

На правах рукописи

Подгуйко Николай Андреевич

**ПОЛЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ КАТОД ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ И УСКОРИТЕЛЕЙ ПЛАЗМЫ**

Специальность 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный
руководитель:

Семенкин Александр Вениаминович,
доктор технических наук, доцент

Официальные
оппоненты:

Кралькина Елена Александровна, доктор
физико-математических наук, ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова»,
ведущий научный сотрудник кафедры
физической электроники (Физический
факультет)

Кожевников Владимир Владимирович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)», доцент кафедры 208
«Электроракетные двигатели, энергетические
и энергофизические установки»

Ведущая организация: Акционерное общество "Центральный
научно-исследовательский институт
машиностроения" (АО "ЦНИИмаш")

Защита диссертации состоится 29 сентября 2025 г. в 10 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет)» или на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=184751.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.2.327.06
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электроракетные двигатели (ЭРД) используются для коррекции и стабилизации орбиты спутников, довыведения космических аппаратов (КА) и полетов в дальний космос. Благодаря высокой эффективности использования рабочего тела (РТ) их задачи расширяются. В конструировании спутников наблюдается тенденция к «электрификации» всех узлов, включая двигатели. Зарубежные разработчики традиционно применяют ионные двигатели (ИД), российские – стационарные плазменные двигатели (СПД). В последнее время оба типа двигателей активно используются большинством стран мира.

Одним из важных направлений исследований ЭРД является поиск альтернативных рабочих тел. Перспективным РТ считается иод. По сравнению с ксеноном, применяемым сегодня, иод в разы дешевле и его уровень мировой добычи с избытком перекрывает потребности отрасли. Другим потенциальным РТ для ЭРД является атмосферный воздух как дешевое и доступное вещество.

Использование описанных веществ в качестве РТ ЭРД требует адаптации существующих конструкций двигателей, в частности одного из критически важных узлов ЭРД – катода-компенсатора. Его основными функциями являются объемная нейтрализация заряда и токовая компенсация пучка ионов.

Для перехода на альтернативные рабочие тела необходима разработка катода нового типа, совместимого с химически активными веществами. Замена термоэммиттера на плазму самостоятельного газового разряда может быть одним из вариантов решения поставленной задачи.

Данная работа посвящена исследованию и разработке «холодного» полого магнетронного катода-компенсатора (ХПМК), устойчивого к химически активным средам. Однако, известно, что энергетическая цена электрона в таком катоде в десять раз выше нежели в применяемых термоэмиссионных катодах. В связи с чем, одной из задач исследования был поиск возможностей снижения затрат энергии на генерацию электронов в самостоятельном магнетронном разряде.

Кроме большей химической стойкости разрабатываемый «холодный» полый магнетронный катод отличается малым временем выхода на рабочей режим. Это преимущество катода позволяет рассматривать его возможное применение в качестве плазменного контактора для контроля потенциала корпуса космических аппаратов.

Из выше сказанного следует, что разработка и исследование «холодного» полого магнетронного катода, устойчивого к химически активным средам являются актуальными и важными задачами, требующими скорейшего решения.

Степень разработанности темы исследования

Магнетронный разряд исследуется уже более 50 лет, начиная с 70х годов прошлого столетия. Большая часть исследований связана с технологическим применением для напыления тонких пленок различных материалов.

Известны холодные полые катоды (ХПК), в которых в качестве эмиттера электронов используется самостоятельный газовый разряд. Например, в электронно-лучевых пушках используют эмиттеры электронов с полым катодом на основе тлеющего разряда или разряда Пеннинга. НТК "Платар" серийно производит сеточные ионные источники с одноступенчатыми катодами магнетронного типа.

Существует ряд работ, например Д.А. Голосова и др., в которых исследовалась совместная работа магнетронной распылительной системы (МРС) и ионного ускорителя. Магнетронный разряд в них был источником электронов для ионного ускорителя. В более поздних работах Д.А. Голосова магнетронный разряд поместили в полость и исследовали в качестве самостоятельного источника электронов, названного плазменным источником электронов (ПИЭЛ).

Во всех известных работах катод, в основе которого лежит самостоятельный газовый разряд имеет сравнительно высокую цену электрона и низкий коэффициент использования рабочего тела (КИРТ). В связи с чем была сформулирована цель работы и задачи для ее достижения.

Цель работы:

Повышение энергетической и газовой эффективности «холодного» полого катода на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов для электроракетных двигателей, плазменных контакторов и технологических ускорителей, в том числе для работы на химически активных веществах.

Основными задачами, решаемыми в данной работе, являются:

- изучение рабочих процессов и определение возможных путей повышения энергетической и газовой эффективности ХПК;
- разработка математической модели рабочих процессов в ХПК;
- исследование характеристик экспериментальных образцов ХПК с повышенной газовой и энергетической эффективностью;

- оценка эффективности применения ХПМК в качестве катода-компенсатора ЭРД.

Достоверность полученных теоретических оценок процессов, определяющих работу исследуемого устройства, обеспечивается использованием фундаментальных физических закономерностей, апробированных математических моделей и проверенных в исследуемых условиях допущений. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается применением современного оборудования с известными метрологическими характеристиками, отработанных методик и сопоставлением большого количества экспериментальных данных.

Научная новизна работы:

- предложена многоступенчатая схема ХМПК, отличающаяся тем, что первая «высоковольтная» ступень является источником первичных электронов, а каждая следующая «низковольтная» ступень увеличивает разрядный ток за счет ионизации рабочего вещества относительно предыдущей более чем на единицу, что обеспечивает снижение энергетической цены электрона до 3-7 раз по сравнению с одной ступенью;
- разработана математическая модель рабочих процессов в многоступенчатом ХМПК;
- установлены зависимости параметров эффективности ХПМК от расхода и рода рабочего газа, магнитного поля и количества используемых ступеней;
- экспериментально продемонстрирована работоспособность ХПМК в качестве катода-компенсатора двигателя с замкнутым дрейфом электронов;
- по результатам проведенной работы был зарегистрирован патент Российской Федерации на изобретение № 2792635 С2, опубл. 22.03.2023 /авторы Н.А. Подгуйко, Ю.А. Хохлов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- созданная инженерная математическая модель многоступенчатого ХПМК, позволяет оценить необходимое количество ступеней для заданного рабочего тока;
- разработанная схема полого магнетронного катода может быть применена в ЭРД и технологических ускорителях плазмы, работающих на химически активных веществах;
- разработаны одно- и многоступенчатые схемы «холодного» полого магнетронного катода и получены рабочие характеристики при работе на газах аргоне, криптоне, ксеноне, воздухе и в парах иода;

– экспериментально получено минимальное удельное энергопотребление в трехступенчатом ХПМК – 154 Вт/А, в пятиступенчатом ХПМК – 67 Вт/А, что близко к аналогам в виде ВЧ-катодов с энергопотреблением 43-45 Вт/А.

