

На правах рукописи

**МАШЕРОВ ПАВЕЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ**



**РАЗРАБОТКА КОСМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ НА ОСНОВЕ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник

**Рябый Валентин Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Кралькина Елена Александровна**  
доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ведущий научный сотрудник кафедры физической электроники

**Островский Валерий Георгиевич**  
кандидат технических наук, ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва», старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Защита состоится «5» декабря 2016 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)»,

[http://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=72190](http://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=72190)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.08

доктор технических наук, профессор



**Зуев Юрий Владимирович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) широко применяются для решения задач коррекции движения околоземных космических аппаратов (КА). Наиболее широко корректирующие ЭРДУ применяются в составе геостационарных КА и низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли. В последние годы ЭРДУ начали использовать в манёврах по довыведению геостационарных КА в точку стояния, включая длительные переходы с геосинхронной орбиты на геостационарную орбиту (ГСО).

При разработке технологии высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД), как одной из разновидностей ЭРДУ, требуются обширные исследования. Необходимо не только адаптировать известные технические решения, апробированные в Европе, но и изучить принципиально новые схемы и возможности их развития и применения [10]. В этом отношении большой интерес для разработчиков ВЧИД представляет новый вид технологии ВЧИД, применяемой при создании источника ионного пучка космического назначения, предназначенного для воздействия на крупногабаритные объекты космического мусора (ОКМ).

Согласно Руководящим принципам предупреждения образования ОКМ, принятым на 62 Генассамблее ООН в 2007 году, КА после завершения их функционирования должны быть уведены из области ГСО. В нашей стране эта задача закреплена ГОСТ Р 52925—2008. Увод отработавших КА как некооперируемых крупногабаритных ОКМ возможен с использованием сервисных КА (СКА). Создание СКА, обеспечивающих многократное маневрирование в окрестностях ГСО для удаления за время своего срока активного существования достаточно большого числа ОКМ, является актуальной задачей. При этом одним из эффективных методов воздействия на ОКМ является метод бесконтактного воздействия, основанный на передаче импульса уводимому ОКМ ионного пучка, инжектируемого с борта СКА. Использование ионных двигателей весьма актуально для решения данной задачи в силу того, что такие двигатели имеют самые небольшие углы расходимости ионного пучка. Однако даже у лучших образцов ВЧИД полуугол расходимости ионного пучка достигает 13 градусов. Для минимизации вредного воздействия распыления ОКМ, способного засорить своими продуктами солнечные батареи СКА, необходимо создать высокочастотный

источник ионного пучка (ВЧИИП) с полууглом расходимости ионного пучка не более 6 градусов.

**Актуальность представляемой работы обусловлена:**

Необходимостью создания источника ионов с полууглом расходимости ионного пучка не более 6 градусов для использования в составе СКА для очищения ГСО от крупногабаритных ОКМ.

**Объект исследования**

Объектом исследования является лабораторная модель ВЧИИП-10Ф.

**Предмет исследования**

Предметом исследования является исследование характеристик лабораторной модели ВЧИИП-10Ф.

**Целью работы** является разработка источника ионов на основе ВЧИД для решения задачи увода некооперируемых ОКМ с ГСО.

**Основные задачи диссертации:**

В соответствии с целью работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведение анализа требований к разработке ВЧИИП на основе ВЧИД с повышенной эффективностью генерации плазмы в ВЧ-индукционном (ВЧИ) газоразрядном узле.

2. Создание лабораторной модели ВЧИИП.

3. Разработка эффективного метода интегральной диагностики газоразрядного узла ВЧИИП.

4. Проведение диагностики локальных параметров плазмы в газоразрядной камере (ГРК) лабораторной модели ВЧИИП путём исследований зондами Ленгмюра пространственного распределения параметров плазмы.

5. Разработка ионно-оптической системы (ИОС) ВЧИИП и проведение экспериментального исследования по определению угла расходимости ионного пучка.

**Методы исследования**

В диссертации применялись совокупность теоретических, теоретико-эмпирических и экспериментальных методов: методика определения интегральных характеристик газоразрядного узла, метод количественной оценки близости плазмы к максвелловской среде, метод определения плотности ионного тока на

эмиссионный электрод ИОС с помощью имитатора плоского пристеночного зонда Ленгмюра, физико-математическое моделирование ионного пучка и экспериментальная оценка результатов визуализацией границ эрозии металлической и стеклянной мишеней под воздействием ионного пучка.

### **Научная новизна**

1. Разработан ВЧИИП с плоским индуктором, оснащенным ферритовым сердечником, обеспечивающим высокую равномерность плазмы в ГРК (по диаметру ИОС изменение распределения концентрации электронов составило не более 15 %, а температуры электронов – не более 5 %) и эффективность передачи ВЧ-мощности от генератора в разряд до 92 %, и ИОС в виде плоских электродов со щелевыми отверстиями, позволяющая сформировать клиновидный пучок с полууглом расходимости ионного пучка не более 3 градусов.

2. Разработан новый способ интегральной диагностики газоразрядного узла, позволяющий детализировать баланс ВЧ-мощности ВЧИИП и оценить качество технического решения и исполнения, как самого источника, так и линии электропитания ВЧИ-разряда.

3. Расширена область применения зондов Ленгмюра в невозмущённой максвелловской плазме в направлении измерений массы её ионов и толщины зондового слоя на основе уточнения коэффициента Бома. Предложены способ количественной оценки близости экспериментальной плазмы к максвелловской среде, а также способ и устройство для оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС. Получен безразмерный критерий оценки относительной площади поверхности зондодержателя, позволяющий снизить погрешность измерений зондами Ленгмюра (здесь и далее «зондодержателем» будет именоваться керамическая поверхность зонда, которая непосредственно прилегает к измерительной части и вносит ощутимые искажения в результаты измерений).

### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

1. Разработана и проведена отработка конструкции лабораторного ВЧИИП с металлической ГРК, которая позволила эффективно провести диагностику локальных параметров плазмы и контролировать давление в ГРК. Использование плоского индуктора с ферритовым сердечником обеспечило повышенную энергоэффективность ВЧИИП. Плоские электроды ИОС со щелевыми отверстиями существенно улучшили фокусировку ионного пучка.

2. Разработана и проверена на практике методика интегральной диагностики ВЧ-индукционного газоразрядного узла ВЧИИП, которая позволила оценить его операционные и конструктивные параметры, определяющие физико-технический облик изделия, включая степень совершенства его конструкции и схмотехники линии электропитания разряда.

3. Проведена диагностика локальных параметров плазмы в ГРК, выявлена относительная равномерность параметров плазмы в ГРК. Изучение влияния зондодержателя на результаты диагностики зондами Ленгмюра позволило повысить точность измерений.

