

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский государственный
технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»



____ П.А.Дроговоз

ОТЗЫВ

ведущей организации, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» 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

Диссертация Майстренко Дмитрия Александровича «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина» посвящена исследованию применимости методик зондовой диагностики для измерения энергетического спектра ионов, плотности ионного тока и зарядового состава ионов струи электроракетных двигателей. Измерения параметров струй позволяют исследовать как эффективность работы двигателя, так и предсказать влияние плазмы струи на бортовые устройства космических аппаратов.

Актуальность темы. Тема работы является, безусловно, актуальной, поскольку существующие методики измерения обладают низкой точностью, а рабочий диапазон параметров плазмы, в котором могут работать зонды с адекватной погрешностью, на несколько порядков меньше требуемого, учитывая рабочий диапазон параметров плазмы в струе современных электроракетных двигателей. В настоящее время измерение распределения ионов по энергиям производится с помощью многосеточных зондов с задерживающим потенциалом, которые имеют ряд недостатков. Основная проблема таких зондов в необходимости соответствия геометрических размеров зонда радиусу Дебая измеряемой плазмы, что не позволяет проводить измерения одним и тем же зондом и в центре струи двигателя, и на периферии струи, где радиус Дебая может отличаться на несколько порядков. Измерения зарядового состава ионов плазмы струи измеряют с помощью ЕхВ зондов (фильтров Вина). При этом в открытых источниках не существует исследований применимости такой конструкции для измерения доли многозарядных ионов в плазме холловских двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В.

Общая характеристика работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе подробно рассмотрена методика измерения плотности ионного тока пучка и распределения ионов по энергиям. Приведен обзор используемых конструкций зондов для решения данной задачи и с помощью численного моделирования показаны принципиальные недостатки многосеточной конструкции зондов, которую берут за основу авторы других работ. Более того, в обзоре рассмотрены наиболее уникальные идеи, которые предлагали различные авторы и сделан вывод о применимости различных методов для решения поставленной в данной диссертационной работе задачи. В итоге в данной главе сделан вывод о целесообразности разработки нового зонда, способного работать во всем диапазоне концентраций плазмы, возможной в современных холловских и

ионных двигателях.

Во второй главе проведен обзор методик использования $E \times V$ зонда (фильтра Вина) для измерения доли двухзарядных ионов в ЭРД различных типов. В русскоязычной литературе не обнаружено подтверждения успешного использования $E \times V$ зондов в струях холловских двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В. Однако зарубежные авторы подробно анализировали особенности $E \times V$ методов, в том числе способов обработки экспериментальных данных. Однако в этих публикациях также не найдено подтверждений успешного использования предложенных конструкций в струях холловских двигателей с энергией ионов в диапазоне от 100 до 2000 эВ.

Автор подробно проанализировал с помощью численной модели $E \times V$ методику измерения зарядового состава ионов струи и сделал вывод о зависимости оптимальных геометрических размеров зонда от энергии ионов исследуемой плазмы. На основании проведенных расчетов автор пришел к заключению о возможности разработки зонда, способного восстанавливать долю двухзарядных ионов в струе холловских двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В.

Третья глава описывает разработку нового, так называемого апертурного зонда и его расчетную и экспериментальную верификацию. Данный зонд принципиально отличается от используемых в данный момент многосеточных зондов наличием ионно-оптической системы и может работать с контролируемой погрешностью в диапазоне плотностей ионного тока до 100 А/м^2 .

В экспериментах, проведенных совместно с многосеточным зондом, были обнаружены различия в измеренных распределениях ионов по энергиям, которые объясняются физическими явлениями внутри многосеточного зонда и подтверждаются результатами моделирования. Отличия в измеренных спектрах оказались минимальны при отклонениях зонда от оси струи на углы 45 и 60 градусов, что соответствует диапазону плотностей токов от 0.05 до 0.5 А/м^2 . При больших плотностях тока пространственный заряд начинает влиять на точность и ухудшать работу многосеточного зонда, при меньших плотностях тока

регистрируется слишком низкий сигнал и слишком высокий разброс ионов по углу падения на зонд, что приводит к зашумленному спектру и значительным сложностям в интерпретации результатов. Апертурный зонд не имеет этих недостатков, что показано как теоретически, так и моделированием. На основании проведённых измерений сделан вывод, что измеренные апертурным зондом энергетические спектры позволяют восстанавливать распределения ионов по энергиям для ионов с энергией до 2000 эВ с погрешностью меньшей 2% во всем требуемом диапазоне плотностей тока.

Четвертая глава описывает разработку $E \times B$ зонда и его верификацию. Основное требование, предъявляемое к зонду – способность идентифицировать потоки ионов различной кратности в плазме с энергией ионов от 100 до 2000 эВ, которая имеет место в центре струи холловских двигателей. Также следует учитывать тот факт, что ожидаемая доля двухзарядных ионов при напряжениях разряда порядка 100 В может составлять меньше процента, и необходимо обеспечить достаточную чувствительность зонда. Основная особенность разработанного зонда – оптимизированная с помощью численного моделирования длина как входной и выходной трубки, так и зоны фильтрации.

