. 1. Зависимости оптимальной высоты перигея h_{π} и потребляемой мощности W от минимальной допустимой концентрации газа n_{adm} в ионизационной камере ВЭРД.

казали, что при концентрации газа в ионизационной камере $n \geq 8 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ реализуется стабильное горение плазмы, в том числе и в высокочастотных ИД. При $n_{adm} = 8 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ на оптимальных эллиптических орбитах КА с ВЭРД давление окружающей атмосферы не превышает $2 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$.

Ток ионного пучка I_b , для нейтрализации которого предполагается использовать ВЧ катод, может быть определен с учетом полученной в [19] эффективности забора газа $\eta_c = 0.4$, известной концентрации молекул атмосферы $n_{\infty} = 1.52 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$ и принятого разгонного потенциала $U = 1500 \text{ V}$ из формул [5]:

— для тяги ВЭРД

$$F = I_b \sqrt{2 \frac{M}{e} U},$$

где e — заряд электрона, M — молекулярная масса газов атмосферы;

— для массового расхода через ВЭРД

$$\dot{m} = \eta \cdot M n_{\infty} V A_{in},$$

где $V = 8049 \text{ m/s}$ — скорость КА в перигее эллиптической орбиты ($h_{\pi} = 130 \text{ km}$, $h_{\alpha} = 930 \text{ km}$);

— для потребляемой мощности ВЭРД

$$W = \frac{F^2}{2 \dot{m} \eta_T}.$$

Отсюда получаем

$$I_b = \sqrt{\frac{W n_{\infty} e \cdot A_{in} V \eta_c \eta_T}{U}}.$$

С учетом указанных выше значений параметров можно определить, что при $n_{adm} = 8 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ВЧ катод для ВЭРД должен быть ориентирован на нейтрализацию пучка ионов с током $I_b = 1.0 \text{ A}$.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

В работе [18] авторами настоящей работы были выполнены первые экспериментальные исследования характеристик катода-нейтрализатора, рабочий процесс которого основан на индуктивном ВЧ разряде в аргоне. Рассмотрен диапазон расходов аргона $4\text{--}10 \text{ cm}^3/\text{min}$, диапазон мощностей ВЧ генератора $35\text{--}150 \text{ W}$. Полученные результаты показали перспективность разработанной модели катода. В настоящей работе продолжено изучение характеристик ВЧ катода, работающего на аргоне и его смеси с воздухом, проанализировано влияние диаметра выходного отверстия катода и площади коллектора ионов на характеристики модели ВЧ катода, а также высказаны соображения о необходимости уточнения модели физических процессов в катод.

Для измерения характеристик ВЧ катода использовалась вакуумная камера объемом 0.8 m^3 , откачка которой

осуществляется системой форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Остаточное давление в вакуумной камере составляло величину порядка 2.10^{-5} Торр. При работе ВЧ катода давление в камере не превышало 4.10^{-4} Торр.

ВЧ катод состоит из цилиндрической газоразрядной камеры (ГРК), ограниченной двумя металлическими фланцами. Боковые стенки камеры изготовлены из диэлектрического материала. Диаметр камеры составляет 30 мм, длина — 80 мм. В объеме ГРК расположен металлический электрод — коллектор ионов. Коллектор ионов представляет собой систему из 16, 8 или 2 медных стержней диаметром 2 мм и длиной 70 мм, расположенных на расстоянии 12 мм от оси катода. На нижнем фланце камеры располагается газопровод, обеспечивающий подачу рабочего тела в объем катода. В верхнем фланце на его оси выполнено выходное отверстие. В настоящей работе использованы фланцы с отверстием диаметром d 2,2, 3 и 5 мм. На расстоянии 50 мм от катода смонтирован металлический электрод — анод.

