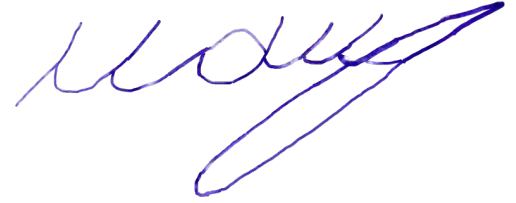


На правах рукописи



Майстренко Дмитрий Александрович

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ
СТРУЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С
ПОМОЩЬЮ АПЕРТУРНОГО ЗОНДА И ФИЛЬТРА ВИНА**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех).

Научный руководитель: **Ловцов Александр Сергеевич**,
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Кралькина Елена Александровна**,
доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова», ведущий научный сотрудник
кафедры физической электроники (Физический
факультет)
Кожевников Владимир Владимирович,
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
доцент кафедры 208 «Электроракетные двигатели,
энергетические и энергофизические установки»

Ведущая организация: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»

Защита состоится 21 сентября 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=187260

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
д.т.н., доцент

Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Электроракетные двигатели (ЭРД) находят широкое применение на борту современных космических аппаратов (КА). Это связано, с одной стороны, с повышением требований к транспортным задачам в космосе, а с другой – с прогрессом в развитии средств бортовой энергетики. Такие достоинства, как высокий удельный импульс, малые массовые и габаритные характеристики, возможность регулирования величины тяги делают применение ЭРД весьма перспективным.

В первую очередь, ЭРД используются для решения таких задач, как приведение геостационарных КА в точку стояния, удержания КА в орбитальной позиции и увода КА на орбиту захоронения по окончании срока его эксплуатации. Известны применения ЭРД для межпланетных перелетов, например, для полета к Луне. В последние годы ЭРД начали применяться для довыведения высокоорбитальных спутников связи с низкой околоземной орбиты на геостационарную. Столь широкое применение ЭРД обусловлено тем, что высокие скорости истечения, достигающие 50-100 км/с, позволяют (по сравнению с традиционными химическими двигателями, у которых скорость истечения не превышает 5 км/с) существенно снизить массу топлива, необходимого для решения задачи, и, следовательно, значительно увеличить массу полезной нагрузки КА.

Для обеспечения эффективного использования таких двигателей особую важность имеют задачи, связанные с диагностикой струи плазмы двигателя. Измерение параметров плазмы струи позволяет как диагностировать работу самого двигателя, определить эффективность его работы, так и рассчитать влияние струи плазмы двигателя на бортовые устройства космических аппаратов. Наиболее важными параметрами плазмы, которые необходимо для этого измерять, являются распределение ионов по энергиям, плотность ионного тока и зарядовый состав струи.

Для измерения распределения ионов по энергиям в настоящее время используется многосеточный зонд. Для проведения корректных измерений конструкция традиционного многосеточного зонда должна удовлетворять определенным требованиям. Одно из них заключается в том, чтобы расстояние между сетками было не больше четырех длин Дебая, а диаметр отверстий в сетках не превышал одну-две длины Дебая. Чем выше плотность плазмы, тем меньше длина Дебая и тем меньше должен быть зазор между сетками и размер их отверстий. Поэтому максимальная плотность плазмы, для диагностики которой можно использовать зонд, ограничена сверху технологически достижимым размером ячеек сетки и расстоянием между сетками. При этом разработанный под измерения в относительно плотной плазме зонд будет неизбежно иметь низкую прозрачность, что затруднит использование зонда в плазме с низкой плотностью тока. Недостатком многосеточных зондов также является плохо предсказуемая прозрачность сеток для ионов, которая зависит от энергии ионов и изменяется во время пребывания зонда в струе из-за ионного распыления сеток. Низкая точность, с которой известна прозрачность зонда для ионов, не позволяет измерять с его помощью абсолютные значения плотности тока ионов с достаточной точностью. Для таких измерений обычно используют дополнительные зонды, например, цилиндр Фарадея.

Для измерения зарядового состава ионов чаще всего используется так называемый $E \times B$ зонд или фильтр Вина, который обеспечивает пространственное разделение заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях, имеющих изначально различную скорость. В струе плазмы ЭРД ионы, имеющие разную величину заряда, имеют кратно разную скорость, так как они были ускорены одинаковой разностью потенциалов. В зонде создаются ортогональные электрическое и магнитное поля, перпендикулярные потоку влетающих в зонд частиц, и ионы разного заряда отклоняются по-разному.

Основной недостаток таких зондов — это крайне слабый сигнал на коллекторе ионов (до 100 нА в случае относительно плотной плазмы на расстоянии в паре десятков сантиметров от двигателя и порядка 1 нА в случае измерений в более отдаленной области). При попытке улучшения сигнала критически падает спектральное разрешение зонда, и увеличивается погрешность определения долей многозарядных ионов в плазме ЭРД. Также, как показано в данной работе с помощью численного моделирования, уровень сигнала и спектральное разрешение зонда чувствительно к энергии ионов исследуемого пучка, и поэтому в настоящий момент используемые зонды с конкретной геометрией предназначены для измерения доли многозарядных ионов только двигателей с конкретным диапазоном ускоряющих напряжений. Еще одним недостатком являются крайне высокие требования к юстировке зонда, что создает существенные сложности при работе, особенно учитывая то, что юстировка должна проводиться относительно оси струи плазмы двигателя, которая не всегда совпадает с осью двигателя. Следовательно, применение таких зондов сопряжено с существенными сложностями и невозможностью использовать один и тот же зонд для измерения параметров плазменных струй холловских двигателей (ХД) с отличающимися в несколько раз напряжениями разряда. Также, в открытых источниках не найдена информация об успешной разработке зонда для измерения доли двухзарядных ионов ХД во всем диапазоне напряжений разряда таких двигателей.

Степень разработанности темы исследования:

Исследованиями в области диагностики плазмы ЭРД занимается множество специалистов по всему миру и было создано множество различных вариантов зондов для измерения энергетического спектра ионов, плотности ионного тока и доли двухзарядных ионов.

Зарубежными авторами Neubel и Hutchinson был произведен подробный анализ многосеточных зондов и теоретически проанализирована и обоснована методика разработки многосеточного зонда, подходящего для измерений в плазмах с различными рабочими параметрами.

Было проведено много попыток расширить рабочий диапазон параметров плазмы и улучшить точность зондов и создано множество зондов различных конфигураций, но почти все из них используют многосеточный принцип, что по определению не дает возможности применить такие подходы к созданию зонда, способного работать в диапазоне концентраций плазмы от 10^{12} до 10^{18} м^{-3} , которая имеет место в струях ЭРД. Наиболее интересным и близким по конструкции к разработанному в данной работе апертурному зонду является зонд без сеток авторов Neu и Groll, который подробно рассмотрен в главе 1 настоящей диссертации. Однако

в открытых источниках не представлено доказательств применимости зонда во всем интересующем диапазоне параметров плазмы, а проведенные в данной диссертации оценки позволяют делать вывод о применимости зонда в струях с плотностью ионного тока до 10 A/m^2 , что соответствует плотности тока в струях двигателей только с мощностью до 2 кВт.