Методология и методы исследования

В работе были применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Экспериментальный метод исследования ХПМК заключался в измерениях электрических параметров: напряжений и токов разрядов. При этом варьировались такие параметры: материал катода, рабочее вещество и его расход, магнитная конфигурация, количество ступеней ионизации. Используемые физико-математические и инженерные модели основаны на известных общезначимых принципах и физики вакуумных разрядов.

Рекомендации к внедрению

– Конструкции ХПМК могут быть внедрены при разработке новых ЭРД на альтернативных рабочих телах в профильных организациях Роскосмоса.

– Разработанные ХПМК могут быть использованы при создании плазменных контакторов для космических станций, например, в ПАО «РКК «Энергия».

– Созданные ХПМК могут быть внедрены в разработку «холодных» катодов для технологических ионных ускорителей в профильных организациях промышленности.

– Разработанная инженерная математическая модель может быть внедрена в образовательный процесс на кафедрах, ведущих учебный процесс в области электроракетных двигателей и плазменных энергетических установок.

Положения, выносимые на защиту:

– Многоступенчатая схема ХПМК с ценой электрона, близкой к минимальному ионизационному коэффициенту рабочего вещества.

– Инженерная математическая модель многоступенчатого ХПМК, позволяющая рассчитать необходимое количество ступеней для заданного электронного тока.

– Результаты исследования влияния на рабочие характеристики первой и последующих ступеней ХПМК – расхода и рода рабочего газа, величины магнитного поля и материала катода.

– Результаты исследования совместной работы ХПМК и двигателя с анодным слоем.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на пяти конференциях: Международная X юбилейная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий». Казань, 2018; XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. Москва, 2020; XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. Москва, 2021; XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. Москва, 2022; XLVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. Москва, 2023. Материалы диссертации были доложены на заседании научно-технического семинара имени профессора Латышева Л.А. «Проблемы проектирования и применения электроракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов» в МАИ в 2024 году.

По теме диссертационной работы выполнены два гранта от Фонда содействия инновациям: УМНИК-Аэронет 2018, договор №12966ГУ/2018 от 04.05.2018 и СТАРТ-1, договор №4468ГС1/72631 от 15.02.2022.

Личное участие автора. В результате проведенного обзора литературы и патентного поиска автор определил основные требования к холодному катоду, рассмотрел возможные варианты и выбрал схему для исследования в качестве катода-компенсатора ЭРД. С участием автора проведены все экспериментальные исследования с образцами ХПМК и определены основные зависимости рабочих характеристик, а также исследование совместной работы ХПМК и двигателя с анодным слоем (ДАС). Автор лично разработал инженерную математическую модель многоступенчатого ХПМК.

Соответствие паспорту специальности

В работе представлены теория и рабочий процесс катода компенсатора нового типа – ХПМК – одного из основных узлов электроракетных двигателей. Проведена оптимизация новой схемы катода и его параметров. Получены характеристики ХПМК при использовании различных рабочих газов и параметрах катода. Разработана инженерная модель, как метод конструирования, позволяющая рассчитать необходимое

количество ступеней ХПМК. Отражённые в диссертации научные положения соответствуют паспорту специальности 2.5.15.

Публикации

Основные результаты, представленные в диссертации опубликованы в 7 научных работах, из них две статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, одна в журнале, проиндексированном в базе *Scopus*, 4 тезисов докладов на конференциях, общий объемом 3,6 п.л./ 1,2 п.л. Оформлен патент.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 168 страниц машинописного текста, 20 таблиц, 129 рисунков и список литературы, который состоит из 86 источников отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по следующим темам: основные тенденции в разработках и исследованиях летных ЭРД. Проведен анализ характеристик современных и перспективных электроракетных двигателей, катодов-компенсаторов и альтернативных рабочих тел ЭРД. Из чего сделан вывод о необходимости разработки катода-компенсатора нового типа, способного эффективно работать на химически активных альтернативных рабочих телах для ЭРД.

Рассмотрен вопрос использования ионных ускорителей – аналогов ЭРД в технологии, применение нового катода в качестве катода-компенсатора ускорителя. Описано еще одно потенциальное применение разрабатываемого катода – плазменный контактор для космических аппаратов и станций.

В итоге определена соответствующая цель работы и поставлены задачи исследования для ее достижения.

Во второй главе проведен теоретический анализ основных процессов в ХПМК и определены пути улучшения характеристик ХПМК.

Катод-компенсатор для ЭРД обладает двумя параметрами, определяющими его эффективность: энергетическая цена электрона и коэффициент использования рабочего тела. Энергетическая цена электрона – это мощность, затраченная на получение единицы электронного тока:

$$C_e [\text{Вт/А}] = \frac{P_d [\text{Вт}]}{I_e [\text{А}]}, \quad (1)$$

где P_d – мощность эмитирующего разряда/генератора частиц, I_e – выходной электронный ток.

Для ХПМК характерные величины энергетической цены электрона равны напряжению магнетронного разряда, то есть 200-800 В. Расчет показал, что минимальные потери КПД двигателя получаются в случае применения ХПМК с моделями двигателей, имеющими высокие ускоряющие напряжения. Наиболее целесообразно применение ХПМК с высоковольтными моделями СПД и ДАС (5-17% потерь КПД), а также ВЧИД (3-4% потерь КПД).