4. Расширена область применения зондов Ленгмюра возможностью измерения толщины зондового слоя и контроля массы ионов плазмы. Предложены и реализованы способ и устройство для оценки ионного тока на ЭЭ ИОС.

5. Получен сколлимированный клиновидный ионный пучок с полууглом расходимости поперек щелей ИОС до 3 градусов, а вдоль щелей – существенно меньше.

#### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов, научных положений и сделанных выводов достигается корректным выбором существующих методик измерений, соответствием измеренной расходимости пучка ионов расчетным значениям, а также непротиворечивостью аналогичным результатам других авторов.

#### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты работы использованы при проведении научно-исследовательских работ по созданию ВЧИИП для очистки ГСО от ОКМ (некооперируемых объектов – по большей части отработавших искусственных спутников Земли).

#### **Апробация результатов**

Основные результаты работы обсуждались на семинарах НИИ ПМЭ МАИ и на кафедре 208 МАИ, а так же докладывались на российских и международных конференциях: 1) Международная конференция «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы» (Казань, Россия 16 – 18 октября 2012 года); 2) 37 Академические Королевские Чтения по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» (Москва, Россия, январь – февраль 2013 года); 3) 21 International Symposium on Plasma Chemistry, (ISPC 21), (Cairns, Australia, August, 4 – 9, 2013); 4)

12 Международная конференция «Авиация и космонавтика-2013» (Москва, Россия, 12 – 15 ноября 2013 года); 5) Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014 (Казань, Россия, 20 – 23 мая 2014 года); 6) 24 Международная конференция «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, Россия, 7 – 12 июля 2014); 7) 6 International Workshop and Summer School on Plasma Physics (Kiten, Bulgaria, 30 June – 6 July, 2014); 8) 34 International Electric Propulsion Conference, (Hyogo-Kobe, Japan, July, 4 – 10, 2015); 9) 16 International Conference on Ion Sources (New York City, USA, August, 23 – 28, 2015); 10) VIII International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology (Minsk, Belarus, September, 14 – 18, 2015); 11) 14 Международная конференция «Авиация и космонавтика-2015» (Москва, Россия, 16 – 20 ноября 2015 года); 12) 5 International Conference «Space Propulsion 2016» (Rome, Italy, May, 2 – 6, 2016).

#### **Личный вклад соискателя**

Работы, проведённые лично автором, или при его непосредственном участии:

1. Анализ путей совершенствования конструкции ВЧИД по известным литературным данным.
2. Обзор физико-математических моделей ВЧИ-разряда.
3. Конструирование и создание стенда для испытания и отработки лабораторной модели ВЧИД с высокой энергоэффективностью системы генерации плазмы в ГРК.
4. Разработка и практическая реализация нового способа интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла, выявляющего физико-технический облик изделия, включая его энергоэффективность.
5. Диагностика локальных параметров плазмы в ГРК путём измерений зондами Ленгмюра пространственных распределений фундаментальных параметров плазмы.
6. Получение и практическое использование безразмерного критерия влияния размера зондодержателя на точность измерений зондами Ленгмюра.
7. Разработка и реализация способа измерений зондами Ленгмюра толщины зондового слоя и массы ионов в максвелловской плазме.
8. Разработка и реализация способа и устройства для оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС ВЧИД.

9. Расчёт, проектирование и создание плоских электродов ИОС с щелевыми отверстиями.

10. Разработка и практическое использование экспериментального стенда для получения отпечатка ионного пучка и измерения полуугла его расходимости.

11. Оценка параметров ионного пучка, сопоставление полученных результатов с расчётами.

### **Структура и объем работы**

Работа представляет собой рукопись объёмом 169 страниц печатного текста, включая 151 рисунок, 3 таблицы, а также список цитируемой литературы, содержащий 138 наименований. Она включает в себя введение, пять разделов, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список использованных источников.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Конструкция лабораторной модели ВЧИИП с усовершенствованными параметрами энергоэффективности системы генерации плазмы повышенной пространственной однородности.

2. Метод интегральной диагностики газоразрядного узла, позволяющий определить физико-технический облик изделия, включающий его энергоэффективность.

3. Результаты диагностики локальных параметров плазмы в ГРК путем измерений зондами Ленгмюра пространственных распределений фундаментальных параметров плазмы.

4. Способ, устройство и результаты оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС ВЧИИП.

5. Проектирование и расчет ИОС со щелевой геометрией отверстий, формирующей клиновидный ионный пучок малой расходимости, и экспериментальное подтверждение её эффективности.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** посвящено обоснованию актуальности тематики диссертационного исследования, краткому описанию проблемы создания источника ионов для задач увода ОКМ с ГСО на основе ВЧИД. Сформулирована актуальность работы, описывается степень разработанности избранной темы, формулируются цели и

задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, реализация и внедрение результатов работы, личный вклад соискателя, сообщаются сведения об апробации работы и публикациях автора, излагается объём и структура диссертации.

**В первом разделе** излагаются теоретические основы ВЧИД, описываются характеристики известных ВЧИД, их преимущества и недостатки, вырабатываются требования к ВЧИИП для решения задач увода ОКМ с ГСО. Проведён анализ путей повышения энергоэффективности ВЧИ-источников плазмы, дан обзор физико-математических моделей ВЧИ-разряда и делаются выводы об их применимости при проектировании ВЧИИП. Закладываются теоретические основы для разработки ВЧИИП. Итогом первого раздела является выбор конструктивной схемы ВЧИИП с плоским индуктором и ферритовым сердечником, имеющим высокую температуру Кюри (более 450 °С) и с металлической ГРК для упрощения диагностики плазмы зондами Ленгмюра и возможности измерения давления в ГРК.

**Во втором разделе** представлена конструкция модели ВЧИИП-10Ф с трансформаторным согласующим устройством (см. рисунок 1) для исследования газоразрядной плазмы в её ГРК, описана отработка системы поджига ВЧИ-разряда.

**В третьем разделе** представлено решение методологических вопросов интегральной диагностики ВЧИ-устройств и диагностики локальных параметров генерируемой в них плазмы [6].

Целью диагностики интегральных и технических параметров ГРК ВЧИИП-10Ф явилась оценка качества конструкции модели и определение коэффициента полезного действия (КПД) ввода ВЧ-мощности в плазму газового разряда [21].