Измерениями доли многозарядных ионов в струях ЭРД занимаются также достаточно давно и наиболее подробно механизм исследования этой величины с помощью фильтра Вина описан автором Kim.

Авторы Reid и Shastri в период 2010-2020 годы опубликовали несколько работ, посвященных исследованию применимости фильтров Вина для измерения доли многозарядных ионов в струях ЭРД. Одним из наиболее важных результатов была формула, позволяющая теоретически оценить спектральное разрешение зонда исходя из его геометрических размеров и энергии ионов исследуемого пучка. Авторы показали корректность данной формулы, но она не учитывает влияние пространственного заряда, что не позволяет использовать ее вместо моделирования.

Таким образом, актуальность работы обусловлена следующим:

1. Измерение распределения ионов по энергиям, плотности ионного тока и доли двухзарядных ионов является необходимым при оптимизации конструкции разрабатываемых ЭРД и расчёте их воздействия на приборы и конструкционные элементы КА.

2. Существующие на данный момент методики не могут обеспечить требуемый уровень точности в достаточно широком рабочем диапазоне параметров плазмы.

Цель и задачи исследования:

Целью работы является разработка методики измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с помощью апертурного зонда и фильтра Вина.

Решена научная задача разработки методики измерения параметров плазменных струй ЭРД с применением апертурного зонда и фильтра Вина, обладающей высокими метрологическими характеристиками. Частными вопросами данной научной проблемы являются следующие:

1. Расчётно-теоретическая оценка погрешности измерения параметров плазменных струй ЭРД в широком диапазоне плотности тока и энергии ионов существующими методами.

2. Выбор геометрических параметров апертурного зонда для измерения энергетического спектра и плотности тока ионов струи в диапазонах от 1 до 4000 эВ и от 10^{-4} до 10^2 A/m^2 , соответственно.

3. Выбор параметров фильтра Вина для измерения зарядового состава плазменных струй ЭРД с энергией ионов от 100 до 2000 эВ.

4. Разработка методики измерения параметров плазменных струй ЭРД с применением разработанных апертурного зонда и фильтра Вина.

5. Экспериментальная апробация методики, оценка погрешности измерений в указанном диапазоне энергии и плотности тока ионов.

Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечена применением современной, поверенной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения, а также проверкой полученных результатов с применением различных способов и приборов. Достоверность теоретических и расчетных исследований обеспечена использованием общепринятых физических моделей и математических методов и подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчетов с результатами эксперимента.

Научная новизна 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.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные зонды позволяют упростить диагностику плазменных струй ЭРД благодаря расширенному на пять порядков рабочему диапазону плотностей токов и меньшей погрешности, максимальное значение которой составляет 2%. Полученные результаты измерений демонстрируют преимущества разработанных зондов, а рассчитанные на основе проведенных измерений коэффициенты эффективности двигателей могут быть использованы как при доработке самих двигателей, так и для расчета воздействия струи на бортовые устройства КА.

Методология и методы исследования

В работе использовались аналитические и численные методы исследования применимости разработанной методики. Использовались экспериментальные методы для определения характеристик зондов и точности разработанной методики.

Личный вклад соискателя

Автор настоящей работы самостоятельно готовил и проводил все эксперименты, анализировал и обрабатывал полученные результаты. Соискатель разработал и экспериментально верифицировал зонды для исследования распределения ионов по энергиям, плотности ионного тока и зарядового состава ионов. Разработанные зонды имеют расширенный рабочий диапазон параметров плазмы и лучшую точность и были использованы для измерения параметров струй холловских двигателей мощностью от 100 до 2500 Вт. Обсуждение результатов проводилось с А.С. Ловцовым, А.А. Шагайдой, Д.А. Томилиным и Д.А. Кравченко. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты численного исследования погрешности измерения многосеточного зонда с задерживающим потенциалом в широком диапазоне плотности тока ионов.
2. Обоснование выбранных геометрических параметров апертурного зонда.
3. Зависимости разрешающей способности фильтра Вина от его геометрических параметров и энергии ионов, обоснование выбранных геометрических параметров фильтра Вина.
4. Методика измерения параметров струи с помощью апертурного зонда и фильтра Вина.
5. Результаты экспериментального подтверждения метрологических характеристик зондов.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических совещаниях в АО ГНЦ «Центр Келдыша», на научном семинаре в МАИ, на саммите молодых ученых в образовательном центре «Сириус» в 2019 году, на 63й конференции МФТИ, на 49, 50 и 52й международной Звенигородской конференции, на научно-технической конференции молодых сотрудников АО «РЕШЕТНЁВ», на конференции молодых ученых и специалистов в АО ГНЦ «Центр Келдыша» и на конференции «ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ» в Казани в 2023 году.

Научные публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 в рецензируемых изданиях. Из них одна статья в журнале, рецензируемом международной базой Scopus и две статьи в журналах из перечня ВАК.

Рекомендации к внедрению:

1. Новый разработанный апертурный зонд может заменить многосеточный зонд и зонд Фарадея и может использоваться для измерения распределения ионов по энергиям и плотности ионного тока в струях как ионных, так и холловских двигателей.
2. Представленные в данной работе результаты по исследованию зондов с задерживающим потенциалом могут быть использованы для более корректной интерпретации результатов измерений.
3. Результаты исследования методики измерения доли двухзарядных ионов в струях электроракетных двигателей могут быть использованы для более корректного анализа экспериментальных данных, полученных на всех зондах такого типа.
4. Разработанный зонд для измерения доли двухзарядных ионов может быть использован для исследования струй холловских двигателей с напряжением разряда до 2000 В.

Внедрение результатов работы

Разработанные зонды используются на предприятии АО ГНЦ «Центр Келдыша» для измерения параметров плазмы электроракетных двигателей.

Соответствие паспорту специальности

В работе представлено комплексное исследование, посвященное диагностике струи плазмы электроракетных двигателей. Работа связана с анализом характеристик двигателей и исследованием методов диагностики струи, которые играют исключительное значение в испытании перспективных электроракетных двигателей. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют пунктам 10, 19 и 25 паспорта специальности 2.5.15.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 33 наименований, 66 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит теоретический анализ методики измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока.