Коэффициент использования рабочего тела (КИРТ) – параметр, который показывает эффективность использования рабочего тела катодом. Он равен отношению выходного электронного тока катода к расходу рабочего тела через катод, выраженного в токовых единицах:

$$K[\text{электрон/атом}] = \frac{I_e[\text{A}]}{k[\text{Кл/мг}] \cdot \dot{m}[\text{мг/с}]}, \quad (2)$$

где I_e – выходной электронный ток, k – коэффициент перерасчета массового расхода в токовые единицы, $\dot{m}$ – массовый расход рабочего тела.

КИРТ для источника электронов может быть значительно больше 1 благодаря многопериодическому процессу «ионизация атома – нейтрализация иона на катоде – ионизация атома».

Выбранный тип разряда в основном используется в промышленности для распыления материалов. Поэтому, чтобы снизить унос материала катода, была использована полая конфигурация, в которой имеет место переосаждение материала на рабочую поверхность.

Для оценки ресурса как времени работы катода до его выхода из строя вследствие распыления была построена математическая модель распыления. Из расчетов следует, чтобы достичь необходимого ресурса для экспериментальной геометрии при высоких напряжениях 200-300 В ток разряда не должен превышать 5-20 мА. Для получения токов на уровне 1 А и выше напряжение разряда не должно превышать 70 В для титанового катода и 28 В для катода из нержавеющей стали.

В конструкции ХПМК предложено использовать постоянные магниты, которые имеют невысокую точку Кюри (350°C для $SmCo$ или 450°C для $AlNiCo$). Это ограничивает рабочую температуру и соответственно возможное энергопотребления конструкции заданных размеров. В работе произведен тепловой расчет радиационно-охлаждаемого катода, представлена зависимость максимальной вкладываемой мощности от параметров конструкции.

Снижения потерь КПД двигателя, распыления катода и тепловой нагрузки эффективно можно добиваться за счет снижения напряжения или тока разряда. Представлена модель магнетронного разряда, из которой

получена зависимость минимального рабочего напряжения магнетронного разряда от коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии. Сделан вывод о том, что снижения напряжения магнетронного разряда и, соответственно, энергетической цены электрона катода можно добиться подбором комбинации рабочий газ – материал катода, имеющей максимальный коэффициент ион-электронной эмиссии.

Идея об ограничении тока магнетронного разряда малыми величинами для удовлетворения требований по ресурсу и одновременной возможности получения заданных выходных токов большой величины привела к альтернативному решению. Оно состоит в использовании дополнительных разрядных ступеней. Ток первой ступени выбирается в соответствии с расчетом допустимого распыления и нагрева, заданный ток получается за счет—увеличения допустимого тока первой ступени в дополнительных (высших) разрядных ступенях за счет ионизации рабочего вещества. Ожидается, что в первой ступени будет гореть самостоятельный магнетронный разряд, а в высших ступенях – несамостоятельные разряды в скрещенных электрическом и магнитном полях. Предполагается, что ионизация газа в высших ступенях происходит вследствие ударов нейтральных атомов электронами, сгенерированными в предыдущих ступенях. Для реализации идеи увеличения тока в дополнительных ступенях, разрядный ток должен увеличиваться с ростом номера ступени.

Для обоснования работоспособности вышеописанной многоступенчатой газоразрядной схемы была проведена теоретическая оценка. Описана принципиальная схема газоразрядного устройства с источниками питания и произведены расчеты параметров плазмы ступеней. Показано, что увеличения тока в дополнительных ступенях теоретически возможно.

Для оценки эффективности предлагаемого решения была использована формула для энергетической цены электрона (1), уточненная для многоступенчатой схемы:

$$C_{e0}^n = \frac{U_1 + \sum_{i=2}^n U_i e^{\frac{\sum_{k=2}^i U_k}{\eta}}}{e^{\frac{\sum_{k=2}^n U_k}{\eta}}}, \quad (3)$$

где $U_1, U_2 \dots U_n$ – напряжения 1, 2...n-ой ступени, η – ионизационный коэффициент, равный отношению электрического поля к первому ионизационному коэффициенту Таунсенда α .

Величину ионизационного коэффициента в соответствии с теорией, описанной Энгелем А. и Штенбеком М., можно вычислить как:

$$\eta_i = \frac{U_i}{\ln \frac{I_i}{I_{i-1}}}, \quad (4)$$

где U_i – напряжение i -ой ступени ($i > 1$), I_i, I_{i-1} – токи i -ой и $i-1$ ступени.

Величина ионизационного коэффициента (4) определяет эффективность высшей ступени: чем больше отношение токов и меньше напряжение, тем меньше данная величина, то есть меньше затраты энергии на увеличение тока.

Из теории газового разряда известно, что энергия (4) минимальна при оптимальных условиях, определяемых отношением величины электрического поля к давлению E/p , и называется константой Столетова.

По формуле (3) приведена оценка возможного снижения энергетической цены электрона в многоступенчатом ХПМК в зависимости от количества ступеней – ось абсцисс (рисунок 1), если величину ионизационного коэффициента каждой ступени положить равной константе Столетова, а распределение напряжений на высших ступенях принять равномерным с величинами, дающими минимальную цену. Здесь же отмечены точки из экспериментов.

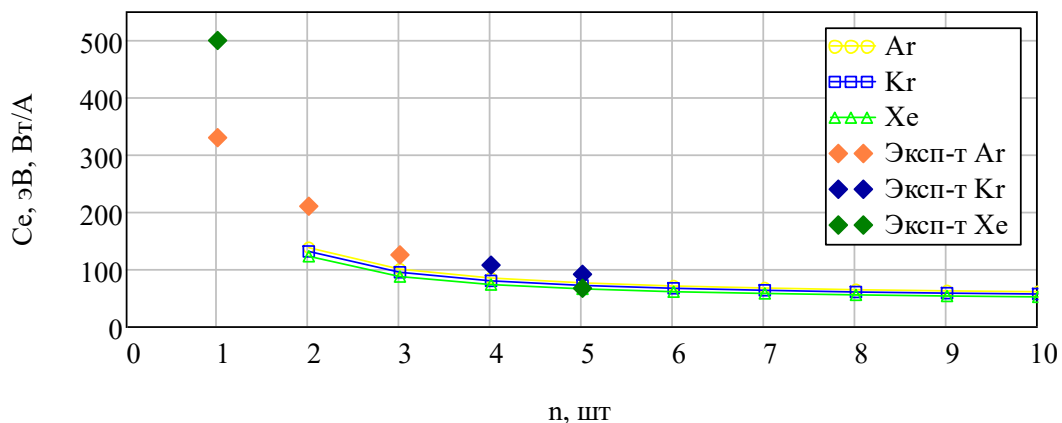


Рисунок 1. Зависимость энергетической цены электрона n -ступенчатого ХПМК в зависимости от количества ступеней.