При точном согласовании ВЧ-генератора (ВЧГ) с нагрузкой напряжения на всех реактивных элементах цепи электропитания ВЧИ-разряда взаимно компенсируются. При этом цепь питания разряда становится чисто активной, позволяя определять упомянутый КПД по закону Ома:

$$\eta_p = \frac{P_p}{P} = 1 - (I/I_0)^2, \quad (1)$$

где  $\eta_p$  – КПД передачи мощности от ВЧГ в разряд,  $P_p$  – мощность, поглощённая плазмой,  $P$  – падающая мощность ВЧГ,  $I$  и  $I_0$  – среднеквадратические величины тока индуктора при горении разряда и без него, соответственно.

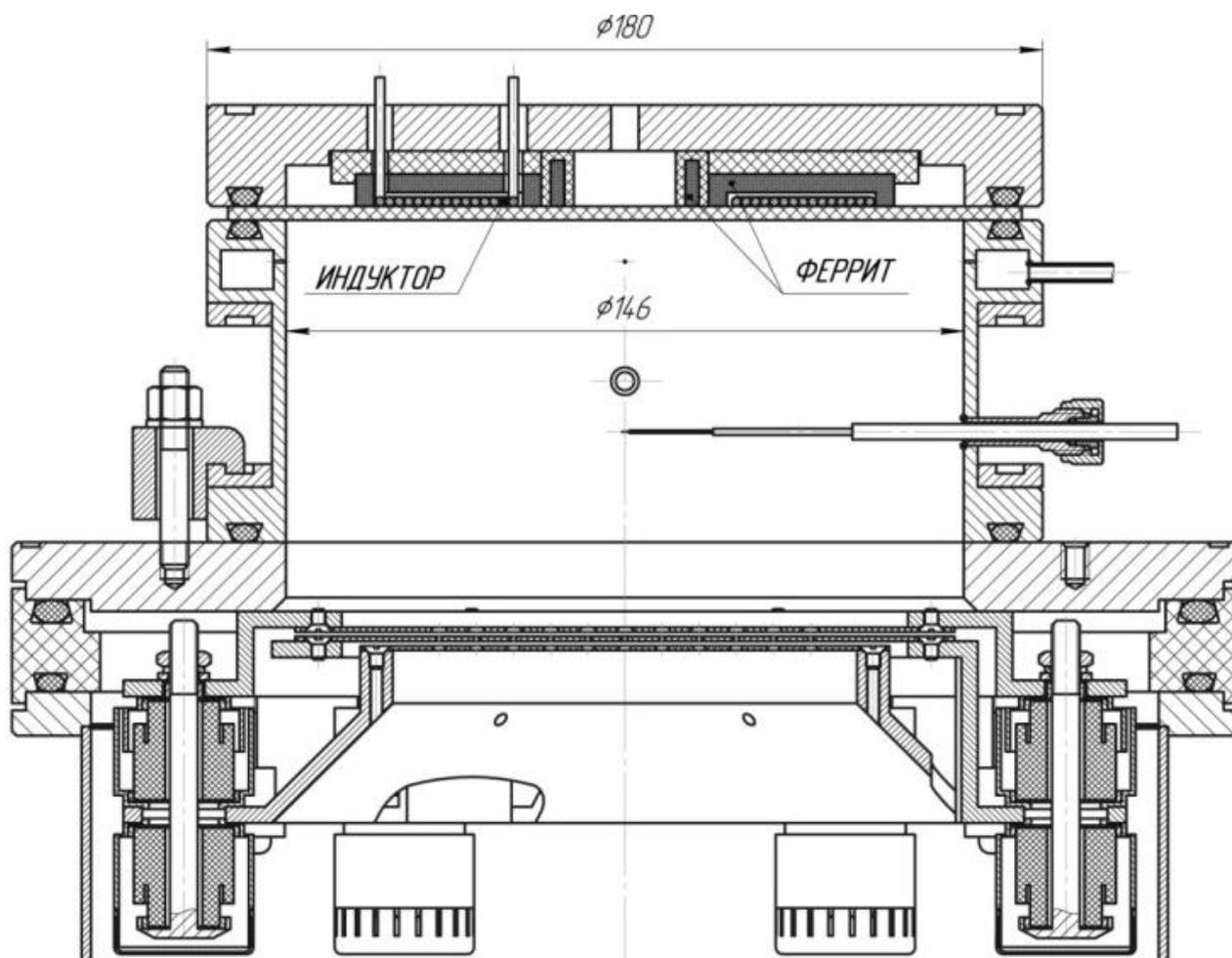


Рисунок 1 – Конструктивная схема лабораторной модели ВЧИИП-10Ф

В работе предложена модифицированная, технически расширенная методика интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла ВЧИИП при неизвестных локальных свойствах плазмы [4]. Измеряемыми параметрами являются токи  $I$  и  $I_0$ , фиксируемые измерителями тока на одном из выводов индуктора и на выходной линии ВЧГ при точном его согласовании с нагрузкой. Предлагаемая методика, включающая определение ВЧ-мощности разряда, позволяет получить физико-техническую характеристику изучаемого ВЧИ-газоразрядного узла. Его особенности зависят от неконтролируемых утечек ВЧ-мощности, качества линии передачи ВЧ-мощности в разряд и от конструкции ВЧИ-газоразрядного узла. Методика предполагает формирование набора контрольных индикаторов, включающих предварительно найденные электротехнические параметры индуктора,

измеряемые в два этапа: при размещении индуктора в свободном пространстве (вдали от электропроводящих деталей) и в составе собранной конструкции. В набор индикаторов введены также данные о суммарных токах утечки ВЧ-мощности и ряд расчётных параметров цепи разряда, всесторонне характеризующих техническое состояние системы.

В данном разделе описывается методика проведения измерений локальных параметров плазмы, конструкции зондов и принцип обработки данных, получаемых с помощью зондовой станции VGPS-12 [17].

Согласно предложению [3] близость функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) к функции Максвелла можно оценить качественно по степени линейности вероятности распределения электронов по энергиям (ВРЭЭ), а также и количественно путём сопоставления измеренных экспериментальных величин электронного тока насыщения  $j_{es\bar{z}}$  на зонд с плотностью электронного тока насыщения  $j_{esM}$ , рассчитанной для изотропной максвелловской плазмы с использованием измеренных зондами параметров плазмы

$$j_{esM} = (1/4)en_e(8kT_e/\pi m_e)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n_e$  – концентрация электронов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  – температура электронов,  $m_e$  – масса электронов.

Если зондируемая плазма бесстолкновительная, изотропная и характеризуется максвелловской ФРЭЭ, то торможение электронов в зондовом слое объёмного заряда подчиняется закону Больцмана, справедливому в бесстолкновительной максвелловской плазме:

$$n_{ef} = n_{e0} \cdot \exp(-\Delta V_f/T_e), \quad (3)$$

где температура электронов выражена в электрон-вольтах. В этих условиях можно вычислить плотность электронного тока на зонд под плавающим потенциалом

$$j_{ef} = j_{es} \cdot \exp(-\Delta V_f/T_e), \quad (4)$$

равную плотности ионного тока на зонд  $j_{if}$ .