В ходе теоретического анализа методики было обнаружено, что наиболее популярным инструментом диагностики является многосеточный зонд с задерживающим потенциалом. С помощью численного моделирования в диссертации подробно проанализированы и доказаны недостатки такого зонда. Этими недостатками оказались: требование соответствия конструкции зонда плотности исследуемой плазмы и низкая точность, с которой может быть рассчитана эффективная прозрачность зонда для ионов. Первое обстоятельство приводит к тому, что, во-первых, крайне сложно изготовить зонд, который будет корректно работать в достаточно плотной плазме с концентрацией порядка 10^{18} м^{-3} , которая может достигаться в центре струи ЭРД, а во-вторых, зонд, предназначенный для исследования ионов в сравнительно плотной плазме, будет обладать низкой прозрачностью, что крайне затруднит его использование в областях с более разреженной плазмой из-за низкого уровня измеряемых токов. Вторая проблема приводит к тому, что трехсеточный зонд нельзя использовать для точного измерения плотности тока, и из-за этого приходится пользоваться дополнительным зондом – цилиндром Фарадея. Проведен подробный обзор публикаций российских и зарубежных авторов, и выделено несколько способов решения указанных проблем. Наиболее интересным оказался зонд с изменяемой геометрией и одноапертурный зонд с подачей положительного потенциала на коллектор. Однако обе эти конструкции не получили дальнейшего развития, и в открытых источниках не обнаружено доказательств их превосходства и подтверждения точности их работы.

Также в данной главе представлен подробный расчетный анализ работы многосеточного зонда, используемого в АО ГНЦ «Центр Келдыша». Геометрические параметры этого зонда рассчитаны для диагностики плазмы ЭРД с плотностью ионного тока порядка 10 А/м^2 . Подтвержденная погрешность измерения энергетических распределений этого зонда составляет 5%. Была создана численная модель зонда, воспроизводящая единичную ячейку входной сетки зонда (рисунок 1). На входе в зонд задавалось распределение ионов по энергиям, плотность ионного

тока и электронная температура. На коллекторе рассчитывался ток при разных потенциалах третьей, анализирующей сетки зонда. Далее проводилось сравнение восстановленного на коллекторе спектра и спектра, заданного на входе.

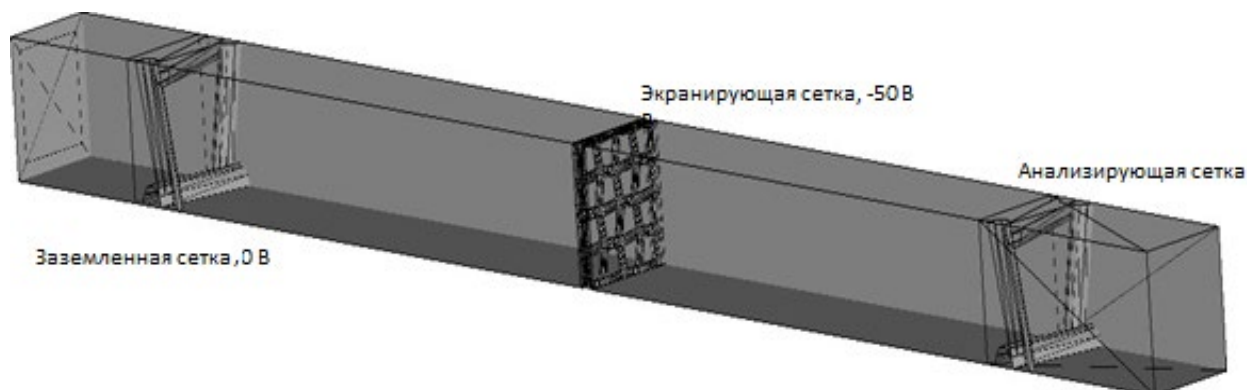


Рисунок 1 — Схема зонда

С помощью моделирования произведен анализ работы зонда, геометрически рассчитанного на плотность тока $1-5 \text{ A/m}^2$, в плазме с плотностью тока в диапазоне от 10^{-3} до 100 A/m^2 . Показано, что зонд такой конструкции действительно работает с погрешностью не более 5% при плотности тока до 10 A/m^2 , а при плотности тока 50 A/m^2 погрешность в воспроизведении энергетического спектра возрастает до 30% из-за влияния объемного заряда. Эффект влияния объемного заряда продемонстрирован на рисунке 2.

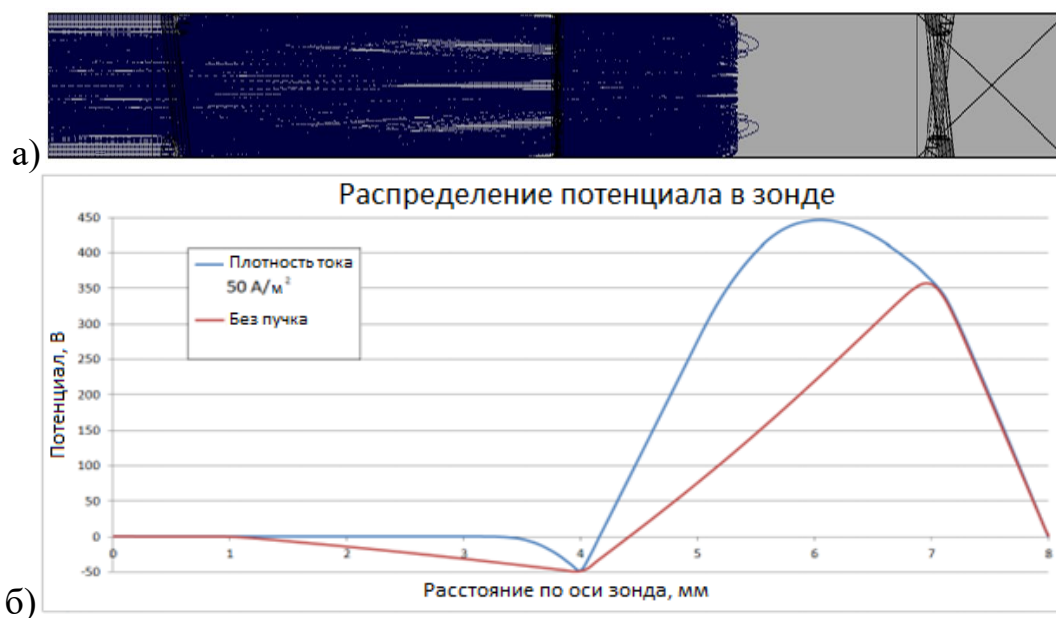


Рисунок 2 — Влияние объемного заряда

На рисунке 2а изображены траектории ионов с энергией в диапазоне от 350 до 400 эВ в зонде при плотности ионного тока 50 A/m^2 , при потенциале отсечной сетки -50 В и при потенциале анализирующей сетки 350 В . Данная группа ионов отражается из-за наличия пространственного заряда, который при заданной плотности тока создает между отсечной и анализирующей сеткой потенциальный

барьер величиной 450 В. Распределение потенциала в этом случае представлено на рисунке 2б. При этом если пучка ионов нет, пространственный заряд отсутствует, распределение потенциала в зонде является близким к линейному (красная кривая).

На рисунке 3 представлены результаты моделирования энергетических спектров, которые могут быть получены при измерении многосеточным зондом параметров плазменных струй с различной плотностью ионного тока.

