

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
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
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

« 01 » 09 2026 г.

Рег. № 200-025-390

Ученому секретарю ДС 24.2.327.06,
созданного на базе ФГАОУ 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 Майстренко Дмитрия
Александровича «Методика измерения параметров плазменных струй
электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина»,
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 7 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

О. ДЕП. ИСПОЛНЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

« 01 » 09 2026 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 Майстренко Дмитрия Александровича «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина», 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.

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, а также с рассмотрением, в качестве альтернатив ксенону, других инертных газов, атмосферных газов и йода. Вносимые изменения требуют, в том числе, учёта взаимодействия плазмы струи двигателя с аппаратом.

Важным направлением развития в области диагностики параметров ЭРД является исследование плазмы струи двигателя, которое позволяет не только диагностировать работу самих двигателей, определяя структуру КПД двигателя, но и оценивать влияние струи двигателя на бортовое оборудование космических аппаратов. Для проведения такой диагностики чаще всего необходимо измерять плотность ионного тока, распределение ионов по энергиям и долю двухзарядных ионов в струе плазмы.

В настоящее время для измерения распределения ионов по энергиям используются многосеточные зонды, которые требуют соответствия геометрии зонда радиусу Дебая исследуемого плазменного образования, при этом электроды многосеточных зондов подвержены ионному

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«01» 09 2026 г.

распылению. Такой зонд имеет плохо предсказуемую погрешность и не подходит для проведения измерений в плазме, где радиус Дебая в разных областях пространства может отличаться более чем на порядок. Для измерений доли многозарядных ионов в струях направленных пучков плазмы используют зонды со скрещенными электрическим и магнитным полем (ExB-зонд или фильтр Вина). Подобные зонды используются для диагностики доли многозарядных ионов в струях ЭРД, однако в литературе не представлены конструкции, способные работать в широких диапазонах энергий ионов с требуемой для диагностики точностью.

Диссертационная работа Майстренко Дмитрия Александровича посвящена исследованию процессов в зондах, которые могут влиять на интерпретацию результатов измерений и разработке методики измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина повышенной точности и с широким диапазоном параметров исследуемого плазменного образования. В ходе проведенных исследований Д.А. Майстренко осуществил серию расчетов и экспериментов, направленных на изучение основных источников погрешностей существующих методик измерения и разработал новую методику, основанную на применении разработанного им нового апертурного зонда и фильтра Вина, адаптированного для измерения доли двухзарядных ионов в плазменных струях СПД с напряжением разряда до 2 кВ. Разработанная методика упрощает диагностику струи плазмы ЭРД, позволяя использовать всего два зонда для полного спектра измерений, также она обладает меньшей погрешностью по сравнению с аналогичными методиками, в основе которых лежит многосеточный зонд. Сказанное позволяет сделать вывод о высокой актуальности избранной Д.А. Майстренко темы диссертационной работы.

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

1. Впервые получена теоретическая зависимость погрешности измерения энергетического спектра ионов струи ЭРД с помощью многосеточного зонда с задерживающим потенциалом от плотности тока ионов.
2. Научно обоснованы и экспериментально подтверждены геометрические параметры 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. Впервые получена зависимость разрешающей способности фильтра Вина от его геометрических параметров и энергии ионов, выбраны геометрические параметры фильтра Вина для измерения доли двухзарядных ионов в диапазоне энергий ионов от 50 до 2000 эВ с разрешающей способностью не хуже 0,5 %.
4. Разработана методика измерения параметров плазменных струй ЭРД с применением разработанного апертурного зонда и фильтра Вина, обладающая высокими метрологическими характеристиками.

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. Выбраны геометрические параметры апертурного зонда, для измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока в диапазоне плотности 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.
2. Выбраны геометрические параметры зонда типа Фильтра Вина для измерения доли двухзарядных ионов в диапазоне энергий ионов от 50 до 2000 эВ с чувствительностью к доле двухзарядных ионов не хуже 0,5%.
3. Проведена экспериментальная верификация методики измерений, в результате которой итоговая погрешность методики при измерении наиболее вероятной энергии ионов, плотности ионного тока и доли двухзарядных ионов составила не более 2%.

4. Проведена апробация методики в плазме струй СПД. Получены коэффициенты эффективности перспективного СПД номинальной мощностью 100 Вт.
5. Полученные результаты могут быть использованы для разработки модели влияния плазменных струй двигателей различной мощности на бортовые устройства космических аппаратов.

Диссертационная работа Майстренко Дмитрия Александровича «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина» является законченной научно-квалификационной работой. В тексте диссертации содержится авторское изложение решения актуальной научной задачи.

На основании анализа существующих конструкций зондов и с помощью математического моделирования, учитывающего пространственный заряд, распределение ионов по энергиям и ненулевой угол падения ионов на зонд, в диссертации показана зависимость погрешности многосеточной конструкции зонда от плотности тока исследуемой плазмы и доказано, что погрешность измерений зондом стандартной многосеточной конструкции может достигать 40%.

Автор в ходе своей работы предложил и сначала с помощью моделирования, а затем с помощью эксперимента верифицировал новый апертурный зонд, способный работать с погрешностью меньше 2% во всем интересующем диапазоне плотностей токов и энергий ионов исследуемого плазменного образования. Основной особенностью зонда стало использование ионно-оптической системы для фокусировки ионного пучка и отсечки электронов, а также использование коллектора сложной формы для повышения точности измерений. В диссертационной работе также научно обоснованы геометрические размеры нового апертурного зонда и представлена экспериментально верифицированная методика измерения плотности ионного тока и распределения ионов по энергиям с помощью разработанного автором зонда.

В диссертационной работе автор на основании анализа существующих конструкций зондов и с помощью математического моделирования, учитывающего пространственный заряд, распределение ионов по энергиям и ненулевой угол падения ионов на зонд, показал зависимость оптимальной геометрии зонда типа фильтра Вина от энергии ионов исследуемого пучка и подобрал оптимальную геометрию зонда для измерения доли двухзарядных ионов в струях холловских двигателей с

напряжением разряда от 100 до 2000 В с чувствительностью к доле двухзарядных ионов в 0,5%.

Диссертационная работы изложена на 100 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 описанных инженерных конструкций и методик экспериментов.

По содержанию работы можно сделать несколько **замечаний**:

1. Представляется интересным более подробно рассмотреть схемы сбора и обработки экспериментальных данных, применяющиеся при работе с апертурным зондом и фильтром Вина. И отдельно рассмотреть схемы усиления сигналов зонда и особенности экранирования элементов системы сбора и обработки данных.
2. Также представляется интересным провести эксперименты по исследованию плазменных образований струй других типов двигателей, например, одного из самых распространённых — ионного двигателя. А также рассмотреть применимость разработанных зондов и методики в плазме ЭРД, работающих на других рабочих телах (криптоне, аргоне, атмосферных газах и йоде).
3. В тексте работы имеются небольшие поправки и погрешности оформления.

Однако, указанные замечания не влияют на общую характеристику диссертационной работы Майстренко Дмитрия Александровича «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина» 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 — Майстренко Дмитрий Александрович, 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.

 Кожевников Владимир Владимирович
31.08.16

Подпись В.В. Кожевникова заверяю

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



 Монахова Вероника Павловна

Федеральное государственное автономное 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
04.09.2016  Майстренко Д.А.