Путем объединения вышеописанных расчетов была разработана инженерная математическая модель. Модель позволяет рассчитать необходимое количество ступеней ХПМК для заданного выходного тока, рабочей температуры и геометрических параметров. Схема расчета представлены на рисунке 2.

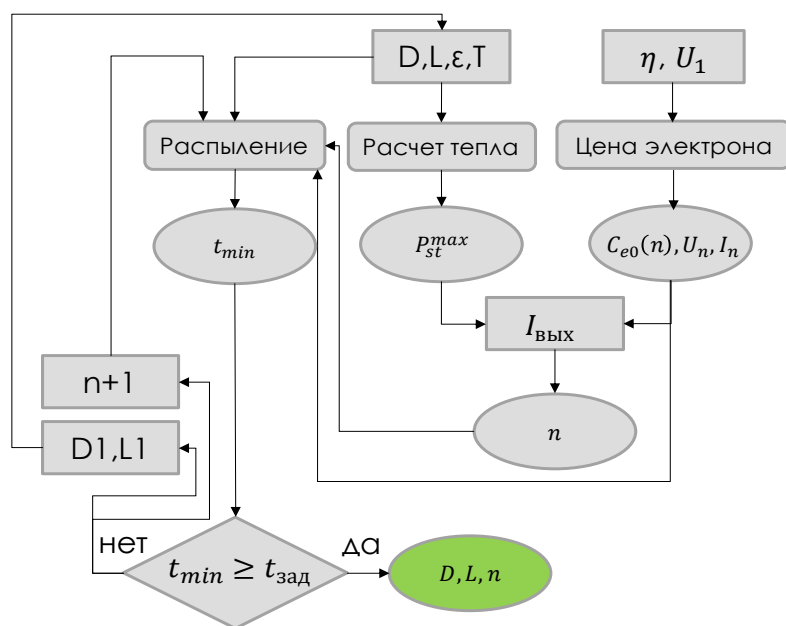


Рисунок 2. Схема расчета инженерной математической модели ХПМК. Входные параметры: D – внешний диаметр ХПМК, L – длина ступни, ε – степень черноты, T – рабочая температура конструкции, η – ионизационный коэффициент, U_1 – напряжение первой ступени, $I_{\text{вых}}$ – заданный выходной ток, $t_{\text{зад}}$ – заданное время распыления 10% катода. Выходные параметры: n – количество ступеней, t_{min} – минимальное время распыления 10% катодов – предполагаемый ресурс.

Входные параметры U_1 , η будут определены в ходе экспериментальных исследований. Для первичной оценки могут быть использованы теоретические оценки этих величин из данной главы.

Корректность использованной модели увеличения тока (расчет цены электрона на рисунке 1) в высших ступенях подтверждается в экспериментальных исследованиях. На рисунке 1 на теоретические кривые нанесены полученные экспериментальные точки. Видно, что ход экспериментальных точек качественно совпадает с теоретической кривой. Несовпадение по абсолютным значениям связано с различным уровнем оптимизации параметров ступеней в разных экспериментах и на разных моделях. Тепловая модель и модель распыления являются стандартными инженерными расчетами.

В третьей главе дано описание экспериментального оборудования, разработанных экспериментальных образцов водо-охлаждаемого и радиационно-охлаждаемого катодов. Представлены схемы экспериментов, описываются методы проведения исследований и расчет погрешностей измерения.

На первом этапе исследований была разработана водо-охлаждаемая конструкция, позволяющая исследовать параметры ХПМК в широком

диапазоне мощностей и плотностей токов, исключая перегрев магнитной системы. На рисунке 3А представлен разрез двухступенчатого ХПМК данной конструкции с расчетным распределением магнитного поля. Одноступенчатый ХПМК представляет собой то же устройство без дополнительной полости, образованной крышкой 4. Простейшая конструкция второй ступени в виде дополнительной детали, образующей полость, в которой есть магнитное поле рассеяния от магнитной системы основной ступени, позволило осуществить первичную проверку гипотезы многоступенчатой схемы.

После подтверждения справедливости гипотезы о многоступенчатости с целью изучения влияния параметров ступеней на работу ХПМК, в том числе температуры конструкции, и определения их оптимальных значений была разработана радиационно-охлаждаемая конструкция, имеющая три ступени (рисунок 3Б). Изоляция между ступенями представляет собой шайбы из вакуумно-плотной керамики КВПТ. Так как при радиационном охлаждении вся конструкция нагревается до нескольких сотен градусов по Цельсию, в данном случае использовали термостойкие магниты *SmCo*.