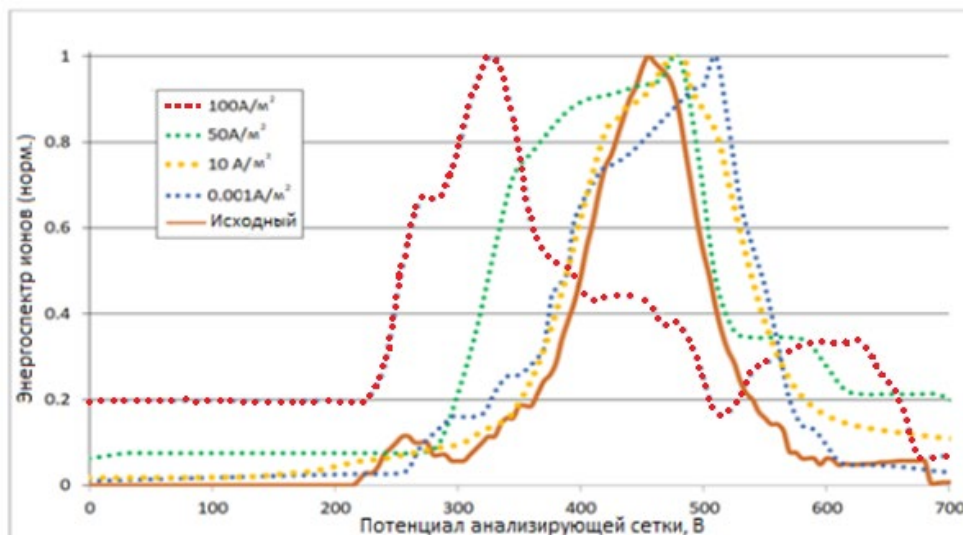


Рисунок 3 — Результаты моделирования трехсеточного зонда

Можно заметить, что при плотности тока, меньшей или равной оптимальной, измеренный спектр сдвигается в сторону больших энергий. Это обстоятельство связано с падением потенциала в центрах отверстий сеток и прохождением через анализирующую сетку ионов с изначально недостаточной энергией.

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.

Вторая глава содержит теоретический анализ методики измерения зарядового состава ионов в плазме ЭРД.

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. В зарубежной литературе существует несколько успешных примеров использования зондов такого типа. Зарубежные авторы подробно анализировали недостатки зонда и методы обработки данных. Однако в этих публикациях также не найдено экспериментальных подтверждений успешного использования предложенных конструкций в струях ХД с энергией ионов в диапазоне от 100 до 2000 эВ.

В данной главе существующая методика измерения зарядового состава струи при помощи $E \times V$ зонда подробно проанализирована при помощи численного моделирования. Продемонстрированы все особенности использования зондов такого типа. Впервые проведено моделирование $E \times V$ зонда одновременно с учетом ненулевой ширины энергетического спектра, пространственного заряда ионов и ненулевого угла между направлением движения ионов и осью зонда.

В результате моделирования были подтверждены недостатки зонда, продемонстрирована необходимость соответствия геометрии зонда энергии ионов исследуемого пучка, и выделены два типа зондов, предназначенных для исследования плазменных струй ИД и ХД.

Показано (рисунок 4), что при использовании слишком длинного зонда в струях с низкой энергией ионов, влияние пространственного заряда приводит к расфокусировке пучка в зоне скрещенных полей, что ухудшает спектральное разрешение зонда и в пределе приводит к невозможности различить ток двухзарядных и однозарядных ионов.

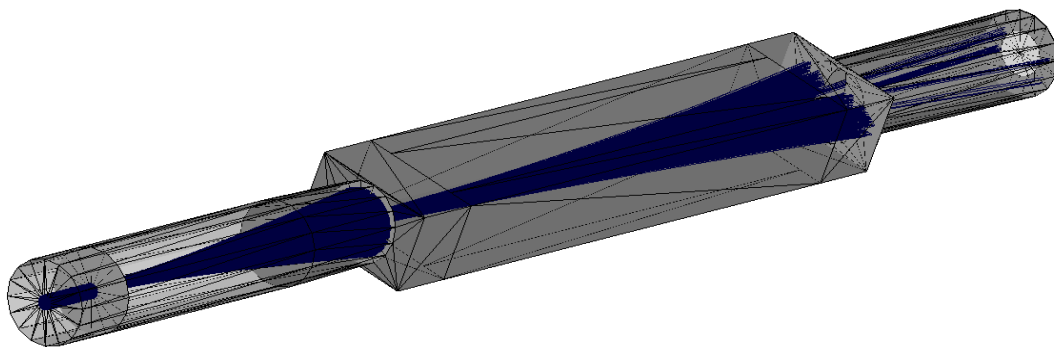


Рисунок 4 — Результаты моделирования траекторий ионов в $E \times B$ зонде

Если при тех же параметрах пучка изменить длину зонда или использовать более сильное магнитное поле, то разделение пучков ионов разной кратности улучшится и, соответственно, улучшится спектральное разрешение зонда (рисунок 5).

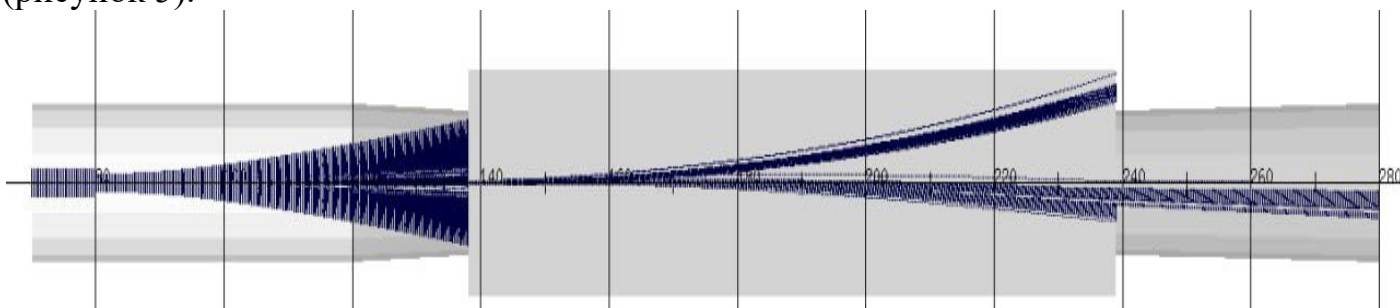


Рисунок 5 — Моделирование $E \times B$ зонда с адекватным разделением пучков

При использовании слишком короткого зонда с увеличением энергии ионов для получения адекватного спектрального разрешения требуется увеличивать магнитное поле вплоть до 1 Тл, что не только технически сложно, но и может возмущать плазму вне зонда, искажая результаты измерений. Учитывая наличие в Центре Келдыша зонда, способного корректно работать в струе ИД с энергией ионов от 1500 эВ, была поставлена задача разработать зонд для исследования струй ХД с энергией ионов от 100 до 2000 эВ.