В специальном эксперименте был получен коэффициент Бома в формуле для определения ионного тока насыщения на зонд [18]. В ВЧИ-разряде ксеноновой плазмы при давлении около 2 мТорр его величина составила 1,23.

Была разработана методика определения массы ионов и толщины зондового слоя  $x_{SF}$  [7], которая важна для корректного выбора зондовой теории, используемой при интерпретации результатов диагностики локальных параметров плазмы зондами Ленгмюра:

1) Измеренная ФРЭЭ качественно и количественно анализируется на предмет близости к функции распределения Максвелла.

2) При подтверждении этой близости с помощью формулы Больцмана находят плотность электронного тока на зонд  $j_{ef}$ , равную плотности ионного тока  $j_{if}$  при плавающем потенциале  $V_f$ .

3) Совместным решением формулы Бома и уравнения закона Чайлда-Богуславского-Ленгмюра («закона 3/2») с коэффициентом Бома  $C_{Бц} = 1,23$  оценивают значения радиальных отношений  $x_{CBL} = R/a$ , где  $R$  – внешний радиус зондового слоя цилиндрического зонда, а  $a$  – радиус зонда.

4) С помощью ступенчато-фронтальной модели зондового слоя, которая, в отличие от формулы «закона 3/2», учитывает проникновение электронов в этот слой, вносит поправки в величины  $x_{CBL}$ , которые дают физически оправданные, скорректированные значения толщины зондового слоя в виде радиальных отношений  $x_{SF} = 0,692x_{CBL} + 0,3816$  и массы ионов  $M_i$  [8].

Для получения знаний о плотности ионного тока насыщения в области ИОС обычно пользуются формулой Бома. Такой шаг корректен только в случае максвелловской ФРЭЭ в стационарном пристеночном слое около ЭЭ ИОС. Для контроля такого соответствия можно было бы выполнить диэлектрическую газодинамическую модель ЭЭ с радиальным набором пристеночных зондов. В связи со сложностью подобной организации эксперимента было предложено применить имитатор плоского пристеночного зонда, показанный на рисунке 2.

Измерительный зонд имитатора выполнен в виде проволоки, плотно введённой в канал керамического стержня. Её торец зафиксирован заподлицо с торцом керамического стержня, площадь которого должна во много раз превышать собирающую поверхность зонда. В данном случае это различие достигло 12 раз. При контакте с плазмой около керамической плоскости должен образовываться стационарный пристеночный слой с соответствующим переходным слоем в

квазинейтральной плазме. Данный имитатор радиально подвижен и позволил измерить пространственные распределения параметров этого переходного слоя.

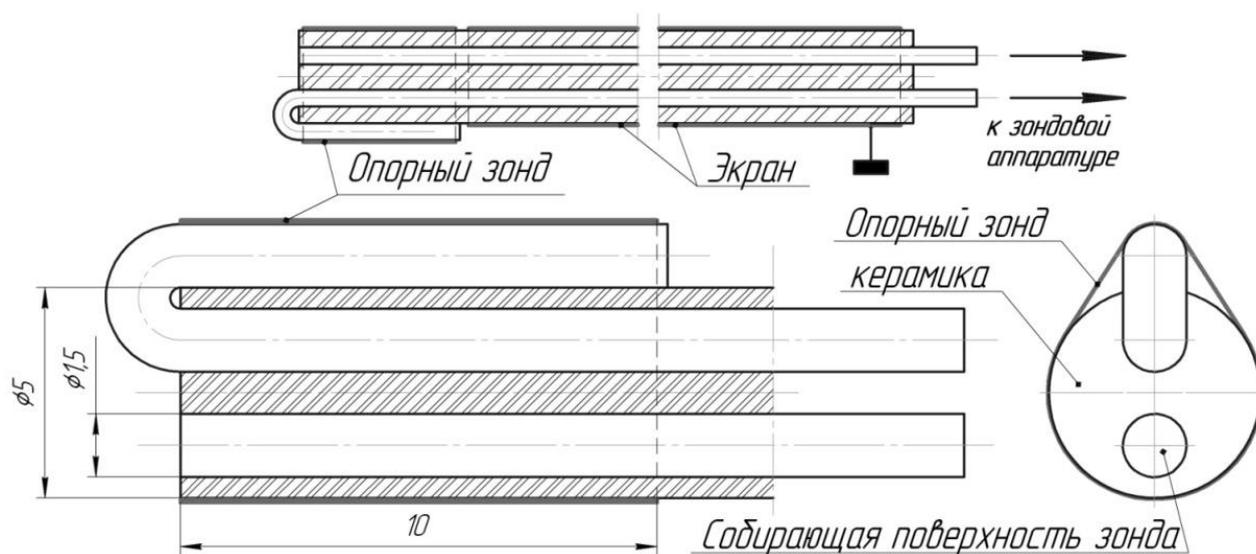


Рисунок 2 – Схема и чертёж имитатора пристеночного плоского зонда

Качественный и количественный анализ измеренных ФРЭЭ плоского зонда показал, что пристеночная плазма около керамической поверхности была явно немаксвелловской средой, где формула Бома неприменима. Следовательно, оценка  $J_{if}$  возможна лишь путём экстраполяции ионных ветвей зондовых вольт-амперных характеристик (ВАХ) к плавающему потенциалу зонда  $V_f$ . Очевидно, что данные измерения, производимые имитатором, крайне важны при проектировании электродов ИОС и создании физико-математических моделей ускорения ионов, изложенных в разделе 5.

**В четвёртом разделе** диссертации описывается применение вышеизложенной методики интегральной диагностики параметров системы электропитания и газоразрядного узла [5]. Предложенная методика позволила выявить не только эффективность передачи ВЧ-мощности из ВЧГ в ВЧИ-разряд, но и детализовать баланс мощности (см. пример такого баланса на рисунке 3).

Методика была апробирована на нескольких устройствах ВЧИИП и выявила существенное преимущество ВЧИИП-10Ф перед ВЧИИП с цилиндрическими и куполообразными индукторами без феррита [14-16, 20] в части энергоэффективности. Малые потери в линии электропитания ВЧИИП-10Ф обусловлены выбором согласующего устройства трансформаторного типа.