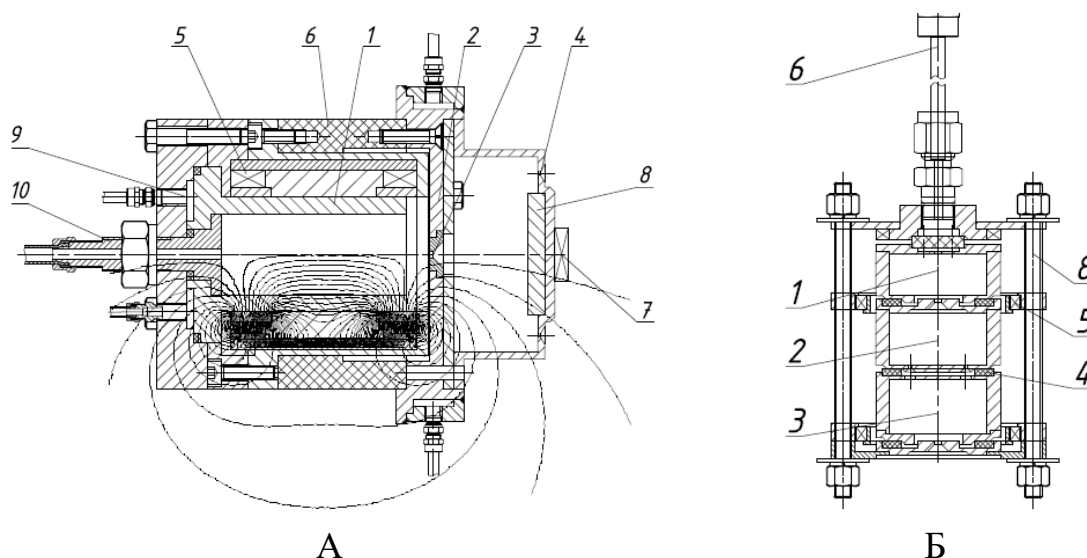


Рисунок 3 – А) Конструкция водо-охлаждаемого ХПМК. 1 – катод; 2 – анод; 3 – анодная вставка с эмиссионным отверстием; 4 – крышка второй ступени; 5 – магниты; 6 – изолятор; 7 – дополнительный магнит второй ступени, 8 – магнитная вставка; 9 – канал охлаждения катода; 10 – штуцер газоподвода. Б) Конструкция радиационно-охлаждаемого трехступенчатого магнетронного катода. 1 – самостоятельная магнетронная ступень, 2,3 – несамостоятельные вторая и третья ступени, 4 – керамический изолятор, 5 – постоянный магнит *SmCo*, 6 – тонкостенная трубка из 12Х18Н10Т.

Электрические схемы подключения одноступенчатой и двухступенчатой водо-охлаждаемой и трехступенчатой радиационно-охлаждаемой конструкций представлены на рисунке 4.

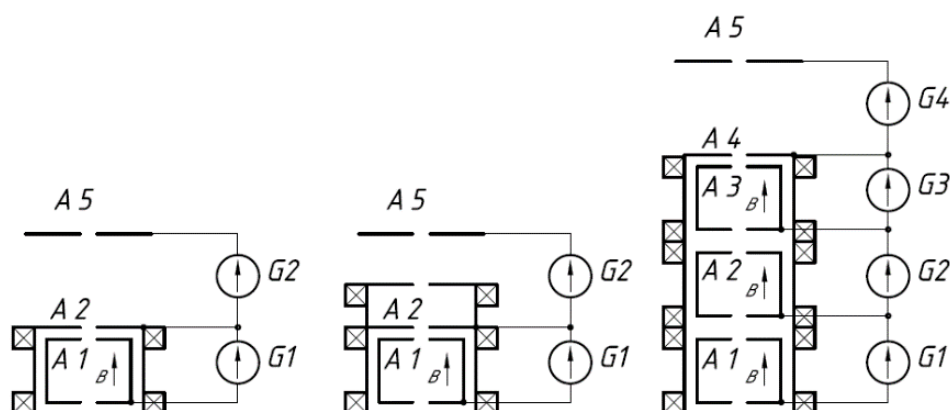


Рисунок 4. Электрические схемы подключения (слева-направо): одноступенчатый ХПМК, двухступенчатый и трёхступенчатый ХПМК

Исследования проводили на экспериментальной установке, созданной на базе вакуумного поста «Булат-6» в МГТУ им. Баумана. Откачка до рабочего давления производилась высоковакуумным диффузионным насосом НВДМ-250.

Контроль за давлением осуществлялся термопарным преобразователем ПМТ-4М и ионизационным датчиком ПМИ-2. Оба датчика подключены к ионизационно-термопарному вакуумметру ВИТ-3. Напуск рабочего газа производился с помощью двухканальной системы напуска газа СНА-2.

В экспериментах с ХПМК применяли цифровые регулируемые источники питания с функцией стабилизации напряжения и тока фирмы MAISHENG: модели MP6002D, MS1201DS и две MS1202DS.

В экспериментах регистрировали следующие параметры: напряжение и ток основного самостоятельного магнетронного разряда, напряжения и токи второй и третьей ступеней, напряжение и ток вытягивающего электрода, давление в вакуумной камере, температуру деталей радиационно-охлаждаемого катода.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований.

Исследование одноступенчатой водо-охлаждаемой конструкции ХПМК было разделено на три этапа. Первый этап исследования заключался в получении зависимости ВАХ магнетронного разряда ХПМК и плазменного «моста» от расхода рабочего вещества. Вторым этапом

получали зависимость тех же характеристик от величины магнитного поля в полости. Третий этап был посвящен исследованиям ВАХ разрядов при различных комбинациях рабочего газа и материала катода.

На заключительном этапе исследований одноступенчатого ХПМК были проведены эксперименты с несколькими материалами катода и с различными газами. Во второй главе рассматривался теоретический вопрос зависимости величины напряжения разряда от γ -коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии. Рассчитать величину γ -коэффициента можно по эмпирической формуле, описанной в работе Ю.П. Райзера «Физика газового разряда»:

$$\gamma = 0,016(\varepsilon_i - 2\varphi_{\text{вых}}), \quad (5)$$

где ε_i – потенциал ионизации рабочего газа, $\varphi_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из материала катода.

На рисунке 5 показаны экспериментально полученные ВАХ разряда на различных комбинациях материал катода – рабочий газ с указанием расчетного значения γ -коэффициента для соответствующих комбинаций по формуле (5).

Полученные данные показывают справедливость теоретической зависимости: чем больше γ -коэффициент, тем ниже напряжение разряда. Таким образом, экспериментально показана принципиальная возможность снижения напряжения в одноступенчатом ХПМК путем подбора комбинации материал катода – рабочий газ с наибольшим γ -коэффициентом. Для исследованных комбинаций наименьшие напряжения соответствуют комбинации титан – аргон, что соответствует наибольшему расчетному γ -коэффициенту.