На боковой поверхности катода расположена соленоидальная пятывитковая антенна для возбуждения индуктивного ВЧ разряда. Для поджига и поддержания индуктивного ВЧ разряда в объеме ГРК концы антенны через систему согласования подсоединяются к ВЧ ге-

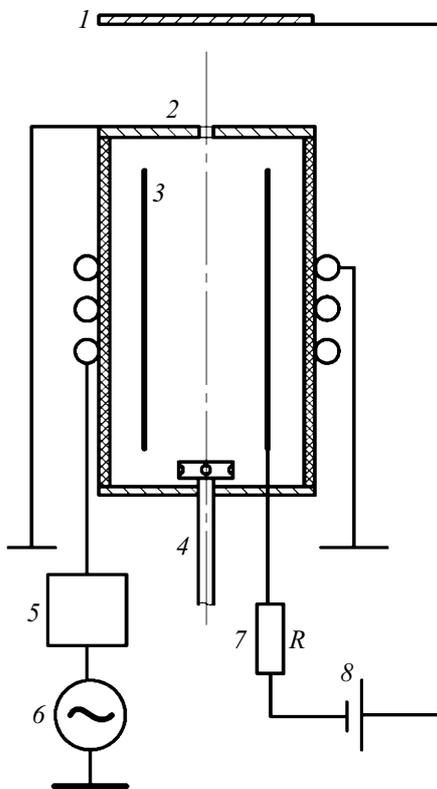


Рис. 2. Схема экспериментального ВЧ катода и его электрической цепи: 1 — коллектор электронов, 2 — крышка с выходным отверстием, 3 — коллектор ионов, 4 — газопровод, 5 — устройство согласования, 6 — ВЧ генератор, 7 — балластное сопротивление, 8 — источник постоянного напряжения.

нератору с рабочей частотой 13.56 МГц и варьируемой мощностью P_{gen} в диапазоне 0–1000 Вт. После поджига разряда между коллектором ионов и анодом подается постоянное напряжение V . В цепь между электродами включено балластное сопротивление $R = 100 \Omega$, при этом напряжение между катодом и анодом U_d определяется выражением: $U_d = V - IR$. Используемый источник питания позволяет измерять токи вплоть до 1.5 А.

Для нахождения параметров плазмы внутри катода использовался скомпенсированный зонд Ленгмюра длиной 4 мм и диаметром 0.37 мм. Зонд располагался на расстоянии 7 мм от оси катода. Параметры плазмы рассчитывались с помощью стандартной процедуры обработки зондовых характеристик. Температура электронов находилась по наклону кривой логарифма электронного тока на зонд от потенциала зонда вблизи потенциала пространства.

В качестве рабочего тела в работе использовался аргон с расходом $f = 4–10 \text{ cm}^3/\text{min}$ и его смесь с воздухом. Расход воздуха варьировался в диапазоне $1–2 \text{ cm}^3/\text{min}$. Напряжение между катодом и анодом изменялось от 0 до 160 В (рис. 2).

3. Результаты экспериментов

Эксперименты показали, что при малых расходах аргона (f менее $5 \text{ cm}^3/\text{min}$), небольших мощностях ВЧ генератора (P_{gen} менее 80 Вт) и всех рассмотренных напряжениях U_d между коллектором ионов и анодом разряд сосредоточен внутри объема ВЧ катода, и электронный ток I , текущий на анод, равен нулю. При $f > 5 \text{ cm}^3/\text{min}$ в электрической цепи между коллектором ионов и анодом появляется ток.

Зависимость I от напряжения U_d , измеренная при расходе $8 \text{ cm}^3/\text{min}$ и мощности ВЧ генератора 80 Вт, показана на рис. 3.

Как видно, значения электронного тока, полученные с отверстиями 2.2 и 3 мм в диапазоне U_d 55–85 В, совпадают в пределах погрешности измерений. Значения электронного тока, измеренные в экспериментах с $d = 5 \text{ mm}$, оказались существенно ниже, чем величины, полученные с выходными отверстиями меньшего диаметра. Обращает на себя внимание, что в отличие от зависимостей $I(U_d)$, измеренных при $d = 2.2$ и 3 мм, которые быстро возрастают с увеличением U_d , кривая $I(U_d)$ для $d = 5 \text{ mm}$ имеет тенденцию к насыщению.

На рис. 4 показаны зависимости тока электронов от диаметра выходного отверстия, полученные при $U_d = 80 \text{ V}$, различных мощностях и расходах аргона.

Можно видеть, что электронный ток уменьшается при увеличении диаметра отверстия при всех рассмотренных условиях. Однако с ростом мощности P_{gen} при расходах 8 и 10 sccm зависимость $I(d)$ становится существенно менее выраженной. Так, при $f = 10 \text{ sccm}$ разность в значениях I составляет величину порядка 5%.

