

## Отзыв

официального оппонента, д.ф.-м.н. Кралькиной Елены Александровны, в.н.с. физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 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

Неотъемлемой частью электроракетных двигателей (ЭРД) является катод-компенсатор, необходимый для компенсации объемного заряда в потоке ускоренных ионов, создающих тягу. В настоящее время основным типом катодов-компенсаторов, использующихся в составе ЭРД, являются дуговой термоэмиссионный полый катод, требующие для своего функционирования дорогой инертный газ – ксенон, запасы которого ограничены. В связи с этим в космической отрасли появился запрос на использование альтернативных, более дешевых рабочих тел, а именно иода и атмосферных газов. Очевидно, что такая замена является нетривиальной задачей, т.к. указанные рабочие тела являются химически активными, и их контакт с материалами, обладающими высокими эмиссионными свойствами приводит к их деградации. В качестве альтернативы термоэмиссионным дуговым полым катодом в ряде стран разрабатываются плазменные ВЧ и СВЧ катоды. В диссертационной работе Подгуйко Н.А. предложен еще один интересный подход к решению проблемы. В качестве катода-компенсатора предложено использовать «холодный» полый магнетронный катод-компенсатор (ХПМК), работающий на тлеющем разряде постоянного тока. Известно, что для полых «холодных» катодом характерны высокая энергетическая цена электронов и большая скорость распыления материала катода. Автором диссертации за счет модификации и оптимизации конструкции ХПМК экспериментально доказана возможность значительного снижения затрат энергии на генерацию тока электронов и уменьшения распыления стенок катода при работе в том числе на химически активных рабочих телах: иоде и воздухе. Прототипы ХПМК апробированы при совместной работе с двигателем с анодным слоем, показавшей их эффективность. В связи с этим диссертационная работа Подгуйко Николая Андреевича представляется своевременной и актуальной.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«11» 08 2025 г.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

На основе критического анализа литературы и требований к параметрам катодов-компенсаторов, необходимых для работы в составе современных космических аппаратов, автором поставлена цель разработать ХПМК для ЭРД, позволяющий работать, как на инертных газах, так и на химически активных рабочих телах. Для реализации поставленной задачи Подгуйко Н.А. изучены рабочие процессы в ХПМК, определены пути повышения энерго- и газовой эффективности катода, построена инженерная модель ХПМК, выполнены экспериментальные исследования моделей ХПМК, апробировано использование оптимизированной модели ХПМК совместно с моделью двигателя в замкнутом дрейфом электронов. Постановка задачи и предлагаемые Н.А. Подгуйко методы ее решения представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Список использованной литературы содержит 87 наименований. Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на многочисленные экспериментальные данные, выполненные на сертифицированном оборудовании с помощью современных экспериментальных методов исследования газового разряда и устройств на его основе, на данные, полученные с помощью численного моделирования, а также на сравнении, там, где это возможно, с результатами, полученными другими авторами.

## **Достоверность и новизну исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Новизна результатов, полученных автором диссертации, подтверждается:

- результатами расчетов на основании разработанной инженерной модели ХПМК, позволяющей проанализировать влияние конструктивных параметров и внешних условий на характеристики катода;
- результатами экспериментов по исследованию характеристик моделей одноступенчатого и многоступенчатого ХПМК в зависимости от материала катода, рабочего тела, индукции магнитного поля, давления газа в катоде;
- результатами апробации работы оптимизированной модели ХПМК совместно с моделью двигателя с замкнутым дрейфом электронов.

## **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Работа, выполненная Н.А. Подгуйко, представляет интерес как в целом, так и в отдельных ее частях. Так, полученные результаты, касающиеся параметров ХПМК в зависимости от материала катода, внешних условиях, количества ступеней имеют несомненное будущее, как в заявленном диссертантом применении в космической технике, так и в наземных технологиях модификации поверхности электронов, напыления покрытий, травления и т.д. Кроме того, инженерная модель процессов в ХПМК может быть использована при проектировании катодов, работающих на широком классе рабочих газов.

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты исследования могут быть применены при создании новых ЭРД с альтернативными рабочими телами в организациях Роскосмоса, а также при разработке «холодных» катодов для технологических ионных ускорителей в профильных промышленных структурах. Кроме того, они полезны для проектирования плазменных контакторов космических станций, например, в ПАО «РКК «Энергия».

Разработанная инженерная математическая модель может быть включена в учебные программы кафедр, специализирующихся на подготовке специалистов в области ЭРД и плазменных энергетических установок.

## **Содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В **первой** главе диссертации выполнен обзор литературы, рассмотрены основные типы электрореактивных двигателей. Особое внимание уделено конструкции и характеристикам известных катодов-компенсаторов. В конце главы сформулированы цель и основные задачи работы.

Во **второй** главе диссертации на основании анализа физических процессов в ХПМК предложена концепция многоступенчатого катода. Она основана на идее ограничения напряжения горения и разрядного тока самостоятельного магнетронного разряда в первой ступени, позволяющего повысить ресурс ХПМК и снизить тепловую нагрузку. Для получения электронного тока, необходимого для компенсации объемного заряда потока ионов, предложено использовать последующие ступени, где реализуются

несамостоятельные разряды в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ионизация газа в высших ступенях происходит вследствие ударов нейтральных атомов электронами, сгенерированными в предыдущих ступенях. Параметры разряда в последующих степенях выбираются из соображения, чтобы рост тока электронов от ступени к ступени происходил без значительного распыления и нагрева материала катода.