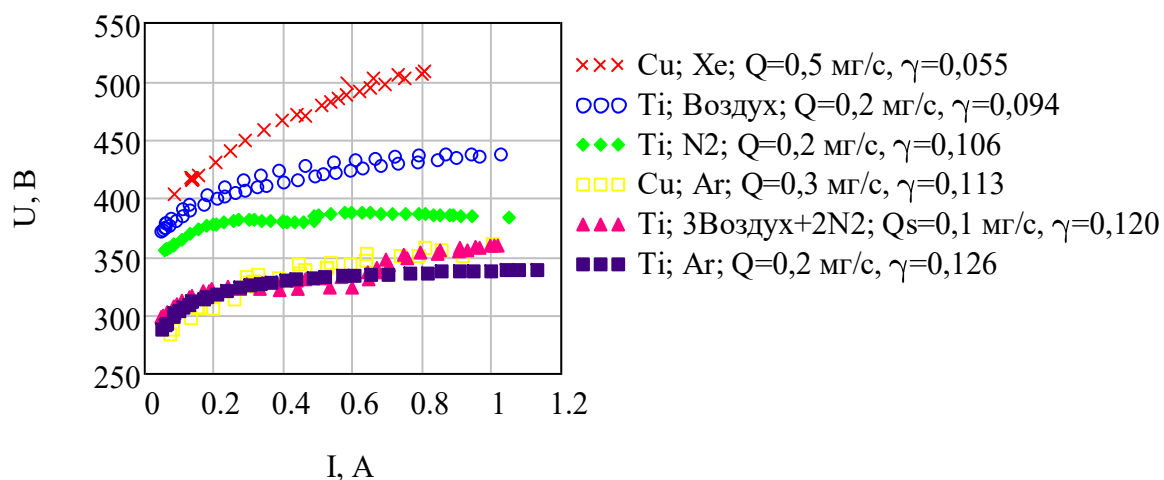


Рисунок 5. Сравнение ВАХ магнетронного разряда на различных комбинациях материал катода – рабочий газ

Для подтверждения возможности работы ХПМК с активными веществами были проведены дополнительные исследования магнетронного разряда с различными материалами катода при работе в парах иода и на воздухе.

Данные исследования проводили на модели магнетронного катода в виде небольшого планарного устройства в отдельной вакуумной камере для экономии ресурсов в силу большой химической активности иода.

Были проведены эксперименты с несколькими материалами катодов-мишеней: нержавеющая сталь (12Х18Н10Т), медь, магний, алюминий и нержавеющая сталь с покрытием ТС (карбид титана). При этом на каждом материале последовательно зажигали магнетронный разряд на ксеноне, воздухе и иоде (рисунок 6).

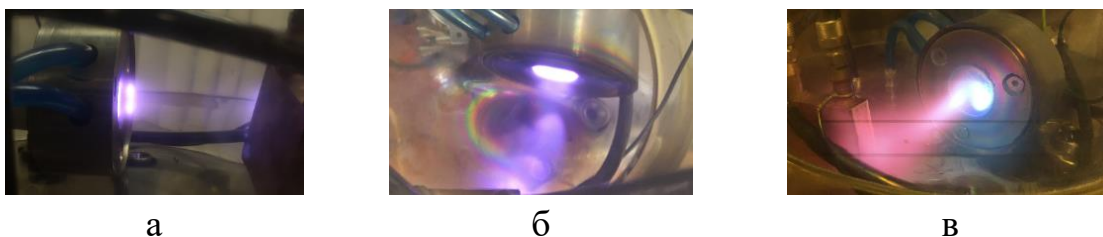


Рисунок 6. Фотографии магнетронного разряда в парах иода на катоде из а) нержавеющей стали, б) меди, в) магния

Особенностью разряда в парах иода является образование химических соединений с материалом катода. Это важно учитывать при выборе итогового материала для катода разрабатываемого устройства. Ниже представлены фотографии некоторых материалов после работы в парах иода (Рисунок 7).

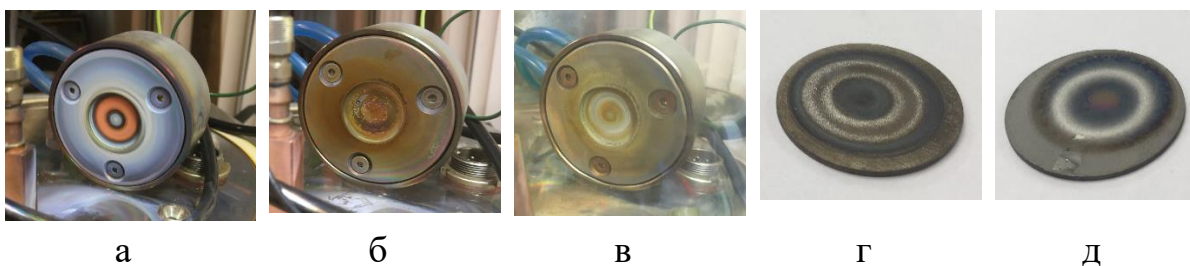


Рисунок 7. Состояние катодов и образовавшиеся пленки после работы магнетрона на иоде: а) медь, б) магний, в) алюминий, г) 12Х18Н10Т, д) 12Х18Н10Т с покрытие ТС

Из результатов экспериментов следует, что магний и алюминий хуже всего подходят в качестве материала катода, так как реализуется разряд в микродугах. Кроме того, по фотографиям после работы с иодом видно, что эти материалы имеют довольно сильную эрозию в парах иода, особенно

магний. Медь и нержавеющая сталь показали лучшие результаты по стабильности горения. На всех материалах наибольшие напряжения соответствуют разряду в парах иода.

Таким образом, исследования влияния расхода рабочего газа, магнитного поле и комбинации материал катода – рабочий газ не позволили добиться значительного снижения рабочего напряжения ХПМК. Поэтому далее перешли к экспериментальному исследованию многоступенчатых конструкций ХПМК.

Первичная проверка гипотезы была осуществлена на той же водо-охлаждаемой конструкции при использовании одной дополнительной детали (см. рис. 3А). Уже на данной конструкции удалось снизить энергетическую цену электрона в 1,6 раза при экспериментальном подборе диаметров отверстий между ступенями и выходного отверстия, что влияло на распределение давлений в ступенях, а также магнитного поля второй ступени.

Далее приводятся результаты исследований трехступенчатой радиационно-охлаждаемой конструкции, проведенных с целью определения оптимальных параметров таких как диаметры отверстий между ступенями (распределение давлений), величины магнитных полей и распределение напряжений на высших ступенях.

