

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Майстренко Дмитрия Александровича «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина», представленную на соискание степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Актуальность

Существующая в настоящее время физическая картина мира основана на совокупности экспериментальных результатов, накопленных в мире. Очевидно, что адекватность существующих теорий и представлений о причинах тех или иных явлений в значительной мере зависит от наличия методик измерения основных физических величин и их точности. Это делает работы по минимизации погрешности и усовершенствованию известных экспериментальных методов и разработке новых методов диагностики непреходяще значимой.

Диссертационная работа Майстренко Д.А. посвящена разработке методик измерения распределения ионов по энергиям, плотности ионного тока и зарядового состава струи плазмы электроракетных двигателей с помощью разработанного автором нового апертурного зонда и зонда типа фильтра Вина. Апертурный зонд имеет существенные преимущества по сравнению с ранее разработанными зондами в виде расширенного на несколько порядков рабочего диапазона концентраций плазмы и стабильной во времени погрешности зонда, меньшей 2%. Помимо разработки апертурного зонда автором диссертации изучена методика измерения доли многозарядных ионов с помощью фильтра Вина, использующего скрещенные магнитные и электрические поля. Используя скрещенные $E \times B$ поля, автором диссертации разработана конструкция фильтра Вина и методика измерения доли двухзарядных ионов в струе плазмы, создаваемой электроракетными двигателями, для случая, когда энергия однозарядных ионов находится в диапазоне от 100 до 2000 эВ.

Разработанные методы, апробированные автором для исследования параметров струи на выходе из холловского и ионного двигателей, позволили повысить точность измерений и расширить диапазон применимости методов измерения энергетического распределения ионов и доли двухзарядных ионов. Это делает диссертационную работу **актуальной**.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«04» 09 2026.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

На основе критического анализа литературы и требований к методам измерений энергетического распределения ионов и доли двухзарядных ионов в плазменной струе электроракетных двигателей Соискателем поставлена цель разработать методики измерения указанных величин с помощью апертурного зонда и фильтра Вина. Для реализации поставленной задачи Майстренко Д.А. предложена конструкция апертурного зонда на основе использования ионно-оптической системы в сочетании с подачей положительного потенциала непосредственно на коллектор ионов, а также использования коллектора сложной формы со сферическими углублениями напротив каждой апертуры ионно-оптической системы. Кроме того, Соискателем выполнены 1) численное моделирование влияния объемного заряда, геометрии апертурного зонда на точность измерения характеристик струи, 2) апробация зонда при исследовании струи холловского и ионного двигателей.

Д.А. Майстренко проанализировал зависимость разрешающей способности фильтра Вина от его геометрических параметров и энергии ионов и выбрал геометрических параметры фильтра Вина, позволяющего измерять доли двухзарядных ионов ксенона в диапазоне энергий ионов от 50 до 2000 эВ с разрешающей способностью не хуже 0,5%.

Постановка задачи и предлагаемые Д.А. Майстренко методы ее решения представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Список использованной литературы содержит 33 наименования. 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 новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна результатов, полученных автором диссертации, подтверждается:

1. Полученной теоретической зависимостью погрешности измерения энергетического спектра ионов струи ЭРД с помощью

многосеточного зонда с задерживающим потенциалом от плотности тока ионов.

2. Обоснованием и экспериментальным подтверждением геометрических параметров разработанного апертурного зонда, обеспечивающего погрешность измерения не более 2% в диапазоне плотности тока от 10^{-4} до 10^2 А/м² и энергии ионов от 1 до 4000 эВ.

3. Полученной зависимостью разрешающей способности фильтра Вина от его геометрических параметров и энергии ионов, выбором геометрических параметров фильтра Вина для измерения доли двухзарядных ионов в диапазоне энергий ионов от 50 до 2000 эВ с разрешающей способностью не хуже 0,5%.

4. Разработанной методикой измерения параметров плазменных струй ЭРД с применением разработанного апертурного зонда и фильтра Вина, обладающей высокими метрологическими характеристиками.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Работа, выполненная Д.А.Майстренко, представляет интерес как в целом, так и в отдельных ее частях. Так, разработанные конструкции апертурного зонда и фильтра Вина 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.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты исследования могут быть применены при усовершенствовании известных и разработке новых ЭРД в организациях Роскосмоса, а также при использовании источников плазмы в наземных технологиях.

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

Полученные теоретические результаты могут быть использованы для лучшей интерпретации данных с других существующих зондов стандартной конструкции.

Разработанные зонды могут быть использованы как предприятиями Роскосмоса, так и другими организациями для исследования влияния струй плазмы на бортовые устройства разрабатываемых космических аппаратов.

