

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МАИ)**

**Институт № 2
«Авиационные, ракетные двигатели и
энергетические установки»**

Волоколамское ш., дом 4
Москва, А-80, ГСП-3 125993

Факс: (499) 158-29-77

Телефон: (499) 158-00-02, 158-58-70

Телефон дирекции: (499) 158-27-31

Электронная почта: mai@mai.ru

Электронная почта института № 2:
dekan2@mai.ru

«9» сентября 2025 г.

Рег. № 200-025-286

Ученому секретарю ДС 24.2.327.06,
созданного на базе ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»

доктору технических наук, доценту

Краеву В.М.

Уважаемый Вячеслав Михайлович!

Высылаю Вам отзыв официального оппонента, кандидата технических наук Кожевникова Владимира Владимировича на диссертацию Подгуйко Николая Андреевича «Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: «Отзыв официального оппонента...» на 8 л. в 2 экз.

Директор дирекции Института № 2

«Авиационные, ракетные двигатели и
энергетические установки» МАИ



В.П. Монахова

В.П. Монахова

Исп.: Кожевников Владимир Владимирович

Тел.: +7 499 158-00-08

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«09» 08 2025 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Кожевникова Владимира Владимировича, доцента кафедры 208 «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» Московского авиационного института, на диссертационную работу Подгуйко Николая Андреевича «Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационной работы

Электроракетные двигатели (ЭРД) позволяют решать широкий спектр задач современной космонавтики. Двигательные установки, в состав которых входят ЭРД, применяются для коррекции и стабилизации орбит околоземных космических летательных аппаратов (КЛА), а также решают ряд задач довыведения и маршевых задач.

Ионные двигатели (ИД) и стационарные плазменные двигатели (СПД), которые сегодня являются одними из самых распространённых типов ЭРД, постоянно модифицируются. Чаще всего это связано с необходимостью повышения эффективности работы в рамках ограниченной мощности малых КЛА. Однако, с появлением в последние годы масштабных спутниковых группировок малых аппаратов, разработчики столкнулись с перспективой ограниченной доступности одного из основных рабочих тел для ИД и СПД — ксенона. Ксенон достаточно дорог, а его годовое мировое производство может оказаться недостаточным для возрастающих нужд космонавтики. В качестве альтернатив ксенону сегодня рассматриваются: другие инертные газы, атмосферные газы и йод.

Изменение рабочего тела, в особенности на химически активное вещество, влечёт за собой модификацию отдельных узлов ЭРД. Одним из узлов, на изменение которого приходится обращать внимание, — узел катода, обеспечивающего нейтрализацию извлечённого ионного пучка в ИД или поддержание разряда и нейтрализацию пучка в СПД. Традиционно

используются полые катоды, ресурс которых ограничен деградацией и испарением термоэмиссионной вставки-эмиттера. При этом эмиттер должен избегать контакта со средами химически активных газов. Дополнительным условием работы полых катодов также является длительный выход на рабочие режимы.

Описанные тенденции приводят к необходимости модификации старых или разработке новых типов источников электронов для ЭРД. Диссертационная работа Подгуйко Николая Андреевича посвящена исследованию и разработке холодного полого магнетронного катода (ХПМК), устойчивого к химически активным средам. При этом автором предложены и исследованы многоступенчатые схемы ХПМК, позволяющие повысить энергетическую эффективность катода. Применение подобных катодов не ограничивается задачами нейтрализации извлечённого пучка ЭРД. А малые времена, требующиеся ХПМК для выхода на рабочие режимы, позволяют применять данные катоды для контроля потенциала корпуса крупного КЛА или для процессов ионной технологии. Сказанное позволяет сделать вывод о высокой актуальности избранной Н.А. Подгуйко темы диссертационной работы.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в том, что автором работы:

1. Предложена многоступенчатая схема ХПМК, отличающаяся тем, что основная ступень является источником первичных электронов, а каждая последующая ступень увеличивает разрядный ток за счет ионизации рабочего вещества относительно предыдущей более чем на единицу. При этом на второй и последующей ступенях не требуются такие уровни разности потенциалов, как на основной. Это обеспечивает снижение энергетической цены электрона.
2. Разработана инженерная модель рабочих процессов в многоступенчатом ХПМК.
3. Установлены зависимости параметров эффективности ХПМК от расхода и рода рабочего газа, магнитного поля и количества используемых в ХПМК ступеней.

4. Экспериментально продемонстрирована работоспособность ХПМК в качестве катода-компенсатора двигателя с замкнутым дрейфом электронов.
5. По результатам проведенной работы был зарегистрирован патент Российской Федерации на изобретение № 2792635 С2, опубл. 22.03.2023 /авторы Н.А. Подгуйко, Ю.А. Хохлов.

Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, определяется:

1. Использованием фундаментальных физических закономерностей, обоснованных инженерных моделей и корректным выбором исходных допущений и ограничений при постановке задачи исследования.
2. Получением экспериментальных результатов с применением современного сертифицированного оборудования с известными метрологическими характеристиками.
3. Использованием отработанных методик для обработки и сопоставления большого количества экспериментальных данных.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что:

1. Разработанная схема полого магнетронного катода может быть применена в ЭРД и ускорителях плазмы, работающих с химически активными газами.
2. Инженерная математическая модель многоступенчатого ХПМК, позволяет оценить количество ступеней, необходимое для заданного рабочего тока.
3. Разработаны одно- и многоступенчатые схемы полого магнетронного катода. При этом получены рабочие характеристики при работе на инертных газах (аргоне, криптоне, ксеноне), а также при работе на воздухе и в парах иода.
4. 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.

Диссертационная работа Подгуйко Николая Андреевича «Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы» является законченной научно-квалификационной работой. В тексте диссертации содержится авторское изложение решения актуальной научной задачи.

Введение диссертации содержит: обоснование актуальности темы диссертационной работы, определение цели и задач диссертации, обозначение научной новизны и практической значимости исследования. Во введении также содержится информация об апробации работы, подчеркивается личный вклад Н.А. Подгуйко и даются рекомендации к внедрению полученных результатов. Формулируются положения, выносимые на защиту диссертации.

В первой главе диссертационной работы автором проведён обзор литературы, показывающий уровень актуальных и перспективных разработок в области электроракетных двигателей. Так описываются распространённые типы ЭРД, использующие принцип ускорения ионов в электростатическом поле для получения тяги, и основные типы катодов, применяемые для компенсации объёмного заряда ионов. Подчёркивается необходимость использования альтернативных рабочих тел в перспективных ЭРД.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому рассмотрению возможностей холодного полого магнетронного катода. Проводятся оценки параметров магнетронного разряда ХПМК, позволяющие добиться минимального снижения КПД двигателя. Дается оценка ресурса и теплового режима катода.

Автором предлагается многоступенчатая схема ХПМК, применяя которую можно добиться роста КПД двигателя, снижения интенсивности распыления катода и снижения тепловой нагрузки. Это удаётся за счёт использования дополнительных ступеней, в которых ионизация атомов рабочего тела осуществляется образовавшимися в предыдущих ступенях электронами. В таком многоступенчатом ХПМК возможно ограничить напряжение и ток магнетронного разряда основной ступени небольшими величинами при сохранении высоких уровней извлекаемого электронного тока.

В данной главе приводятся зависимости рассеиваемой излучением мощности для конструкций ХПМК с различной длиной, степенью черноты излучающей поверхности и основными размерами; оценки снижения энергетической цены электрона при увеличении количества ступеней ХПМК для разных газов. Автор приводит зависимость максимального выходного электронного тока от количества ступеней ХПМК для нескольких радиационно-охлаждаемых конструкций, рабочих температур и степеней черноты излучающей поверхности

Обобщая оценки и зависимости, Н.А. Подгуйко предлагает инженерную математическую модель, позволяющую рассчитать количество потребных ступеней ХПМК, если известны выходной ток, рабочая температура и геометрические размеры катода.

Третья глава диссертационной работы Н.А. Подгуйко содержит описание разработанных конструкций одноступенчатого водо-охлаждаемого ХПМК с возможностью установки второй ступени и трёхступенчатого радиационно-охлаждаемого ХПМК.

В данной главе также приведено описание экспериментальной установки для исследования работы магнетронных разрядов и показана достоверность получаемых в ходе экспериментов данных. Особое внимание уделено описанию работы с парами иода, а также методике оценки давления паров иода в камере по температуре системы хранения йода.

В **четвёртой главе** диссертации приводятся результаты обширной серии экспериментальных исследований для одноступенчатого водо-охлаждаемого ХПМК с возможностью установки второй ступени и трёхступенчатого радиационно-охлаждаемого ХПМК.

Автором экспериментально показана принципиальная возможность снижения напряжения в одноступенчатом ХПМК путем подбора комбинации «материал катода — рабочий газ» с наибольшим коэффициентом вторичной ион-электронной эмиссии. Эксперименты с активными рабочими телами показали принципиальную возможность работы катодов на базе магнетронного разряда в парах иода и с атмосферными газами.