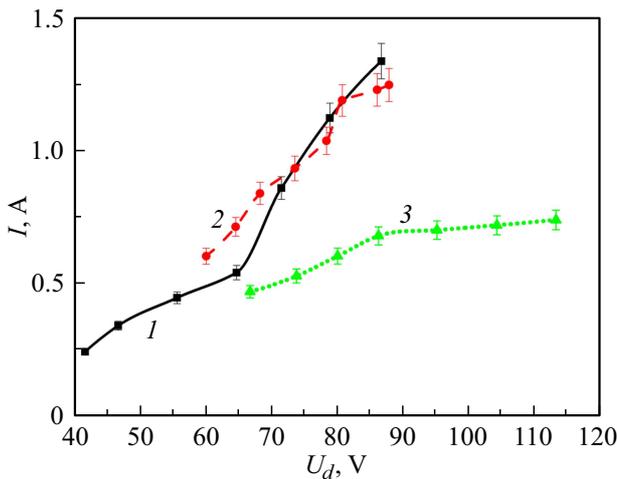


Рис. 3. Зависимость электронного тока на анод в зависимости от разности потенциалов между коллектором ионов и анодом в моделях ВЧ катода с диаметром выходного отверстия: 1 — 2,2, 2 — 3, 3 — 5 mm. Расход аргона $8 \text{ cm}^3/\text{min}$. $P_{gen} = 80 \text{ W}$.

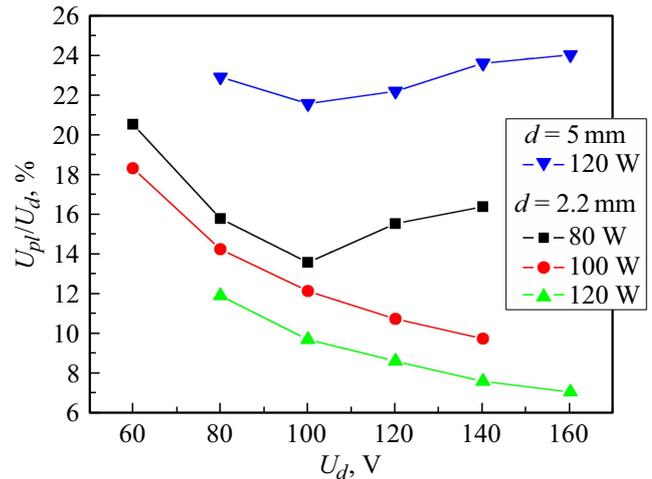


Рис. 5. Зависимость отношения U_{pl}/U_d потенциала плазмы U_{pl} внутри катода к напряжению между коллектором ионов и анодом от U_d .

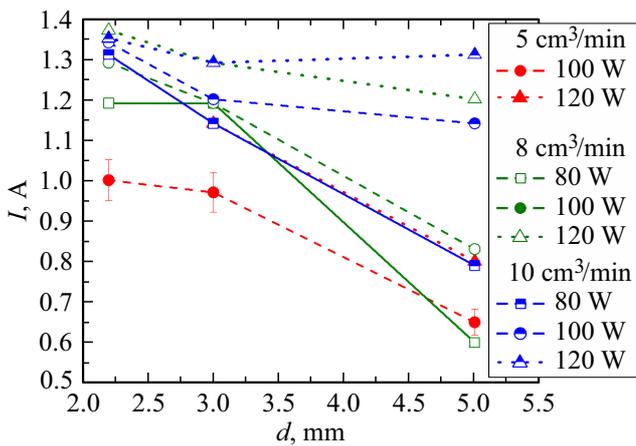


Рис. 4. Зависимости тока электронов от диаметра выходного отверстия, полученные при $U_d = 80 \text{ V}$, мощностях ВЧ генератора 80, 100 и 120 W, расходах аргона 5, 8 и 10 cm^3/min .