Диагностика локальных параметров плазмы ВЧИИП-10Ф показала относительно высокую равномерность радиальных распределений концентрации электронов  $n_e$  по радиусу (см. рисунок 4) и температуры электронов  $T_e$  по радиусу (при падающей мощности ВЧГ до 200 Вт диапазон изменения  $T_e$  составил 3,35 – 3,8 эВ)

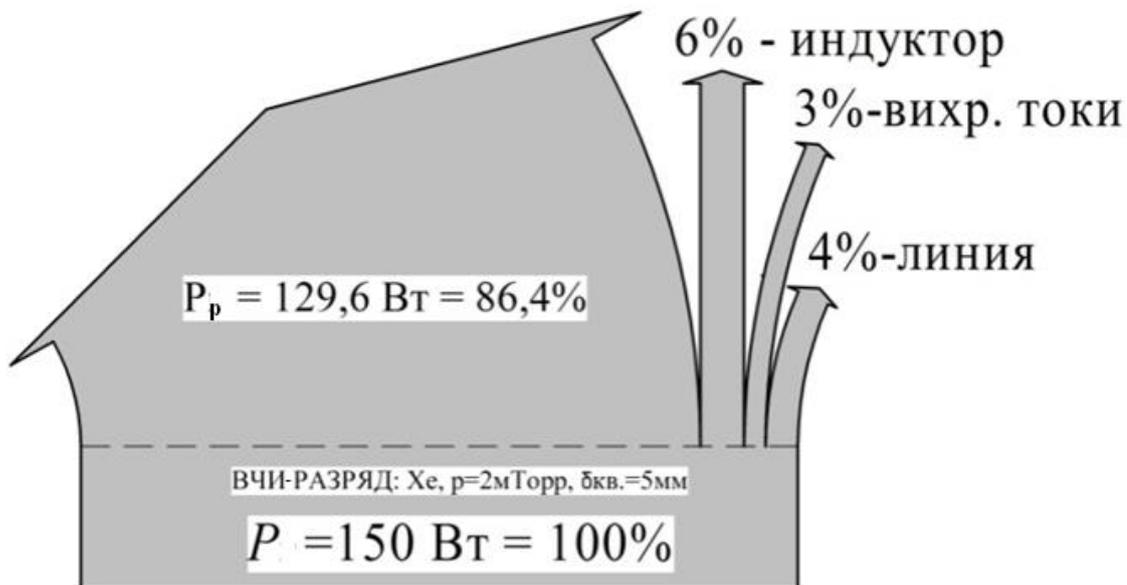


Рисунок 3 – Баланс мощности ВЧИИП-10Ф для 150 Вт падающей мощности при расходе 2 смл/мин

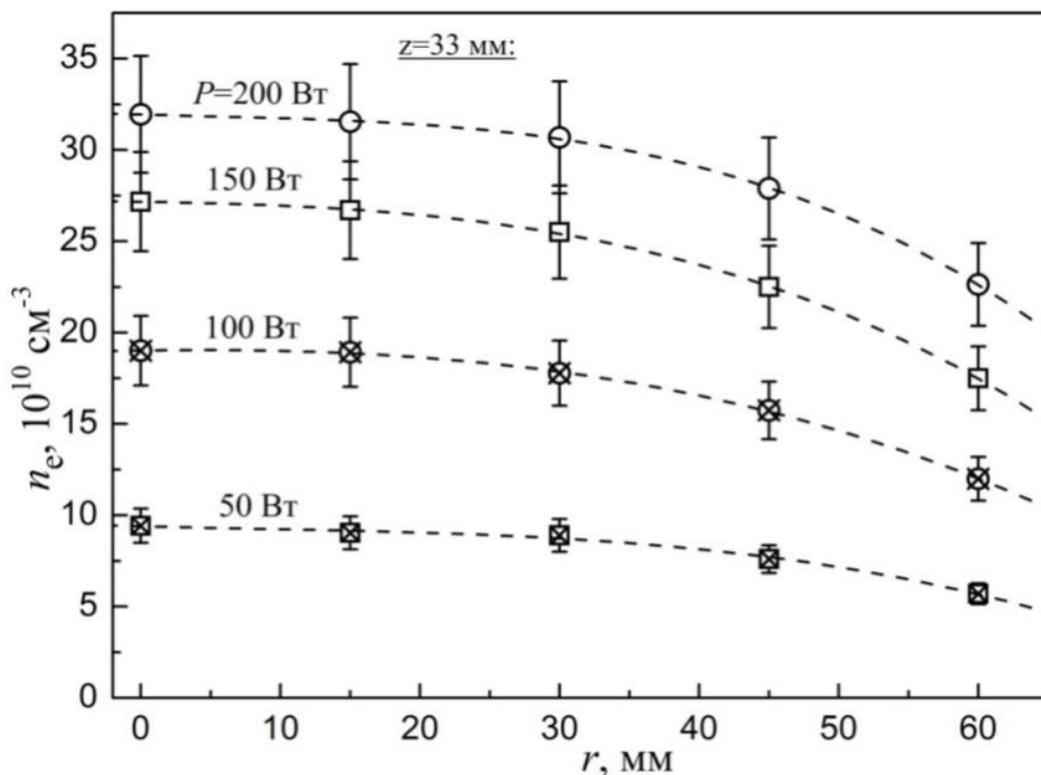


Рисунок 4 – Радиальные распределения концентрации электронов

Следующим этапом проведения исследований локальных параметров плазмы явилось применение Г-образного вращательно-поступательного зонда Ленгмюра, который позволил выявить высокую степень равномерности плазмы по высоте ГРК.

Для оценки влияния на измерения зондами Ленгюра магнитного поля индуктора был оценён радиус Лармора  $r_L \sim 1 \text{ см} = 10 \text{ мм}$ , превысивший радиус зонда  $a = 0,075 \text{ мм}$  более чем на два порядка величины. Следовательно, его влияние на измерения зондов Ленгюра было несущественным.

Анализ погрешности, вносимой в измерения неизолированной поверхностью внешнего экрана зонда в виде стальной трубки [2, 11-13], показал, что в данной работе она была крайне малой.

Для оценки влияния рекомбинации заряженных частиц на зондодержателе диаметра 1,6 мм [1, 19] в процессе измерений зондами из вольфрамовой нити диаметром 0,15 мм были использованы зонды трёх длин:  $l_3 = 3 \text{ мм}$ , 5 мм и 10 мм. Оказалось, что показания в одной и той же позиции и при одной падающей мощности ВЧГ, возрастали с увеличением длины зондов, переходя в насыщение при подходе к  $l_3 = 10 \text{ мм}$ . При этом возникла возможность указать некоторую границу по  $l_3$ , за пределами которой возмущения зондодержателем становятся меньше общей погрешности измерений зондами Ленгюра [9].