Третья глава описывает разработку нового, так называемого апертурного зонда и его расчетную и экспериментальную верификацию.

Основная идея, заложенная в конструкцию нового апертурного зонда, состоит в том, чтобы организовать сепарацию ионов и электронов так же, как это происходит в ИОС ионных двигателей (рисунок 6). Это означает, что отверстия в сетках должны

быть соосны, а приложенные к сеткам потенциалы должны обеспечивать формирование вблизи эмиссионного электрода плазменной границы, с которой извлекаются отдельные ионные пучки. Такая конструкция, при подборе правильного потенциала отсечного электрода (порядка 1 кВ) позволяет использовать сетки с отверстиями большого диаметра, намного превышающего дебаевскую длину, и обеспечивает высокую прозрачность зонда. В результате появляется возможность проводить измерения как в плотной плазме на небольших расстояниях от двигателя, так и вдали от двигателя и на периферии плазменной струи.

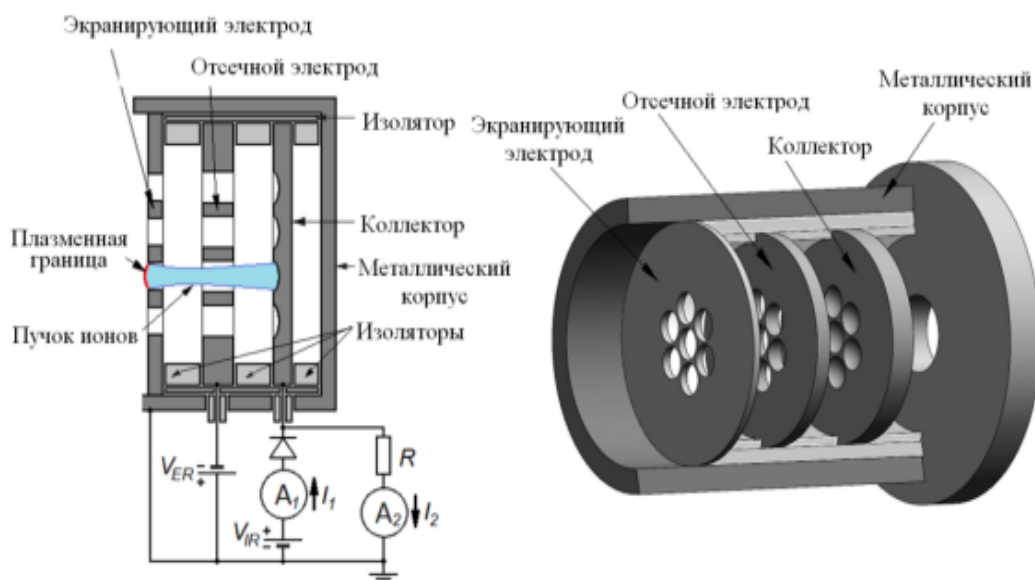


Рисунок 6 — Схема апертурного зонда

Потенциал отсечного электрода задаётся, исходя из того, чтобы плотность тока, задаваемая соотношением Чайлда-Ленгмюра, в котором в качестве расстояния задано расстояние между экранирующим и отсечным электродом, была больше измеряемой плотности тока. В процессе измерений потенциал отсечного электрода можно регулировать, увеличивая его при нахождении зонда в плотной плазме и уменьшая при удалении зонда от двигателя или перемещении его на периферию струи. На коллектор подаётся положительный потенциал, который определяет граничную энергию регистрируемых ионов.

В том случае, если внутри зонда обеспечена фокусировка ионного пучка без попадания ионов на отсечной электрод, эффективная прозрачность зонда для ионов близка к геометрической прозрачности экранирующего электрода. Это позволяет использовать зонд вместо цилиндра Фарадея для измерений абсолютных значений плотности тока. Важно также, что ионное распыление наружной поверхности экранирующего электрода практически не изменяет эффективную прозрачность зонда, и поэтому эта прозрачность будет оставаться постоянной в течение длительного времени.

С помощью моделирования в программном пакете IOS-3D показано, что новый апертурный зонд может восстанавливать энергетический спектр ионов с погрешностью, меньшей 2%, в диапазоне плотностей токов до 100 А/м^2 и энергий ионов до 4000 эВ. Пример результатов моделирования для диапазона энергий ионов 0-800 эВ и плотностей токов $1-100 \text{ А/м}^2$ показан на рисунке 7.

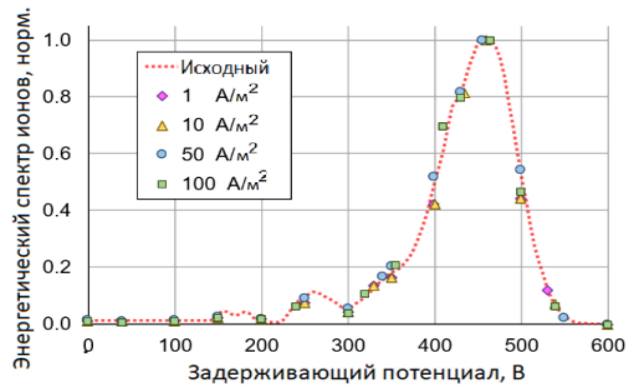


Рисунок 7 — Моделирование работы апертурного зонда

Также в данной главе описаны результаты экспериментальной верификации апертурного зонда во всем требуемом диапазоне параметров плазмы. Измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока были проведены совместно с зондом стандартной многосеточной конструкции в плазме, на параметры которой рассчитан многосеточный зонд, способный восстанавливать энергетический спектр ионов с подтвержденной погрешностью 5%. Результаты представлены на рисунке 8.

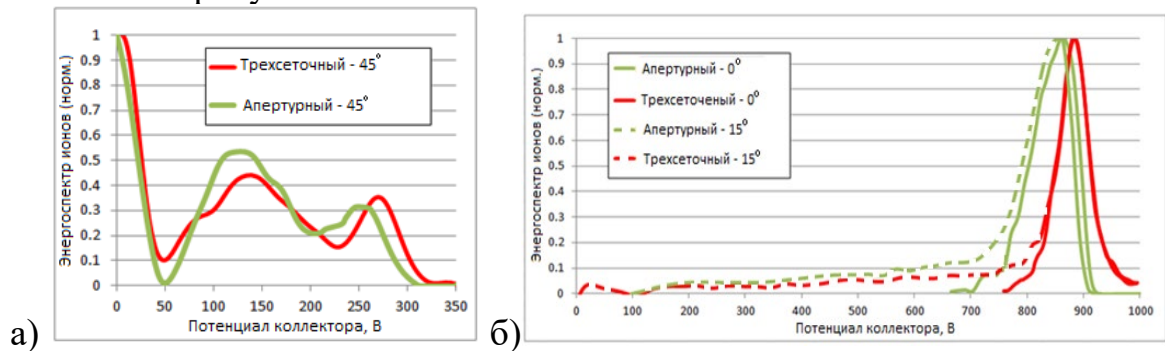


Рисунок 8 — Совместные испытания апертурного и трехсеточного зондов

Эксперимент показал, что спектр трехсеточного зонда сдвинут относительно спектра апертурного на 3% в сторону больших энергий, что согласуется с результатами моделирования и объясняется неточностью трехсеточного зонда.