Энергетическая цена электрона трехступенчатого ХПМК в соответствии с (3) вычислялась как:

$$C_{e0}^{3st} = U_1 e^{-\left(\frac{U_2}{\eta_2} + \frac{U_3}{\eta_3}\right)} + U_2 e^{-\frac{U_3}{\eta_3}} + U_3, \quad (6)$$

где ионизационные коэффициенты η_2 и η_3 вычислялись как:

$$\eta_2 = \frac{U_2}{\ln \frac{I_2}{I_1}}, \quad \eta_3 = \frac{U_3}{\ln \frac{I_3}{I_2}}. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) следует что, что для получения минимальной цены электрона ХПМК необходимо и достаточно добиваться минимума трех величин: U_1 , η_2 и η_3 .

В результате обработки экспериментальных данных было получено множество кривых, определяющих зависимость эффективности каждой ступени и их совокупности от параметров ХПМК: эффективность высших ступеней определяется величиной ионизационного коэффициента (7), эффективность первой ступени – ее напряжением, а в совокупности, т.е. всего ХПМК – величиной энергетической цены электрона (6). Получено, что минимальные ионизационные коэффициенты высших ступеней реализуются при минимальных давлениях и максимальных магнитных

полях для данной конструкции. Первая же ступень, как и в предыдущих экспериментах, увеличивает свое напряжения при меньших давлениях (расходах). Таким образом, чтобы получить минимальную энергетическую цену электрона, необходимо одновременно обеспечить повышенное давление в первой ступени и минимальное в высших до получения экстремума. Для данной конструкции получена минимальная цена 158 эВ при $U_2=51$ В, $U_3=51$ В, $B_1=95$ мТл, $B_2=60$ мТл, $B_3=48$ мТл, расходе аргона 0,2 мг/с и расчетным распределением давлений $P_1=30$ Па, $P_2=11$ Па, $P_3=5$ Па.

Для исследования совместной работы ХПМК с ДАС, мощностью 0,5-1 кВт была разработана пятиступенчатая радиационно-охлаждаемая конструкция.

В пятой главе представлены результаты исследований совместных испытаний пятиступенчатого ХПМК с экспериментальной моделью ускорителя плазмы, в качестве которой использовали двигатель с анодным слоем.

Испытания проводились на электровакуумном стенде МГТУ им. Баумана ЭРД-4,5. Модель ДАС, разработанная в МГТУ, имела диаметр ускорительного канала 38 мм. В качестве катода-нейтрализатора применялись два варианта: пятиступенчатый ХПМК и термоэмиссионный катод-нейтрализатор. Термоэмиссионный катод-нейтрализатор представлял собой лабораторный газоразрядный катод с накаливаемой вольфрамовой нитью, собственной газоразрядной камерой и вытяжным электродом.

Метод исследования заключался в измерении рабочих параметров устройств таких как: напряжения и токи разрядов, тяга двигателя и потенциалы корпусов и плазмы относительно земли при различных расходах рабочего тела через катод. Работу устройств исследовали в двух вариантах электрического подключения. В первом варианте корпуса ДАС и катодов были подключены к заземленной камере через высокое сопротивление вольтметра, во втором – накоротко.

В результате обработки экспериментальных данных были получены кривые зависимости тяги ДАС и потенциала корпусов устройств от расхода криптона через катод при работе отдельно с ХПМК и с термоэмиссионным катодом. Они представлены на рисунке 8.

За критерий успешной работы ХПМК с ДАС и достаточного уровня компенсации приняли совпадение величин тяги и потенциалов корпусов при работе ДАС с термоэмиссионным катодом и ДАС с ХПМК. Фактически сравнение двух графиков на рисунке 8 говорит о том, что ХПМК может быть

успешно применен в качестве катода-компенсатора для двигателя с замкнутым дрейфом электронов, к которым относятся ДАС и СПД.

Далее были проведены испытания ДАС с ХПМК на ксеноне. Минимальная энергетическая цена электрона в ХПМК на ксеноне составила 66,7 эВ при КРИТ равном 38. При этом ток ДАС был равен 1,66 А, напряжение – 300 В, тяга 19,4 мН, потенциал корпусов – 93,2 В.