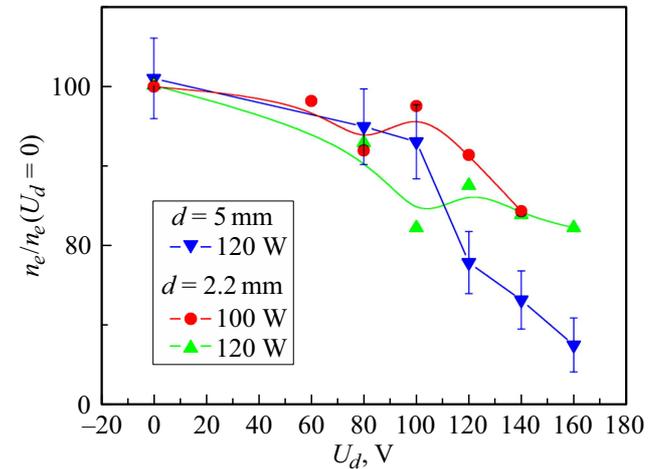


Рис. 6. Зависимость отношения $n_e(U_d)/n_e(U_d = 0)$ концентрации электронов внутри катода к концентрации, измеренной при $U_d = 0$ от U_d .

На рис. 5 показано изменение отношения U_{pl}/U_d потенциала плазмы U_{pl} внутри катода к напряжению между коллектором ионов и анодом от U_d .

Данные, представленные на рис. 5, показывают, что в объеме ВЧ катода падает небольшая часть потенциала (не более 25%), приложенного между коллектором ионов и анодом. При мощности ВЧ генератора 80 W и диаметре выходного отверстия 2.2 mm зависимость U_{pl}/U_d от U_d является немонотонной с минимумом при $U_d \sim 100 \text{ V}$, где U_{pl} — потенциал плазмы в катоде. Увеличение P_{gen} сопровождается исчезновением локального минимума в рассмотренном диапазоне U_d . Чем больше мощность генератора, тем меньше значения отношения U_{pl}/U_d . При увеличении диаметра отверстия до 5 mm даже при $P_{gen} = 120 \text{ W}$ зависимость U_{pl}/U_d от U_d является немонотонной.

На рис. 6,7 показано изменение температуры T_e и отношения концентрации n_e электронов внутри катода к соответствующей величине, измеренной в чисто индуктивном разряде ($U_d = 0$), при увеличении напряжения между коллектором ионов и анодом.

Как видно, в области $U_d > 100 \text{ V}$ при всех рассмотренных условиях наблюдаются падение концентрации электронов в катоде и рост температуры электронов. Необходимо отметить, что при $U_d < 100 \text{ V}$ концентрация и температура электронов в объеме катода изменяются слабо, при этом ток электронов на анод возрастает.

На рис. 8 показана типичная зависимость $I(U_d)$, полученная при использовании 16 медных стержней в качестве коллектора ионов. Можно видеть, что при малой мощности ВЧ генератора (50 W) электронный ток насыщается. При больших рассмотренных P_{gen} область

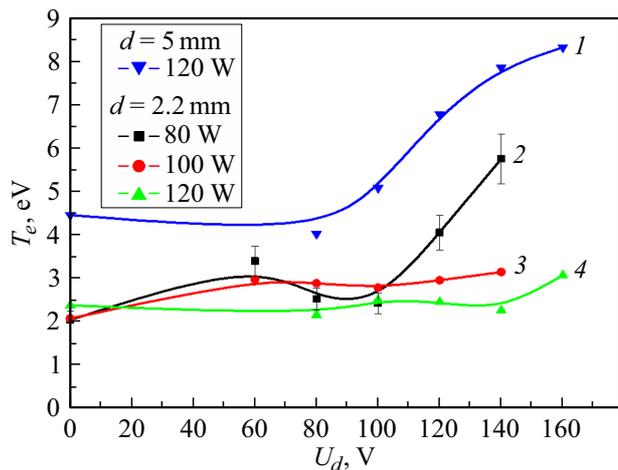


Рис. 7. Зависимость температуры электронов внутри катода от напряжения между коллектором ионов и анодом U_d .

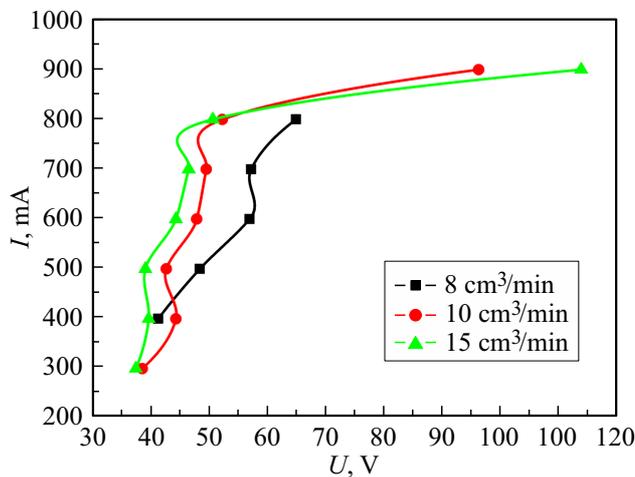


Рис. 8. Зависимость тока электронов на анод от напряжения между катодом и анодом, $d = 2.2$ mm.