Также была выполнена экспериментальная верификация апертурного зонда в струе ионного двигателя, энергетическое распределение ионов которого известно с погрешностью меньшей 15 эВ.

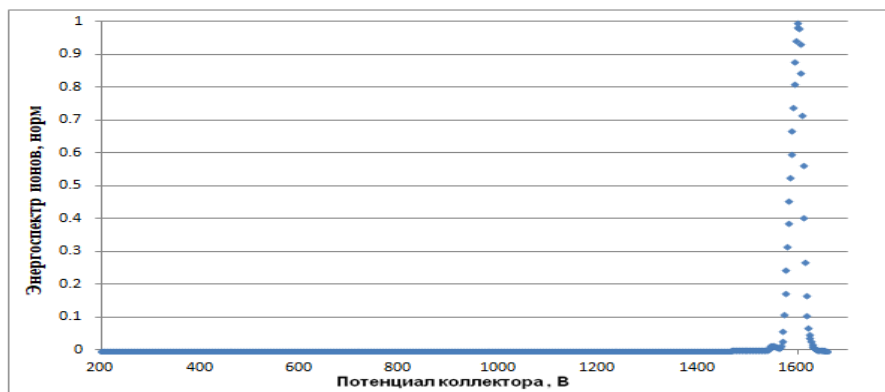


Рисунок 9 — Испытания апертурного зонда в струе ИД

На рисунке 9 представлен измеренный энергетический спектр ионного двигателя при потенциале эмиссионного электрода 1600 В. При этом известно, что энергетический пик должен находиться в районе 1600 эВ с точностью, порядка 10-15 эВ. Измеренный апертурным зондом энергетический пик достигается при энергии ионов 1605 эВ, что подтверждает высокую точность зонда и погрешность в определении энергетического пика меньшей 1%.

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/м². 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 проведенных 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×V 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.

На базе E×V зонда, разработанного ранее в Центре Келдыша для измерения доли двухзарядных ионов в струе ионного двигателя, была создана численная трёхмерная модель этого зонда (рисунок 11) и проведена апробация методики моделирования. Результаты расчёта вольтамперной характеристики зонда совпали с полученными ранее экспериментальными результатами со средней погрешностью 5%, что показывает адекватность численной модели (рисунок 12).

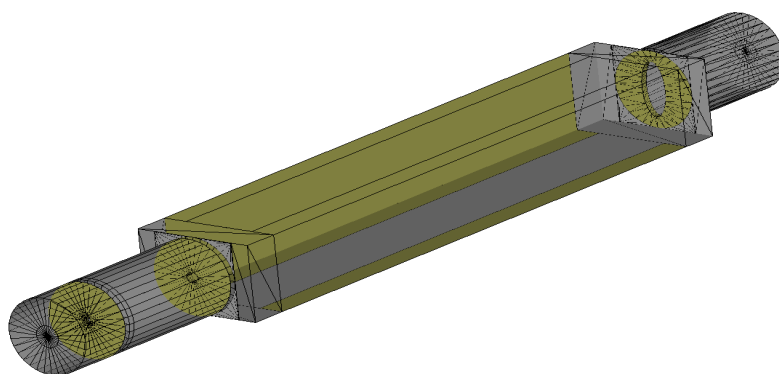


Рисунок 11 — Численная модель E×V зонда.



Рисунок 12 — Экспериментальная и расчётная зависимости тока коллектора от отклоняющего напряжения

Использование численной модели, учитывающей конечную ширину энергетического спектра, влияние пространственного заряда ионов и ненулевого угла падения ионов позволило уточнить теоретическую оценку разрешающей способности зонда (1), полученную зарубежными авторами, и разработать и расчетно верифицировать $E \times V$ зонд, способный восстанавливать долю двухзарядных ионов в струе с энергией однозарядных ионов от 100 до 2000 эВ. При этом минимальная доля, которую способен определить зонд, была рассчитана из требований к минимальному току на коллекторе в 1 нА и составила 0.2%.

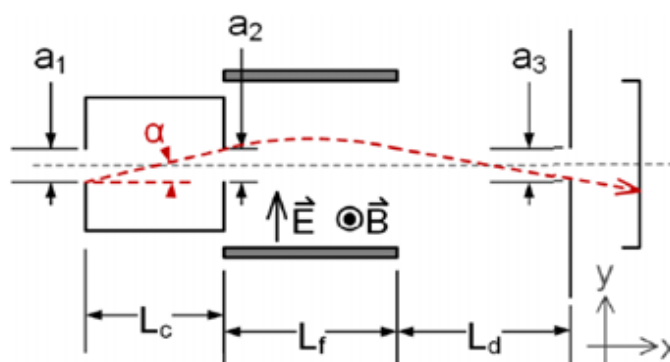


Рисунок 13 — К расчёту разрешающей способности по формуле (1)

$$\Delta u = \frac{\mu u_0^2}{ZeB_0} \left[\frac{a_2 + a_3 + (a_1 + a_2)(L_f + L_d)/L_c}{L_f^2 + 2L_dL_f} \right] \quad (1)$$

Здесь Δu – разрешение зонда, u_0 – скорость ионов, B – магнитное поле, Ze – заряд ионов.

Основная особенность разработанного зонда – оптимизированная с помощью численного моделирования длина как входной и выходной трубки, так и зоны фильтрации. Размеры подбирались таким образом, чтобы в требуемом рабочем диапазоне параметров плазмы пики однозарядных и двухзарядных ионов на вольтамперной характеристике зонда не накладывались друг на друга, а ток двухзарядных ионов был больше 10 нА в случае плотности ионного тока на входе 0.1 А/м^2 . Пример корректной работы зонда представлен на рисунке 14.



Рисунок 14 — Разделение пучков внутри разработанного зонда.

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. Номинальный расчетный режим работы двигателя это: напряжение разряда 200 В и ток разряда 0.5 А. При этом в исследованиях напряжение разряда варьировалось от 150 до 300 В и ток от 0.5 до 1 А. Цель данных испытаний – на основании зондовых измерений струи рассчитать коэффициенты эффективности в зависимости от тока и напряжения разряда двигателя, а также сравнить результаты, полученные с помощью трехсеточного и апертурного зондов. Измерения проводились в вакуумной камере объемом 90 м³ при рабочем давлении порядка 10⁻³ Па и остаточном давлении порядка 10⁻⁴ Па. Зонды располагались на расстоянии в 1.2 метра от двигателя и измерения проводились при углах к оси двигателя от 90 до -90 с шагом в 5 градусов.