В качестве параметра, характеризующего влияние размера зондодержателя относительно измерительной поверхности цилиндрического зонда, было выбрано отношение площади собирающей поверхности зонда  $2\pi a l_3$  ( $a$  – радиус зонда,  $l_3$  – длина собирающей поверхности зонда) к площади торцевой поверхности зондодержателя  $\pi b^2$  ( $b$  – радиус зондодержателя) в сумме с боковой поверхностью зондодержателя на длине его диаметра (одного калибра)  $2\pi b \cdot 2b = 4\pi b^2$ . Обозначив этот параметр как  $L_3$ , получаем

$$L_3 = 2\pi a l_3 / 5\pi b^2 = 0,4(a/b^2)l_3. \quad (5)$$

Видно, что этот параметр, пропорциональный длине зонда  $l_3$ , представляет собой относительную величину собирающей поверхности зонда, рост которой приводит к уменьшению влияния области возмущений плазмы зондодержателем. Их количественная характеристика может быть оценена с помощью зависимости нормированной концентрации электронов ксеноновой плазмы от безразмерной

длины цилиндрических зондов  $L_3$ , которая представлена на рисунке 5. На исследованном режиме ВЧИ-разряда, который определяется поглощённой плазмой ВЧ-мощностью  $P_p = 176$  Вт и давлении ксенона  $p = 2$  мТорр степень влияния зондодержателя составляет порядка половины поля погрешности измерения  $n_e$ , что соответствует  $L_3 \sim 0,3$ , согласно рисунку 5. Найденное значение  $L_3$  позволяет задавать необходимую для корректных измерений длину зонда  $l_3$  и его зондодержателя.

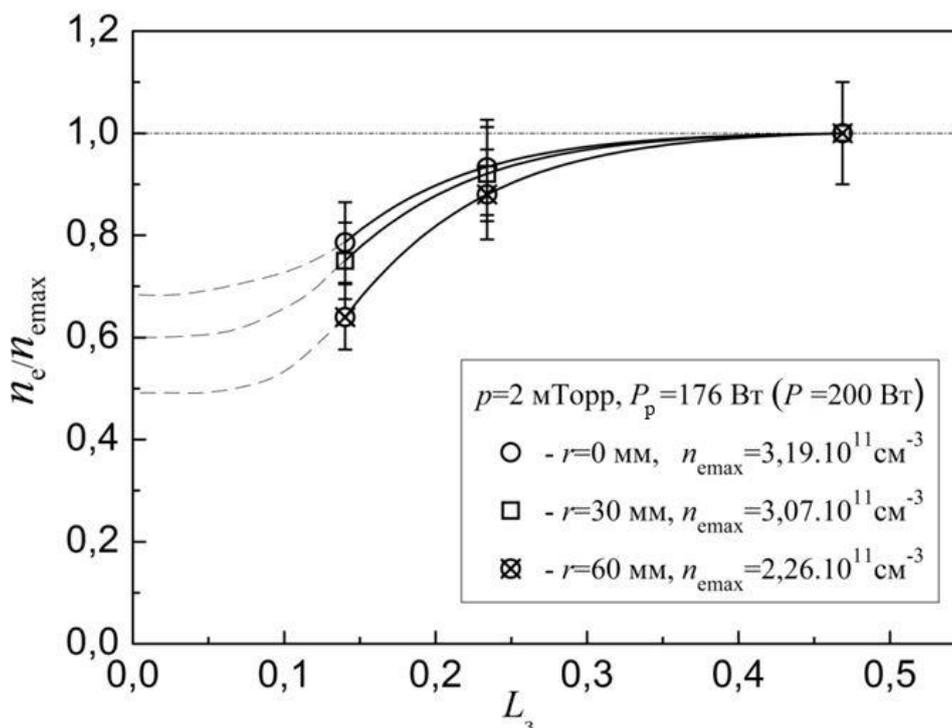


Рисунок 5 – Зависимость нормированной концентрации электронов от безразмерной длины цилиндрических зондов  $L_3$  при падающей мощности ВЧГ  $P = 200$  Вт

Согласно приведенной в предыдущем разделе методике оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС с помощью имитатора плоского пристеночного зонда были проведены измерения, которые показали несоответствие ФРЭЭ функции Максвелла, что привело к необходимости применения линейных экстраполяций ионных ветвей логарифмических и двойных логарифмических ВАХ плоских зондов. Такие экстраполяции показали совпадающие величины плотности ионного тока на зонд. Радиальные распределения плотностей ионного тока на зонд при разных уровнях падающей мощности ВЧГ представлены на рисунке 6.

В пятом разделе диссертации описывается проектирование и расчёт ИОС. В данном разделе приведены результаты численного моделирования траекторий ионов пучка в программе IGUN и обоснование выбора геометрических параметров ИОС, вытекающих из требований применения в ВЧИИП.