Используя в качестве основной характеристики катода энергетическую цену электрона, Подгуйко Н.А. выполнены оценки энергетической цены электрона многоступенчатого ХПМК в зависимости от числа ступеней при использовании в качестве рабочего тела аргона, криптона и ксенона.

На основании выполненных расчетов в диссертации разработана инженерная математическая модель, позволяющая рассчитать количество необходимых ступеней ХПМК для заданного выходного тока, рабочей температуры и геометрических размеров катода.

В **третьей** главе описаны экспериментальная установка и основное использованное оборудование, в частности, система хранения и подачи иода. Большое внимание в главе уделено описанию конструкции ХПМК, расчету магнитных полей в его объеме. Рассмотрены системы электропитания, схемы измерения напряжений и токов многоступенчатого катода

В главе выполнены оценки давления газов в полости ступеней катода в зависимости от расхода газов, описаны методы оценки давления паров иода. Специальный раздел посвящен описанию методики экспериментов и оценкам погрешности измерений.

В **четвертой** главе представлены результаты систематического исследования одноступенчатой модели ХПМК при изменении материала катода и рабочего тела, индукции внешнего магнитного поля, количества ступеней, давления в ступенях. Показано, что одноступенчатая модель позволяет создать поток электронов, позволяющий нейтрализовать ток ионов в ЭРД. Эффективность катода повышается с ростом давления в его объеме и индукции магнитного поля. Использование химически активных газов, в частности паров иода, сопровождается образованием пленки на поверхности катода и требует использования специальных материалов. Сравнение энергетической цены электрона ХПМК с аналогичной характеристикой термоэмиссионного катода свидетельствует не в пользу одноступенчатого ХПМК. Однако, увеличение числа ступеней до двух уже сопровождается значительным (до 1.6 раз) понижением цены электрона. Энергетическая эффективность тем выше, чем ниже давление в высших ступенях. В работе показано, что характеристики многоступенчатого ХПМК не уступают лучшим образцам ВЧ и СВЧ катодов.

В пятой главе исследована совместная работа пятиступенчатого ХПМК и ДАС. Показано, что использование разработанного катода позволяет получить то же качество компенсации ионного пучка, как и применение термоэмиссионного катода. Снижение КПД ДАС, оснащенного ХПМК, составляет всего 3.4% по сравнению с КПД ЭРД, оснащенного термоэмиссионным катодом.

### Достоинства и недостатки работы

Диссертация Н.А.Подгуйко является законченной работой, в котором выполнены разработка новой модели многоступенчатого «холодного» полого магнетронного катода-компенсатора, работающий на тлеющем разряде постоянного тока. Подгуйко Н.А. выполнен большой объем работ по оптимизации плазмообразования в ступенях ХПМК, разработана инженерная численная модель, позволяющая предсказать основные характеристики катода-компенсатора в зависимости от использованного рабочего газа и числа ступеней. Работу отличает большой объем выполненных экспериментов и расчетов. Вместе с тем работа не свободна от недостатков:

1. Знакомство с работой сильно затрудняет тот факт, что конструкция ХПМК, конфигурация использованного магнитного поля, описаны только в главе 3. В диссертации многократно упоминается о наличии скрещенных полей в ступенях катода, однако, в тексте работы отсутствует указание на эти области при обсуждении конструкции катода.
2. На странице 38 указано, что в акте ионизации электрон расходует энергию, набранную на длине свободного пробега между столкновениями. На самом деле в акте ионизации электрон теряет энергию, равную энергии ионизации.
3. Описание рисунка 4.5 на странице 95 непонятно. Если правые кривые соответствуют увеличению напряжения после зажигания, а левые – уменьшению напряжения после зажигания, то непонятно, почему ток справа в максимуме по абсолютной величине меньше левых кривых.
4. Это замечание носит характер совета. Основной объем первой ступени катода является типичным полым катодом, работающем на тлеющем разряде постоянного тока. Из теории известно, что эффект полого катода возникает при условии, что области отрицательно свечения от противоположных сторон катода перекрываются. Это соображение может позволить найти связь между размером катода и давлением в нем.

## Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация Н.А. Подгуйко «Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы» является законченной научно-квалификационной работой, посвященной разработке новой модели многоступенчатого «холодного» полого магнетронного катода-компенсатора, работающего на тлеющем разряде постоянного тока. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Результаты опубликованы в 7 печатных работах, в том числе двух статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Представленная работа соответствует паспорту специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук «Положением о присуждении учёных степеней», а ее автор Подгуйко Николай Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Доктор физико-математических наук,  
Ведущий научный сотрудник  
физического факультета МГУ  
119991, Москва, Ленинские горы,  
МГУ, физический факультет,  
кафедра физической электроники  
Телефон: +7(495)939-4773  
e-mail: [ekralkina@mail.ru](mailto:ekralkina@mail.ru)

Е. Кралькина  
07.08.2025

Кралькина Е.А.

Подпись в.н.с. физического факультета МГУ д.ф.-м.н. Кралькиной Е.А. удостоверяю.

И.о. декана физического факультета МГУ  
доктор физико-математических наук, профессор



Белокуров В.В.

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова  
Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, дом 1, строение 2,  
Физический Факультет Тел.: +7(495)939-16-82; +7(495)939-31-60 E-mail: [info.ff@org.msu.ru](mailto:info.ff@org.msu.ru)

С отзывом ознакомлен 11.08.2025 *Подгуйко Н.А.*