По этим данным восстановлена зависимость средней энергии ионов от угла к оси двигателя, которая качественно согласуется с общими представлениями о распределении ионов по энергии в типичной струе ХД (рисунок 15). Полученное завышение средней энергии ионов трехсеточным зондом объясняется падением потенциала в центрах отверстий сеток и прохождением ионов с изначально недостаточной энергией через сетку, что подтверждается моделированием, учитывая измеренную плотность ионного тока.

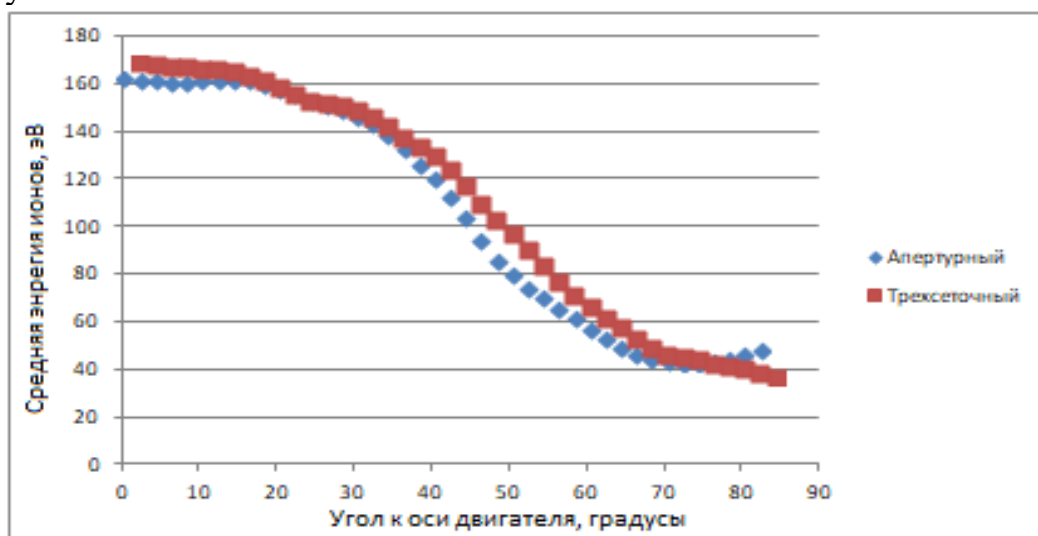


Рисунок 15 — Средняя энергия ионов в зависимости от угла

Трехсеточным и апертурным зондами совместно с зондом Фарадея была измерена зависимость плотности тока пучка от угла к оси двигателя. Все зонды

корректно отразили характерные для ХД два пика плотности тока вблизи оси струи (рисунок 16).

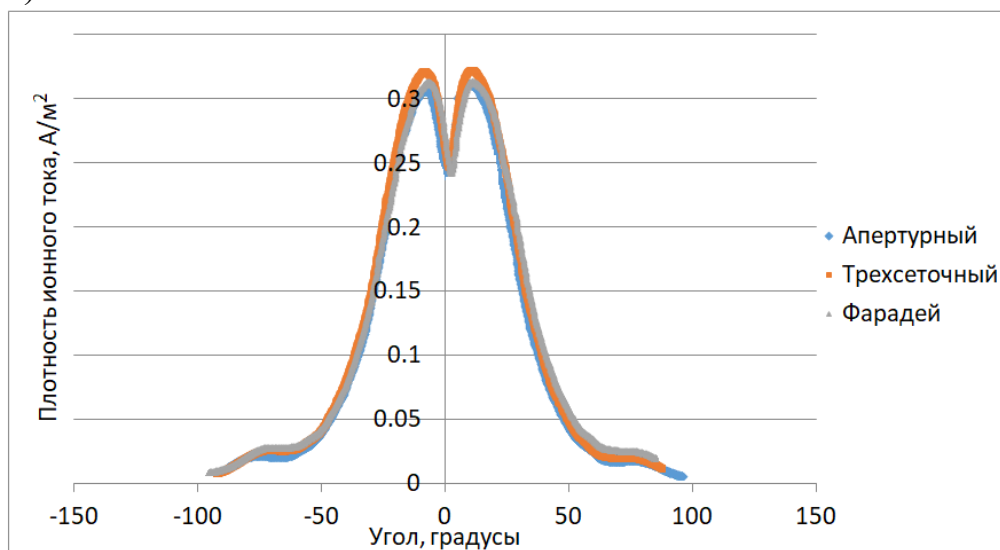


Рисунок 16 — Плотность тока струи ХД в зависимости от угла

С помощью разработанного Е×В зонда были проведены измерения доли двухзарядных ионов в струе холловского двигателя (рисунок 17). Положения пиков, соответствующих токам однозарядных и двухзарядных ионов, соответствовали теоретическим расчетам с погрешностью 2%, а восстановленная доля двухзарядных ионов оказалась равной 0,5%, что, учитывая размеры двигателя, короткую зону ионизации, низкое напряжение разряда и общую статистику по холловским двигателям, является адекватным значением.

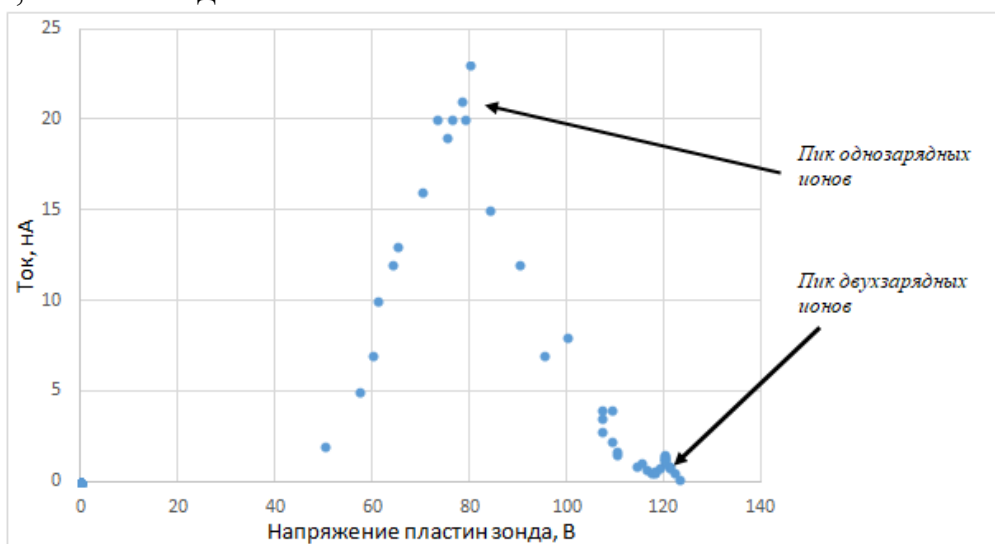


Рисунок 17 — ВАХ Е×В зонда в струе ХД

Проведенные измерения позволили рассчитать коэффициенты эффективности двигателя при различных режимах его работы. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рассчитанные коэффициенты эффективности двигателя
номинальной мощностью 100 Вт