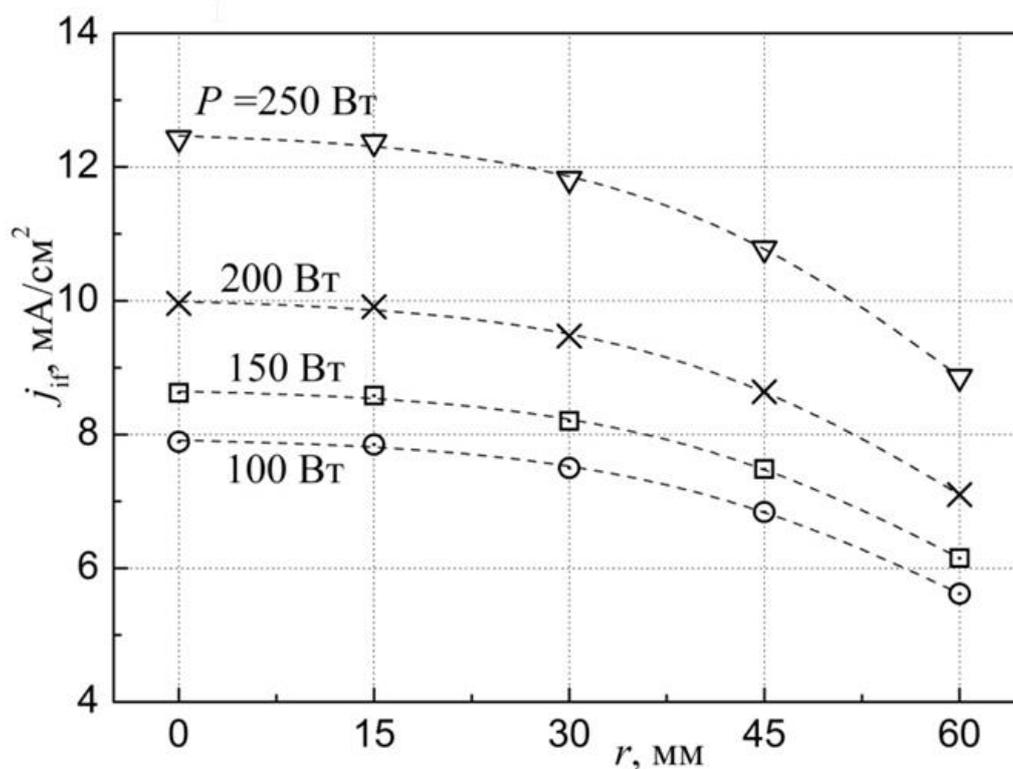


Рисунок 6 – Зависимости изменения плотности ионного тока по радиусу

Исходя из задачи минимизации угла расходимости ионного пучка, была выбрана щелевая геометрия отверстий ИОС. При такой форме отверстий расходимость пучка в поперечном по отношению к щели направлении происходит в соответствии с законами электростатики и отражает степень совершенства конструкции. Расходимость ионного пучка вдоль щели имеет другую природу и определяется соотношением тепловой скорости ионов и скоростью ускоренных ионов на выходе из ИОС. Таким образом, получается клиновидный ионный пучок. В качестве материала для изготовления электродов был использован графит в силу малой величины его коэффициентов линейного термического расширения и ионного распыления. Геометрия электродов была выбрана плоской.

В ходе работ с ВЧИИП-10Ф были получены значения массового КПД, который достиг 95 % при токе пучка 250 мА, а цена иона лежала при этом в диапазоне 775 – 1000 Вт/А.

Измеренные значения ионного тока по сравнению с предсказаниями по данным имитатора плоского зонда оказались занижены на величину менее 30 %. Это можно считать удовлетворительным результатом, учитывая несимметричность расположения плоского зонда в торце керамического стержня и недостаточно высокое соотношение площадей керамики и собирающей поверхности зонда.

Измерения полуугла расходимости были проведены двумя методами: 1) прямым измерением по эрозии листа титана и 2) измерением эрозии стекла, закрытого стальными пластинами, на краях которых методом ступеньки была измерена эрозия стекла с помощью профилометра KLA D-600 с точностью 5 нм (см. рисунок 7).

В обоих случаях полуугол расходимости ионного пучка укладывался в 3 градуса в поперечном направлении щелей, и был существенно меньше в продольном направлении.

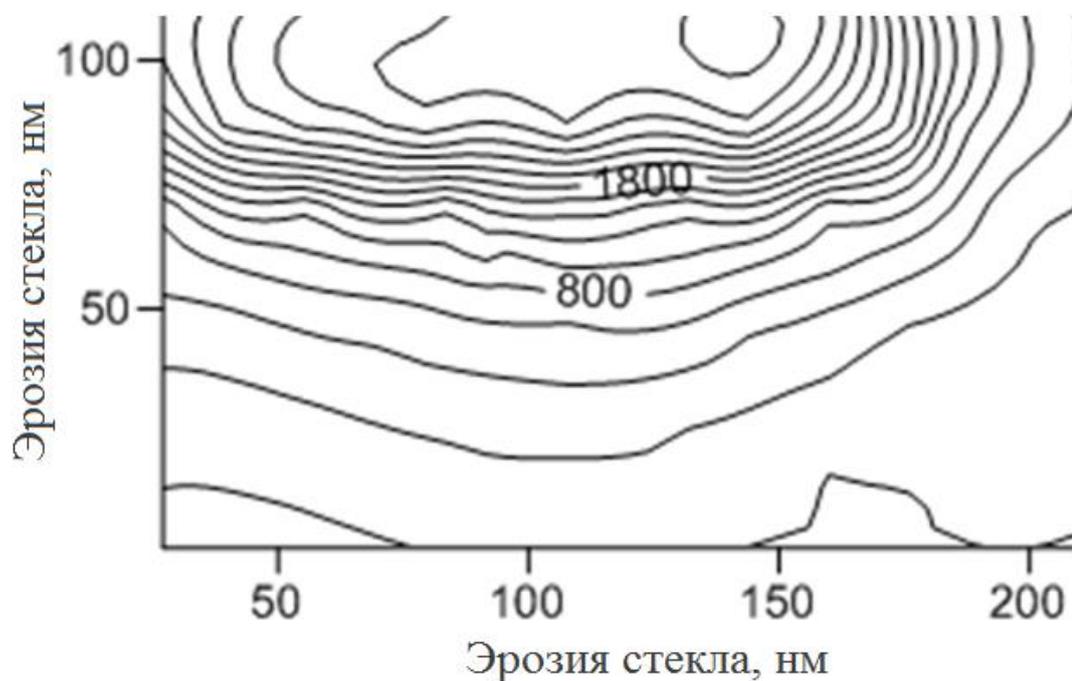


Рисунок 7 – Двухмерная картина воздействия ионного пучка, полученная при помощи эрозии стекла, измеренной профилометром

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Была разработана конструкция лабораторной модели ВЧИИП-10Ф с усовершенствованными параметрами энергоэффективности системы генерации плазмы (эффективность передачи ВЧ-мощности от генератора в разряд составила величину до 92 %), отличающаяся повышенной пространственной однородностью

плазмы за счет применения плоского индуктора, оснащенного ферритовым сердечником с высокой температурой Кюри, трансформаторного согласующего устройства в цепи электропитания ВЧИ-разряда. Металлическая ГРК позволила упростить проведение измерений локальных параметров плазмы и проводить измерение давления в газоразрядном пространстве.

2. Был разработан метод интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла, выявляющей физико-технический облик изделия, включающий его энергоэффективность, который позволил детализовать баланс мощности, выявить все слабые места конструкции и наметить пути для их совершенствования.

3. Результаты диагностики локальных параметров плазмы в ГРК путем измерений зондами Ленгмюра показали высокую равномерность пространственных распределений фундаментальных параметров плазмы по радиусу ГРК (по диаметру ИОС неравномерности концентрации и температуры электронов составили не более 15 % и 5 %, соответственно) а также в объёме (неравномерность была меньше точности измерений), что крайне важно для получения сколламированного пучка ионов.

4. Был разработан и апробирован на ВЧИИП-10Ф способ оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС ВЧИИП с помощью имитатора плоского пристеночного зонда Ленгмюра. Результаты оценки показали занижение измерений имитатора по сравнению с реальным ионным током пучка на величину порядка 30 %, что связано с недостаточными размерами имитатора и несимметричностью его исполнения.