Для демонстрации более значимого снижения напряжения разряда катода и роста его энергоэффективности автор провел ряд экспериментов с

многоступенчатыми ХПМК. Так уже двухступенчатая конструкция водоохлаждаемого ХПМК позволила снизить цену электрона в 1,6 раза. В результате обработки экспериментальных данных было получено множество кривых, определяющих зависимость эффективности каждой ступени и их совокупности от параметров ХПМК: эффективность дополнительных ступеней определяется величиной коэффициента ионизации, эффективность основной ступени — разрядным напряжением в ней, а эффективность всего ХПМК — величиной энергетической цены электрона.

В ходе экспериментальной отработки получены сведения о том, что минимальные ионизационные коэффициенты дополнительных ступеней реализуются при минимальных давлениях и максимальных магнитных полях. Основная же ступень увеличивает свое напряжения при меньших давлениях. Таким образом, чтобы получить минимальную энергетическую цену электрона, необходимо одновременно обеспечить повышенное давление в основной ступени и минимальное в дополнительных.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию совместной работы ХПМК с одним из двигателей с замкнутым дрейфом электронов — двигателем с анодным слоем (ДАС).

Исследования экспериментального образца ХПМК совместно с экспериментальной моделью ДАС проводились на электровакуумном испытательном стенде ЭРД-4,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. В качестве экспериментального образца ускорителя плазмы использовался двигатель ДАС01КР, разработанный в МГТУ им. Баумана, средний диаметр ускорительного канала которого равен 38 мм, а рабочий диапазон мощности двигателя составляет 500-1500 Вт. Для проведения эксперимента была разработана пятиступенчатая радиационно-охлаждаемая конструкция ХПМК.

Автором подтверждена работоспособность ХПМК в качестве катода-компенсатора двигателя с замкнутым дрейфом электронов; показано, что снижения КПД двигателя при использовании ХПМК снижается при увеличении рабочего напряжения ДАС, в том числе за счет снижения цены электрона ХПМК. Величина снижения КПД для ДАС на ксеноне равна 3,4% относительно КПД ДАС с термоэмиссионным катодом равным 37,5%.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Диссертационная работы изложена на 168 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников. Диссертационная работа написана подробно и логично. Материал диссертации изложен последовательно и структурированно, оформлен должным образом и хорошо проиллюстрирован множеством схем, графиков и изображений.

В работе виден личный вклад автора в разработку инженерной математической модели ХПМК, в разработку конструкций исследуемых одноступенчатых и многоступенчатых ХПМК, в подготовку и проведение экспериментов.

Однако по содержанию работы можно сделать несколько **замечаний**:

1. Представляется интересным более подробно рассмотреть альтернативные методы применения разрабатываемых в работе ХПМК (см. п. 1.4) и указать некоторые параметры пучка электронов, требуемые при использовании катода для контроля потенциала корпуса КЛА или для технологических целей.

2. Ресурс, определяемый по критерию распыления 10 % материала катода, выглядит недостаточно обосновано (см. п. 2.3). В будущем представляется необходимым провести дополнительный эксперимент, показывающий реальный недостаток тока электронов, после чего разобрать конструкцию и оценить картину внутри.

3. Также представляется интересным провести эксперименты, описанные в главе 4 в более единообразных физических условиях, возможно ещё более унифицировав конструкцию ХПМК и обеспечив его работу на всех типах рабочих тел на одной вакуумной установке.

4. В тексте работы имеются небольшие поправки. А ряд обозначений физических величин не сохраняет своё единообразие, однако это не приводит к путанице в трактовке результатов.

Приведённые замечания не влияют на общую характеристику диссертационной работы Подгуйко Николая Андреевича «Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы» и её положительную оценку как законченной научно-квалификационной работы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты опубликованы в 7 печатных работах, в том числе двух статьях рецензируемых изданий, входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.5.15. — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», а также требованиям, предъявляемым к диссертациям «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013. Автор диссертационной работы — Подгуйко Николай Андреевич, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Доцент кафедры 208 «Электроракетные
двигатели, энергетические и
энергофизические установки»
Института № 2 «Авиационные, ракетные
двигатели и энергетические установки»
Московского авиационного института, к.т.н.

В.В. Кожевников
29.09.2025

Кожевников Владимир
Владимирович

Подпись В.В. Кожевникова заверяю

Директор дирекции Института № 2
«Авиационные, ракетные двигатели и
энергетические установки» МАИ



В.В. Монахова

Монахова Вероника
Павловна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Почтовый адрес: 125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Телефон: +7 499 158-92-09, +7 499 158-00-08

Электронная почта: kozhevnikovvv@mai.ru

С отзывом ознакомлен 09.09.2025 *Подгуйко Н.А.*