Напряжение разряда, В	Ток разряда, А	Мощность разряда, Вт	Расход газа анодный, мг/с	Тяга, мН	Eff _m	Eff _I	Eff _U	Eff _q
150,1	0,5	75	0,75	5,45	0.724	0.819	0.447	0.996
199	0,75	149,3	0,94	8,93	0.787	0.75	0.483	0.994
198,4	1	198,2	1,1	11,33	0.928	0.777	0.411	0.994
251,3	0,5	125,7	0,63	6,44	0.767	0.742	0.463	0.993
249,3	0,75	187,2	0,86	9,76	0.849	0.745	0.471	0.993
250	1	250	1,03	12,15	0.907	0.717	0.444	0.993
302,7	0,5	151,4	0,59	6,57	0.792	0.723	0.426	0.992
301,7	0,75	226,3	0,86	10,15	0.839	0.744	0.427	0.992

Где Eff_m – коэффициент использования рабочего тела, определяемый как отношение массового потока ускоренных ионов к массовому потоку атомов, поступающих в анодный блок.

Eff_I – коэффициент использования тока, определяемый как отношение тока ионов к току разряда.

Eff_U – коэффициент потерь КПД, обусловленный энергетическим и угловым распределениями ускоренных ионов.

Eff_q – коэффициент потерь КПД, обусловленный присутствием в струе двухзарядных ионов.

Полученные коэффициенты эффективности могут быть использованы для анализа физических процессов и совершенствования конструкции двигателя.

Также в данной главе представлены результаты измерения параметров струй холловского двигателя мощностью до 2500 Вт и рассчитаны его коэффициенты эффективности. На рисунке 18 представлена экспериментально полученная зависимость средней энергии ионов от угла к оси двигателя для двух ХД мощностью 1.0 и 2.5 кВт с напряжением разряда от 400 до 800В.

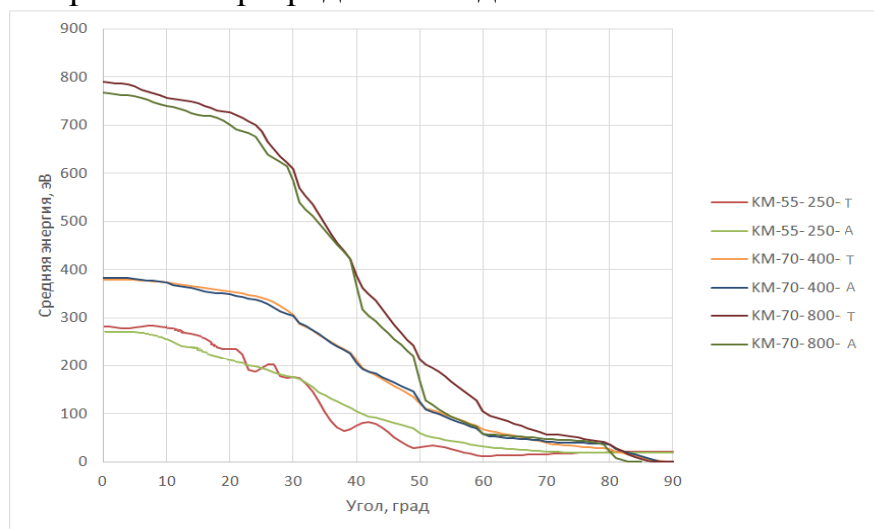


Рисунок 18 — Зависимость средней энергии ионов от угла: Т – трехсеточный зонд, А – апертурный зонд

Можно заметить хорошее совпадение данных с трехсеточного зонда и данных с апертурного зонда. Максимальное несовпадение имеет место на периферии для результатов измерений струи двигателя мощностью 2.5 кВт при напряжении разряда 800В: средняя энергия, полученная трехсеточным зондом, завышена относительно апертурного. Как было показано в диссертации, такое расхождение объясняется погрешностью трехсеточного зонда. Измеренные параметры плазмы были использованы для расчета коэффициентов эффективности двигателей на всех режимах работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение диссертации сделаны следующие выводы:

1. Разработана методика измерения параметров плазменных струй электроракетных двигателей с применением разработанного апертурного зонда и фильтра Вина.

2. С помощью численного моделирования доказано, что применение многосеточного зонда с задерживающим потенциалом для измерения параметров струй ЭРД во всем диапазоне углов вылета ионов может приводить к ошибкам более 30% при работе в струях с плотностью тока, превышающую допустимую для данной геометрии зонда.

3. Выбраны геометрические параметры апертурного зонда, для измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока в диапазоне плотности тока от 10^{-4} до 10^2 А/м² и энергии ионов от 1 до 4000 эВ с погрешностью не более 2%.

4. Проведено расчетное исследование работы E×B зонда и показана необходимость разделять зонды на два класса: зонды для диагностики холловских и зонды для диагностики ионных двигателей.

5. 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 не хуже 0,5%.

6. 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%.

7. Проведена апробация методики в плазме струй холловских двигателей. Полученные результаты показали адекватность методики и позволили рассчитать коэффициенты эффективности данного двигателя.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Maystrenko D. A., Shagayda A. A., Kravchenko D. A., Lovtsov A. S., Development of a high dynamic range retarding potential analyzer for electric propulsion plume diagnosis // Rev. Sci. Instrum. 93, 073504 (2022). doi: 10.1063/5.0083810.

2. Майстренко Д. А., Шагайда А. А., Селиванов М. Ю., Ловцов А. С. (2025). Оптимизация E×B методики для исследования зарядового состава ионов в струе плазмы холловских двигателей // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение», 9(4), 100–107. doi: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-100-107.

3. Maystrenko D. A., Shagayda A. A., Kravchenko D. A., Tomilin D.A. and Selivanov M. Yu. High Dynamic Range Retarding Potential Analyzer Operation Verification // Plasma Physics Reports, 506 2024. doi: 10.1134/S1063780X24601135.

Другие публикации:

4. Майстренко Д.А. // сборник трудов конференции «Международная научная конференция SCVRT2019 «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности», 2019, Научно-исследовательский центр физико-технической информатики.

5. Майстренко Д.А., Шагайда А.А., сборник тезисов конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», 2022, МИФИ

6. Майстренко Д.А., Шагайда А.А., сборник тезисов конференции « Будущее ракетных двигателей и космических энергоустановок», 2024, МГТУ им. Н.Э. Баумана

7. Майстренко Д.А. сборник тезисов конференции «LII Конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу», 2025 DOI: 10.34854/ICRAF.52.2025.1.1.157