Пятая глава содержит результаты измерения параметров струи холловского двигателя номинальной мощностью 100 Вт, которые демонстрируют применимость и превосходство разработанных зондов при низкой плотности тока и энергии ионов. Разработанные зонды были использованы совместно с трехсеточным зондом и зондом Фарадея для исследования струи 100 Вт холловского двигателя с диаметром разрядного канала в 7 см.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования, включающие разработку и верификацию методики по измерению энергетического спектра ионов, плотности ионного тока и зарядового состава ионов плазмы ЭРД со следующими рабочими параметрами плазмы: энергия однозарядных ионов от 50 до 2000 эВ, плотность ионного тока от 0.0001 А/м^2 до 100 А/м^2 при электронной температуре плазмы до 10 эВ.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимости

результатов

Новизна работы состоит в следующем.

1. С помощью численного моделирования доказаны недостатки существующих методик по измерению энергетического спектра ионов и доли двухзарядных ионов.
2. Предложена и экспериментально верифицирована новая методика измерения распределения ионов по энергиям и плотности ионного тока с помощью нового апертурного зонда
3. Предложена и экспериментально верифицирована новая методика измерения доли двухзарядных ионов холловских двигателей с помощью зонда типа фильтра Вина.

Теоретическая значимость работы заключается в доказательстве зависимости погрешности многосеточного зонда от плотности тока ионов исследуемого пучка и расчетной демонстрации применимости апертурной конструкции зонда с задерживающим потенциалом для измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока в струях плазмы существующих холловских двигателей любой мощности.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики по измерению энергетического спектра ионов, плотности ионного тока и зарядового состава ионов плазмы ЭРД со следующими рабочими параметрами плазмы: энергия однозарядных ионов от 50 до 2000 эВ, плотность ионного тока от 0.0001 А/м^2 до 100 А/м^2 при электронной температуре плазмы до 10 эВ. В работе разработаны зонды и проведена экспериментальная верификация применимости конструкций и показана высокая точность зондов.

Степень достоверности результатов проведенных исследования представленных в диссертации Майстренко Д.А., обеспечивается использованием общепринятых подходов к испытаниям, регистрации параметров измерений моделированию физических процессов в зондах. Используемая модель и программное обеспечение прошли верификацию на реальных данных, с использованием аналитических решений и экспериментальных результатов

других исследователей, а также экспериментальных результатов, полученных при непосредственном участии автора диссертационной работы. В части экспериментальных исследований достоверность обусловлена использованием современных методик измерений, сбора и обработки данных. Все исследования проводились на сертифицированном оборудовании.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы разработчиками двигателей и космических аппаратов для более корректного расчета структуры КПД двигателей и для исследования влияния струи плазмы двигателей на бортовые устройства космических аппаратов.

По представленной работе можно сделать следующие замечания:

1. В обзоре представлено сравнительно небольшое число работ. Не до конца обосновано, на чем основан выбор конструкций зондов, которые автор включил в обзор.
2. В экспериментальной части работы нет информации про метрологическую поверку используемых приборов и методик.
3. Некоторые выводы сформулированы в общем виде. В частности, не представлены конкретные значения параметров разработанных зондов.

Однако, указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы, в том числе практической значимости. Проведенные исследования можно характеризовать как научно обоснованные методические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач.

Диссертация Майстренко Дмитрия Александровича на тему «Методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научная задача, имеющая значение для развития направления в ракетно- космической отрасли, связанного с исследованием параметров плазмы струй электроракетных двигателей и с совершенствованием конструкций этих двигателей. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне.

Новые научные результаты, полученные автором работы и сделанные на их

основании выводы можно охарактеризовать как научно обоснованные и достоверные, и признать новыми и научно значимыми.

Тема и содержание диссертации Майстренко Дмитрия Александровича соответствуют паспорту специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (пункты 10, 19 и 25).

Автореферат полно и объективно отражает содержание диссертации. Выводы по диссертации соответствуют выводам, опубликованным в автореферате.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов, а также по оформлению и содержанию представленная диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Автор работы, Майстренко Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Результаты диссертационной работы рассмотрены на заседании кафедры «Теплофизика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (протокол № 04.78-04/12 от 03.06.2026 г.) и получили положительную оценку.

Отзыв составили:

Доцент кафедры «Теплофизика»,
канд. технических наук

Заведующий кафедрой «Теплофизика»,
докт. физ.-мат. наук


Н.В. Кукшинов


А.Ю. Чирков

*С отзывами ознакомлен
Майстренко Д.А. 04.09.2026*