насыщения в рассмотренном диапазоне электронных токов не наблюдается.

При использовании 8 медных стержней в качестве коллектора при $P_{gen} = 50$ W также наблюдается насыщение тока электронов, причем максимальное значение I_e , полученное с 8 стержнями I_8 , было в 1.4 раза меньше, чем с 16 стержнями I_{16} (рис. 9). Рост мощности ВЧ генератора привел к появлению интересного эффекта: зависимость $I_e(U_d)$ стала двузначной. Сначала I_8 существенно отстает от I_{16} , затем I_8 начинает возрастать и приближается к I_{16} , при этом разность потенциалов между катодом и анодом начинает падать.

При использовании двух стержней в качестве катода электронный ток удалось получить только для модели с отверстием 5 mm, причем рядом с коллектором ионов падало более 90% напряжения, приложенного между катодом и анодом.

В заключение было изучено влияние примеси воздуха на зависимость $I_e(U_d)$. Полученные результаты показаны на рис. 10. Можно видеть, что в случае, когда в разряд поступает $1 \text{ cm}^3/\text{min}$ воздуха, электронный ток уменьшается не более, чем на 10%, однако увеличение поступления воздуха в разряд вдвое сопровождается двукратным падением электронного тока. Получить электронный ток, используя в качестве рабочего газа чистый воздух, не удалось.

4. Обсуждение результатов

Для интерпретации полученных результатов рассмотрим разряд, горящий между катодом и анодом, как комбинацию индуктивного ВЧ разряда и разряда постоянного тока. Мощность вкладывается в разряд как по ВЧ каналу, так и по каналу постоянного тока. Представляется разумным выделить несколько частей комбинированного разряда. Первая часть — это плазменная область внутри катода, вторая — область с высокой плотностью электронного тока вблизи выходного отверстия катода и третья — плазменная область в пространстве между катодом и анодом. Зондовые измерения показали, что при использовании коллектора ионов большой площади падение потенциала вблизи коллектора ионов мало. Естественно предположить, что подавляющая часть падения потенциала сосредоточена в области выходного отверстия катода. Здесь электроны ускоряются разностью потенциалов, возникающей между первой и третьей частями разряда. Энергия электронов оказывается достаточной для ионизации газа в третьей области разряда. Число электронов, поступающих из катода в промежуток между катодом и анодом, зависит, главным образом, от мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал и концентрации атомов в катоде.

Для того чтобы понять, может ли происходить ионизация газа между катодом и анодом, оценим плотность атомов в разных частях разряда. В объеме катода величину концентрации атомов n_0 оценим, приравняв поток атомов, входящих в объем катода, потоку атомов, выходящих через выходное отверстие с тепловой скоростью. Предполагая, что температура газа равна 100°C , а расход аргона равен $10 \text{ cm}^3/\text{min}$, получим, что n_0 составляет величины $1, 0.5$ и $0.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ при использовании отверстий 2.2, 3 и 5 mm. Концентрацию атомов в области между катодом и анодом грубо оценим, исходя из предположения, что n_0 здесь уменьшается пропорционально квадрату расстояния от выходного отверстия катода. Получим, что вблизи анода n_0 падает более чем на три порядка, так что скорость ионизации около анода мала. Однако на расстоянии 1–2 cm от выходного отверстия катода концентрация атомов достаточно велика, и процесс ионизации атомов ускоренными электронами может идти интенсивно. При этом ток электронов, идущий на анод, возрастает за счет рождения вторичных