6. Была спроектирована ИОС со целевой формой отверстий, рассчитаны оптимальные формы сечений электродов, сформирован клиновидный ионный пучок малой расходимости. Полученные значения полуугла расходимости клиновидного пучка ионов составили величину до 3 градусов по одной из плоскостей и существенно меньшие значения – по другой, тогда как в лучших образцах ВЧИД эти углы составляют около 13 градусов по обеим плоскостям. Последнее было достигнуто высокой однородностью плазменных параметров в зоне ИОС, так как угол расходимости ионного пучка в случае щелевой оптики имеет жёсткую связь с нормированным первеансом и, следовательно, с радиальной равномерностью плотности ионного тока.

## Список публикаций по теме диссертации

### В изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Машеров, П.Е. Влияние размера первого зондодержателя цилиндрического зонда Ленгмюра на результаты локальной диагностики плазмы / П.Е. Машеров // Вестник Московского авиационного института. – 2016. – Т. 23. – № 2. – С.42-49.
2. Булаева, М.Н. Повышение точности зондовой диагностики плазмы / М.Н. Булаева, А.П. Кирпичников, И.В. Кравченко, Х.В. Лёб, П.Е. Машеров, В.А. Рябый, Д.П. Ткаченко // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 18. – С. 69-73.
3. Рябый, В.А. Интегральная и локальная диагностики модели энергоэффективного ВЧ источника ионного пучка / В.А. Рябый, П.Е. Машеров // Известия академии наук. Энергетика. – 2016. – № 2. – С. 46-57.
4. Рябый, В.А. Контрольные индикаторы энергоэффективности ВЧ индукционного газоразрядного узла / В.А. Рябый, П.Е. Машеров, В.А. Обухов, А.И. Могулкин // Известия академии наук. Энергетика. – 2016. – № 3. – С. 70-81.
5. Рябый, В.А. Методика интегральной диагностики высокочастотного индукционного газоразрядного блока ионного двигателя / В.А. Рябый, В.А. Обухов, А.П. Кирпичников, П.Е. Машеров, А.И. Могулкин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2015. – № 4. – С. 82-86.

### В рецензируемых иностранных изданиях, входящих в международные реферативные базы (SCOPUS):

6. Masherov, P.E. Integral Electrical Characteristics And Local Plasma Parameters Of An RF Ion Thruster / P.E. Masherov, V.A. Godyak, V.A. Riaby // Review Of Scientific Instruments – 2016. – Vol. 87. – Issue 2. – 08B926.
7. Masherov, P.E. Note: The Expansion of Possibilities for Plasma Probe Diagnostics / P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.K. Abgaryan // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87. – № 056104.
8. Masherov, P.E. Note: Refined Possibilities for Plasma Probe Diagnostics / P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.K. Abgaryan / Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87. – 086106.
9. Riaby, V.A. On The Objectivity Of Plasma Diagnostics Using Langmuir Probes / V.A. Riaby, P.E. Masherov, V.A. Obukhov // High Voltage Engineering Journal. – 2012. – Vol. 38. – P. 790-793.

10. Riaby, V.A. Effectiveness Of Radiofrequency Inductively Coupled Plasma Sources For Space Propulsion / V.A. Riaby, P.E. Masherov, V.A. Obukhov, V.P. Savinov // High Voltage Engineering Journal. – 2013. – Vol. 39. – №. 009. – P. 2077-2088.

**Другие публикации:**

11. Булаева, М.Н. Повышение точности зондовой диагностики плазмы / М.Н. Булаева, А.П. Кирпичников, И.В. Кравченко, Х.В. Лёб, П.Е. Машеров, В.А. Рябый, Д.П. Ткаченко // Труды Междунар. конф. «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы». – Казань: Изд. КНИТУ. – 2012. – С. 38-39.
12. Булаева, М.Н. Повышение точности зондовой диагностики плазмы / М.Н. Булаева, А.П. Кирпичников, И.В. Кравченко, Х.В. Лёб, П.Е. Машеров, В.А. Рябый, Д.П. Ткаченко // Актуальные проблемы российской космонавтики. Материалы 37-х акад. чтений по космонавтике. – М.: изд. МГТУ им. Баумана.– 2013. – С.111.
13. Ryabyu, V. Decrease of Plasma Perturbations Caused by Langmuir Probes / V. Ryabyu, V. Obukhov, P. Masherov, V. Savinov // Proc. 21 Intern. Symp. on Plasma Chemistry. – Cairns: Austr. Nat. Univ. – 2013. – report No.410.
14. Рябый В.А., Обухов В.А., Машеров П.Е., Кудрявцев А.В., Экспериментальное исследование эффективности лабораторной модели ВЧИД-200 в виде технологической установки RIM-20, 12-я междунар. конф. «Авиация и космонавтика-13». – М.: изд. МАИ. – 2013. – С.342-344.
15. Рябый В.А., Булаева М.Н., Машеров П.Е., Могулкин А.И., Характеризация ВЧ индукционного газоразрядного узла ВЧ источника ионов, Труды Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014. – Казань: изд-во КНИТУ. – 2014. – С. 342-346.
16. Рябый В.А., Обухов В.А., Машеров П.Е., Могулкин А.И., Сертификация технологического ВЧ индукционного источника ионов RIM-20, Труды 24-й Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела». – М.: изд. Минобр РФ. – 2014. – С. 407-417.
17. Masherov, P.E. Integral Electrical Characteristics And Local Plasma Parameters Of An RF Ion Thruster / P.E. Masherov, V.A. Godyak, V.A. Riaby // 16th Internat. Conf. on Ion Sources. Book of abstracts. – New York City, USA: AIP. – 2015. – TuePE12.

18. Riaby, V. Experimental Determination Of Bohm Coefficients For Cylindrical And Plane Langmuir Probes / V. Riaby, P. Masherov // Proc. VIIIth Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. Contributed papers. – Minsk, Belarus. – 2015. – P. 27-30.
19. Машеров, П.Е. Влияние относительного размера первого зондодержателя цилиндрического зонда Ленгмюра на результаты локальной диагностики плазмы/ П.Е. Машеров // Сборник тезисов 14-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика-2015» – М.: изд. МАИ. – 2015. – С. 137-139.
20. Riaby, V.A. Integral Diagnostics Of An ICP Discharge System / V.A. Riaby, V.A. Obukhov, P.E. Masherov, A.I. Mogulkin // Proc. 6th Int. Workshop and Summer School on Plasma Physics. – Sofia: Sof. Univer. – P.48.
21. Riaby, V.A. Integral Diagnostics Method Characterizing Gas Discharge Unit Of An RF Inductive Ion Thruster / V.A. Riaby, V.A. Obukhov, P.E. Masherov, A.I. Mogulkin, V.V. Balashov // Proc. of the 34th Internat. Electric Propulsion Conf., Hyogo-Kobe, Japan. – 2015. – rep. No. 450. – 7 p.