Содержание диссертации

В первой главе рассмотрена методика измерения плотности ионного тока пучка и распределения ионов по энергиям. Проведен теоретический и расчетный анализ многосеточной конструкции зонда с задерживающим потенциалом, позволяющий измерять, как энергетический спектр ионов, так и плотности ионного тока в требуемом диапазоне концентраций плазмы.

Во второй главе проведен обзор использования $E \times V$ методики (фильтра Вина) для измерения доли многозарядных ионов в ЭРД различных типов. На основании достижений других авторов и на основании моделирования, проведенного автором, учитывающего пространственный заряд и конечную ширину энергетического спектра ионов, доказана работоспособность данной методики. Также сделан вывод об отсутствии опубликованных в открытых источниках конструкций, достоверно способных измерять долю двухзарядных ионов в струях холловских двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В.

В третьей главе представлена конструкция нового апертурного зонда с задерживающим потенциалом, сформулирована методика измерения с помощью апертурного зонда энергетического спектра ионов и плотности ионного тока в струях с энергией ионов до 4000 эВ при плотностях ионного тока от 0.0001 до 100 А/м². Автор провел расчетную и экспериментальную верификацию методики и доказал, что максимальная погрешность измерения наиболее вероятной энергии ионов составляет 2%. Расчеты проводились в зарегистрированном, ранее апробированном, программном пакете IOS-3D. Экспериментальная верификация проводилась одновременно со сравнением с зондом стандартной многосеточной конструкции в тех условиях, в которых погрешность стандартного зонда была ранее подтверждена меньшей 5%.

Четвертая глава описывает результаты разработки зонда для измерения доли двухзарядных ионов в струях холловских двигателей. На основании теоретических формул, обоснованных зарубежными авторами и с помощью численного моделирования автор подобрал геометрию зонда, который может различать долю двухзарядных ионов с теоретической чувствительностью в 0.2%. Также в данной главе проведена экспериментальная демонстрация работы зонда и подтверждена чувствительность зонда к доле двухзарядных ионов в 0.5% при средней погрешности полученной вольт-амперной характеристики в 2%.

В заключительной пятой главе представлены результаты экспериментальной апробации методики в струях холловских двигателей мощностью до 2500 Вт. Измерения проводились как с помощью разработанного апертурного зонда и зонда типа фильтра Вина, так и с помощью стандартного зонда Фарадея и трехсеточного зонда. Результаты продемонстрировали

адекватность разработанной методики. На основании полученных результатов были рассчитаны следующие параметры:

- Зависимость средней энергии ионов от угла к оси двигателя
- Коэффициенты эффективности двигателей
- Общий ток пучка струи плазмы двигателя

Достоинства и недостатки работы

Диссертация Д.А. Майстренко является законченной работой, в которой 1) выполнен расчетный анализ зависимости погрешности многосеточного зонда от плотности ионного тока; 2) разработан апертурный зонд с задерживающим потенциалом и доказаны его преимущества; 3) выполнен анализ ЕхВ методики измерения доли многозарядных ионов в струе плазмы, оптимизирована конструкция фильтра Вина для проведения измерений в плазме холловских двигателей с напряжением разряда до 2000 В; 4) выполнена апробация апертурного зонда и фильтра Вина при исследовании струи электроракетных двигателей.

Вместе с тем работа не свободна от недостатков:

1. В диссертации утверждается, что между плазмой и эмиссионным электродом ионного двигателя существует падение потенциала порядка температуры электронов. На самом деле разность потенциалов между плазмой и эмиссионным электродом равна плавающему потенциалу, пропорциональному температуре электронов, но не равному ей.
2. В выводах у диссертации указано, что автором показана необходимость разделять ЕхВ зонды на два класса: зонды для диагностики холловских. Однако, в тексте диссертации на этом вопросе внимание не акцентируется.
3. В названии главы 2 следовало бы добавить слово «конструкции» перед словом «зондов».
4. Обзор литературы содержит небольшое число ссылок на известные в литературе результаты.

Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация Д.А. Майстренко «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина» является законченной научно-квалификационной работой, посвященной разработке апертурного зонда для измерения энергетических распределений ионов и плотности ионного тока, а также фильтра Вина для оценки доли двухзарядных ионов в струе плазмы. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Результаты опубликованы в 3 печатных работах 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 Майстренко Дмитрий Александрович 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

Е. Кр.

Кралькина Е.А.

01.09.2026

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

[Подпись]
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

С отзывом ознакомлен и.о. декана Майстренко Д.А.