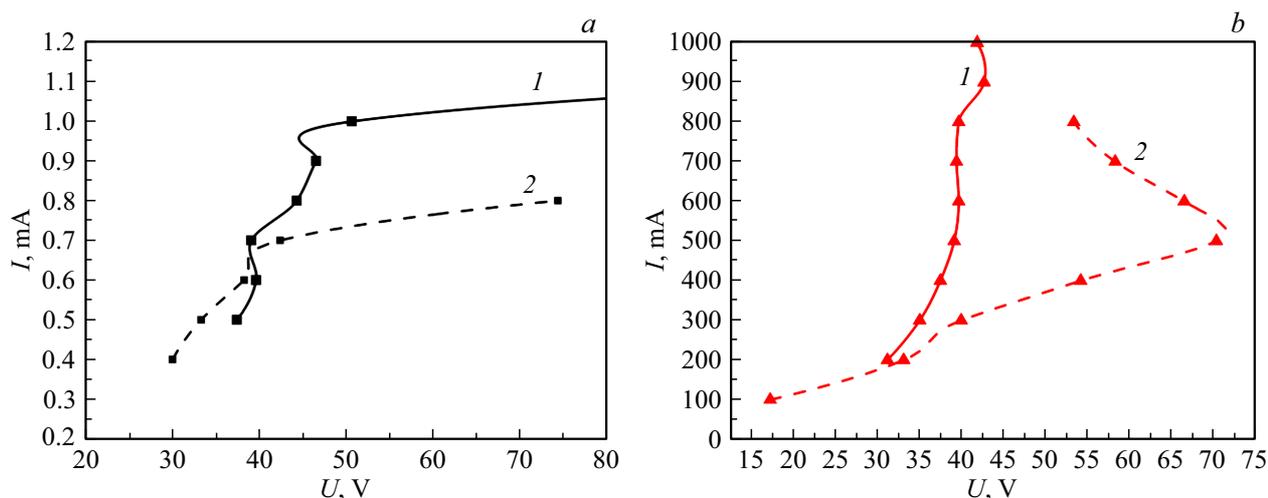


Рис. 9. Зависимость $I(U_d)$, измеренная с 16 (сплошная кривая 1) и 8 (штриховая кривая 2) стержнями в качестве коллектора электронов: a — 50, b — 100 W; $d = 2.2$ mm.

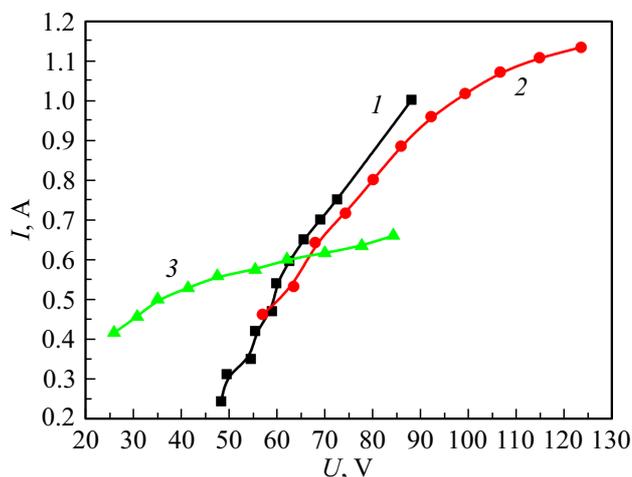


Рис. 10. Зависимость $I(U_d)$, измеренная в чистом аргоне и смеси аргона с воздухом. Расход аргона в трех рассмотренных случаях $5 \text{ cm}^3/\text{min}$: 1 — чистый аргон, 2 — смесь аргона с воздухом, расход воздуха $1 \text{ cm}^3/\text{min}$, 3 — смесь аргона с воздухом, расход воздуха $2 \text{ cm}^3/\text{min}$.

электронов в третьей области разряда. Кроме того, параллельно возникает ток ионов, идущий из третьей части разряда в первую.

Имея в виду изложенную выше картину физических процессов, рассмотрим результаты экспериментов. Увеличение напряжения между катодом и анодом в диапазоне $U_d < 100$ V приводит к уменьшению доли падения потенциала у коллектора ионов U_{pl}/U_d . При этом концентрация и температура электронов в пределах погрешности эксперимента остаются неизменными. Рост мощности ВЧ генератора сопровождается уменьшением U_{pl}/U_d , в то же время концентрация плазмы изменяется слабо, а температура электронов падает. Уменьшение T_e тем больше, чем больше мощность

ВЧ генератора. Подчеркнем, что в области $U_d < 100$ V ток электронов, приходящих на анод, быстро растет. Это свидетельствует о значительной роли процессов во второй и третьих частях разряда. При $U_d > 100$ V, мощности генератора 80 W и $d = 5$ mm начинается рост U_{pl}/U_d . Рост падения потенциала у коллектора ионов приводит к ускорению потока электронов, эмитированных с коллектора в результате ионно-электронной эмиссии, и интенсификации ионизации в объеме катода.