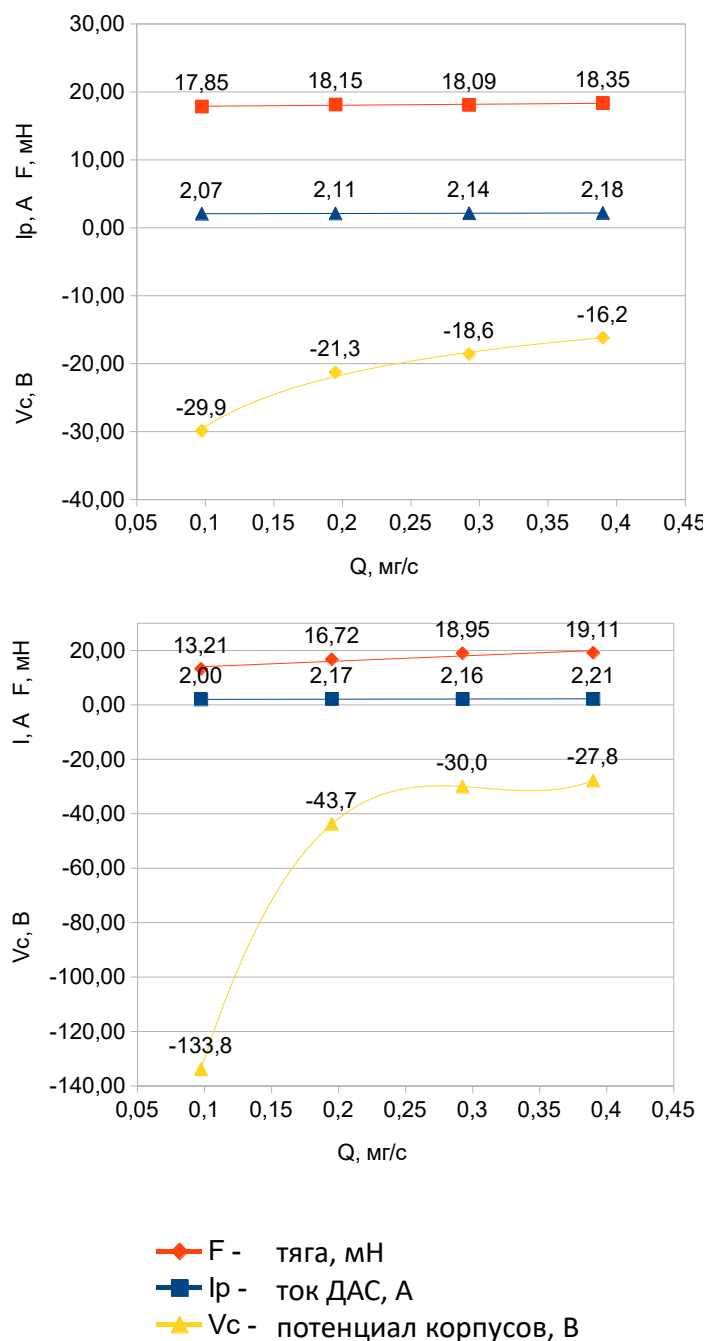


Рисунок 8. Зависимости тяги, разрядного тока ДАС и потенциала корпусов при работе с термоэмиссионным катодом (слева) и ХПМК (справа). I_p – ток разряда, F – тяга, V_c – потенциал корпусов, Q – расход криптона через катод

Полученные данные позволяют сопоставить ХПМК с другими известными схемами «холодных» газоразрядных катодов – высокочастотным (ВЧ) и сверхвысокочастотным (СВЧ) катодами. Ниже приведена сравнительная таблица 1.

Таблица 1. Сравнительная таблица основных характеристик разработанного ХПМК с лучшими аналогами в виде ВЧ- и СВЧ- катодов.

Модель катода-компенсатора	ВЧ	СВЧ	ВЧ	ХПМК1	ХПМК5
Рабочее тело (РТ)	ксенон	ксенон	ксенон	ксенон	ксенон
Расход РТ, мг/с	0,1	0,1	0,5	0,5	0,06
Ток разряда, А	1,4	0,5	1,5	0,75	1,66
Энергетическая цена эл-на, Вт/А	43	44	45	500	66,7
КИРТ, электрон/атом	19	7	4	2	38
Частота генератора, МГц	13,56	4250	2	0 (п.ток.)	0 (п.ток.)

Из сопоставления данных Таблицы 1 видно, что основные характеристики исследованного «холодного» полого магнетронного катод-компенсатора имеют близкие значения, по ряду параметров превосходят известные аналоги. ХПМК успешно испытан совместно с ДАС – одним из вариантов двигателя с замкнутым дрейфом электронов, при этом характеристики двигателя с точностью до погрешности измерений совпадают с данными, полученными при работе с термоэмиссионным катодом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние расхода газа, величины магнитного поля, материала катода и рода рабочего тела на минимальное напряжение разряда одноступенчатого ХПМК. Показано, что в одноступенчатой схеме ХПМК возможности повышения энергоэффективности ограничены высокой тепловой нагрузкой и распылением поверхности электрода катода. Значительное улучшение энергоэффективности достигается при применении многоступенчатой схемы, позволяющей снять указанные ограничения.

2. Разработана инженерная математическая модель рабочих процессов в многоступенчатом ХПМК, учитывающая рабочую температуру магнитов, геометрические параметры и свойства рабочего тела.

3. Разработаны и исследованы экспериментальные образцы ХМПК с повышенной газовой и энергетической эффективностью. Показано, что многоступенчатый ХМПК позволяет в 3-7 раз повысить энергетическую эффективность катода, а газовую – до 20 раз по сравнению с

одноступенчатым вариантом. Так, в пятиступенчатом исполнении получена минимальная цена электрона 66,7 эВ при коэффициенте использования рабочего тела ксенона, равном 38 электрон/атом, что сопоставимо с лучшими аналогами в классе ВЧ- и СВЧ- катодов.

4. Исследована совместная работа ХПМК и ДАС. Подтверждена возможность применения ХПМК в качестве катода-компенсатора электроракетного двигателя с замкнутым дрейфом электронов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ по специальности 2.5.15.:

1. Подгуйко Н. А., Марахтанов М. К., Хохлов Ю. А. Перспективы применения магнетронного разряда в качестве эмиттера электронов в катоде-компенсаторе для электроракетных двигателей //Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. №. 3. С. 167-177. (1,2 п.л./0,4 п.л.)
2. Исследование холодного полого магнетронного катода для электроракетного двигателя/ Н. А. Подгуйко [и др.] //Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. №. 1. С. 109-117. (1,2 п.л./0,4 п.л.)

Патенты:

3. Патент № 2792635 С2 Российская Федерация, МПК H01J 37/077. Газоразрядный источник электронов : № 2021108130 : заявл. 26.03.2021 : опубл. 22.03.2023 / Н. А. Подгуйко, Ю. А. Хохлов. – EDN IMRNVR.

Другие публикации:

4. Podguyko N. A., Marahtanov M. K., Khohlov Y. A. Investigation of the plasma electron source based on discharge in crossed electric and magnetic field in hollow configuration // Journal of Physics: Conference Series: Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma During the Deposition of Functional Coatings, Kazan, 2018. Vol. 1328. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012063. DOI 10.1088/1742-6596/1328/1/012063. EDN PJDTLO. (0,3 п.л./0,1 п.л.)

Тезисы докладов:

5. Подгуйко Н. А. и др. Экспериментальный стенд для стационарного плазменного двигателя на иоде //XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика СП Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. – 2020. – С. 218-220.
6. Подгуйко Н. А. и др. Исследование влияния величины магнитного поля на работу холодного полого магнетронного катода //XLV Академические

чтения по космонавтике, посвященные памяти академика СП Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. – 2021. – С. 292-295.

7. Подгуйко Н. А., Марахтанов М. К., Хохлов Ю. А. Исследование двухступенчатого холодного полого магнетронного катода //XLVI Академические чтения по космонавтике. – 2022. – С. 276-278.

8. Подгуйко Н. А. и др. Исследование совместной работы двигателя с замкнутым дрейфом электронов и холодного полого магнетронного катода //XLVII Академические чтения по космонавтике 2023. – 2023. – С. 250-252.