Увеличение диаметра отверстия приводит к уменьшению концентрации атомов в объеме катода. Это сопровождается увеличением U_{pl}/U_d и роли канала постоянного тока. С ростом расхода газа концентрация нейтралов возрастает, и зависимость тока электронов, приходящих на анод, от диаметра отверстия практически исчезает.

Зависимость электронного тока на анод, представленная на рис. 8, 9, a , по виду типична для ВАХ несамостоятельного разряда постоянного тока [21]. Источником дополнительной ионизации выступает ВЧ мощность, поступающая в объем катода. Быстро возрастающая часть кривой $I(U_d)$ соответствует условиям, когда электроны, рожденные в объеме катода в результате вложения ВЧ мощности, под действием приложенного напряжения между коллектором и анодом попадают на анод. Далее, когда практически все заряды, рожденные в объеме, уходят на анод, электронный ток насыщается. Рост тока возможен только за счет роста увеличения падения потенциала у коллектора ионов и интенсификации процессов ионизации за счет процессов, характерных для разряда постоянного тока. Увеличение расхода аргона и мощности ВЧ генератора сопровождается ростом ионизации за счет эффектов, характерных для индуктивного ВЧ разряда.

Известно, что индуктивный разряд поджигается и горит при малых P_{gen} в емкостной моде. В работе [22]

показано, что наличие канала постоянного тока приводит к снижению пороговых значений P_{gen} , при которых разряд переходит из емкостной в индуктивную моду. Чем больше доля мощности, поступающая в разряд через канал постоянного тока, тем скорее происходит переход. Уменьшение площади катода при снижении числа стержней, составляющих коллектор ионов, сопровождается уменьшением мощности, поступающей в разряд через канал постоянного тока. При этом переход разряда в индуктивную моду замедляется. После перехода разряда в катод в индуктивную моду ток электронов резко возрастает, увеличивается падение потенциала на балластном сопротивлении, и U_d падает. Это объясняет двузначность кривой $I(U_d)$, измеренной с коллектором ионов, состоящем из восьми стержней.

Известно [22], что при замене аргона воздухом при одних и тех же внешних параметрах индуктивного ВЧ разряда происходит понижение плотности плазмы и смещение области перехода (по мощности генератора) из емкостной моды в индуктивную. Уменьшение электронного тока на анод при добавке воздуха к аргону, по-видимому, связано с действием обоих указанных факторов.

Используя результаты, показанные на рис. 4, оценим газовую эффективность катода γ :

$$\gamma = i_e / (eff)$$

и энергозатраты на получение 1 А электронного тока:

$$C_e = V_{ca} + P_{gen}/i_e.$$

Оценки показывают, что для модели с диаметром отверстия $d = 2.2$ mm энергозатраты составляют 140 W/A при $\gamma = 2.8$, что близко к наилучшим полученным в настоящее время результатам [7].

Заключение

В работе изучены характеристики модели ВЧ индуктивного катода-нейтрализатора, работающего на аргоне и его смеси с воздухом, при изменении конструктивных параметров устройства: диаметра выходного отверстия и площади коллектора ионов. Экспериментально показано, что наибольший ток электронов удается получить с отверстием диаметром 2.2 mm и коллектором ионов наибольшей площади. Зондовые измерения показали, что в объеме ВЧ катода падает небольшая часть потенциала (не более 25%), приложенного между коллектором ионов и анодом. При мощности ВЧ генератора 80 W и диаметре выходного отверстия 2.2 mm зависимость U_{pl}/U_d от напряжения между коллектором ионов и анодом U_d является немонотонной с минимумом при $U_d \sim 100$ V. Увеличение мощности ВЧ генератора сопровождается исчезновением локального минимума. При увеличении диаметра отверстия до 5 mm даже при $P_{gen} = 120$ W зависимость U_{pl}/U_d от U_d является

немонотонной. В области $U_d < 100$ W при всех рассмотренных условиях наблюдается слабое падение концентрации электронов по сравнению с чисто индуктивным разрядом в катод, в то же время ток электронов на анод сильно возрастает. Интерпретация полученных результатов выполнена в предположении, что разряд между катодом и анодом является комбинацией индуктивного ВЧ разряда и разряда постоянного тока.

Малость величины падения потенциала у коллектора ионов дает основание предполагать, что его распыление не окажет существенного влияния на ресурс ВЧ катода.

Оценки показывают, что для модели с диаметром отверстия $d = 2.2$ mm энергозатраты составляют 140 W/A при $\gamma = 1.9$ и 180 W/A при $\gamma \sim 1$, что близко к наилучшим известным из литературы результатам.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программы поддержки Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Соглашение № 23-Ш01-02.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.S. Filatyev, O.V. Yanova. *Acta Astronautica*, **158**, 23 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.10.039
- [2] A.S. Filatyev, A.A. Golikov, A.I. Erofeev, S.A. Khartov, A.S. Lovtsov, D.I. Padalitsa, V.V. Skvortsov, O.V. Yanova. *Progr. Aerospace Sci.*, **136**, 100877 (2023). DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100877
- [3] H.R. Kaufman, R.S. Robinson. *Operation of Broad Beam Sources* (Commonwealth Scientific, Alexandria, 1984)
- [4] D.M. Goebel, I. Katz. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (JPL Space Science and Technology Series, California, 2008)
- [5] О.А. Горшков, В.А. Муравьев, А.А. Шагайда, А.С. Коротеев. *Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов* (Машиностроение, М., 2008)
- [6] S. Mazouffre. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **25**, 033002 (2016). DOI: 10.1088/0963-0252/25/3/033002
- [7] F. Scholze, B.M. Tartz, H. Neumann. *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 02B724 (2008). DOI: 10.1063/1.2802587
- [8] S. Jahanbakhsh, M. Satir, M. Celik. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 02B922 (2016). DOI: 10.1063/1.4935015
- [9] P. Dietz, F. Beckery, K. Keib, K. Holstev, P.J. Klar. In *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Vienna, 2019), p. 207.
- [10] F. Scholze, D. Spemann, D. Feili. In *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Ann Arbor, 2009), p. 475.
- [11] P. Smirnov, M. Smirnova, J. Schein, S. Khartov. In *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Vienna, 2019), p. 840.

- [12] T. Hatakeyama, M. Irie, H. Watanabe, A. Okutsu, J. Aoyagi, H. Takegahara. In *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Florence, 2007), p. 226.
- [13] V. Godyak, Y. Raitses, N.J. Fisch. In *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Florence, 2007), p. 266.
- [14] S. Weis, K.H. Schartner, H. Lob, D. Feili. In *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Princeton, 2005), p. 86.
- [15] B.W. Longmier, N. Hershkowitz. In *41st AIAA Joint Propulsion Conference & Exhibit* (Tucson, Arizona, 2005), p. 3856.
- [16] Y. Hidaka, J. Foster, W. Getty, R. Gilgenbach, Y. Lau. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **25**, 781 (2007). DOI: 10.1116/1.2746041
- [17] B. Weatherford, J. Foster, H. Kamhawi. *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 093507 (2011). DOI: 10.1063/1.3642662
- [18] Д.А. Бондаренко, К.В. Вавилин, С.А. Двинин, И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, И.А. Лобастов, С.Ю. Маринин, А.М. Никонов, М.Ю. Селиванов. *Прикладная физика*, **3**, 11 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-11-16
- [19] A.S. Filatyev, A.A. Golikov, E.A. Kralkina, V.V. Sazonov, K.V. Vavilin. In *Proceedings of the 74th International Astronautical Congress (IAC)* (Baku, 2023), IAC-23-C4.9.7.
- [20] Space Environment (Natural and Artificial) — Earth Upper Atmosphere. ISO/FDIS 14222, ISO 2013.
- [21] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Интеллект, Долгопрудный, 2009)
- [22] E.A. Kralkina, P.A. Nekludova, A.M. Nikonov, K.V. Vavilin, I.I. Zadiriev. *Vacuum*, **198**, 110873 (2022). DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.110873