

На правах рукописи



**КОЖЕВНИКОВ Владимир Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДНОЙ  
КАМЕРЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ  
МОЩНОСТИ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва — 2017

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

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Хартов Сергей Анатольевич**

**Официальные оппоненты:** **Ходненко Владимир Павлович**  
доктор технических наук, профессор, АО «Научно-производственное предприятие «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», главный научный сотрудник

**Духопельников Дмитрий Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Плазменные энергетические установки»

**Ведущая организация:** Государственный научный центр РФ — федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»

Защита состоится 26 декабря 2017 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/upload/iblock/11c/Dissertatsiya.-Kozhevnikov.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08  
д. т. н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

При наращивании орбитальной группировки космических аппаратов целесообразен переход к спутникам массой от 100 до 1000 кг, т.н. малым космическим аппаратам (МКА), способным поддерживать свою работоспособность на низких орбитах в течение длительного периода (до 15 лет). В качестве двигательной установки для довыведения МКА на орбиту назначения, поддержания и коррекции орбиты в процессе эксплуатации МКА, может применяться электроракетная двигательная установка (ЭРДУ). Главными требованиями к ЭРДУ для МКА должны быть повышенные тяговые характеристики и длительность работы при малом электропотреблении.

В России одним из основных эксплуатируемых электроракетных двигателей (ЭРД) является стационарный плазменный двигатель (СПД), за рубежом чаще применяется ЭРДУ с ионным двигателем (ИД). Данные типы ЭРД используют электростатический механизм ускорения пучка ионов: в объеме плазмы в СПД и в зазоре сетчатых электродов ионно-оптической системы (ИОС) ИД. Одним из перспективных типов ИД является высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД). В рамках государственных программ РФ в МАИ ведется разработка ВЧИД малой мощности (ВЧИД ММ). С учетом потенциального применения в составе МКА, при разработке данного двигателя сформулированы следующие требования: потребляемая мощность двигателя не более 300 Вт; тяга более 8 мН; удельный импульс свыше 35000 м/с; длительный ресурс работы до 20000 часов и более. Выполняя данные требования, необходимо достигнуть относительно высокого коэффициента полезного действия ЭРДУ — более 50%. Однако повышение КПД ВЧИД ММ осложняется высокой ценой иона 400...600 Вт/А, и эти значения выше, чем у прочих типов эксплуатирующихся ЭРД.

С учетом этого актуальным является совершенствование процесса передачи энергии в плазму разрядной камеры (РК) ВЧИД ММ, с целью снижения затрат мощности на ионизацию. При реализации этой задачи необходимо проведение исследования локальных параметров плазмы в РК двигателя с использованием зондовой диагностики. Достоверные данные о распределении концентрации и температуры плазмы индукционного высокочастотного разряда необходимы и для разработки новых моделей ВЧИД малой мощности, которые имеют разрядные камеры небольших размеров. Отклонения в геометрии РК данного типа двигателя

могут приводить к существенному изменению эффективности его рабочего процесса и в конечном итоге характеристик. Полученные распределения температуры и концентрации электронов плазмы в объеме РК позволят провести анализ процесса передачи энергии в плазму, определить параметры индуктора ВЧИД для выбранной геометрии РК. Помимо этого экспериментальные данные о параметрах плазмы позволят разработать упрощенную модель для расчёта локальных параметров плазмы в объеме РК ВЧИД, которую можно использовать для оценок на этапе проектирования двигателя.

Для осуществления диагностики локальных параметров плазмы требуется разработать специальную лабораторную модель двигателя, конструкция которой предусматривает возможность ввода электростатических зондов в РК. При этом следует подтвердить, что интегральные характеристики данной модели соответствуют параметрам разработанного в МАИ прототипа ВЧИД ММ.

**Объектом исследования** является лабораторная модель ВЧИД малой мощности, использующая ксенон в качестве рабочего тела.

**Предметом исследования** являются интегральные характеристики модели ВЧИД и распределения локальных параметров плазмы в объёме её РК.

**Целью работы** является получение экспериментальных распределений температуры и концентрации электронов плазмы в РК ВЧИД для последующего анализа и выработки путей снижения затрат на ионизацию в двигателе.

### **Основные задачи диссертации**

В соответствии с целью в рамках работы были поставлены следующие задачи:

1. Разработка лабораторной модели ВЧИД ММ с диаметром выходного пучка ионов 80 мм, приспособленной для экспериментов с применением электростатических зондов.

2. Разработка методики измерения локальных параметров плазмы в объеме РК ВЧИД ММ с использованием тройного электростатического зонда, позволяющего производить достоверные измерения в индукционном разряде.

3. Построение двумерных распределений температуры и концентрации электронов плазмы в объеме РК ВЧИД ММ, работающего в режимах с приложенной к ИОС извлекающей ионы разностью потенциалов, и без неё. Сравнение полученных распределений при изменении массового расхода рабочего тела и режима работы двигателя.

4. Разработка численной модели рабочего процесса в объеме разрядной камеры ВЧИД ММ.

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

1. Методика диагностики локальных параметров плазмы в РК ВЧИД ММ с использованием тройных электростатических зондов.
2. Результаты зондовой диагностики плазмы в РК лабораторной модели ВЧИД ММ с диаметром выходного пучка ионов 80 мм.
3. Численная модель процесса плазмообразования в РК ВЧИД ММ.
4. Результаты сравнения расчётов по предложенной численной модели с экспериментальными данными зондовой диагностики и известными из других исследований параметрами плазмы в ВЧ разряде.

#### **Методы исследования**

В работе применялись как эмпирические, так и теоретические методы исследования. Были использованы: методика определения интегральных параметров ВЧИД ММ, методика контактного исследования локальных параметров плазмы тройным электростатическим зондом, численное моделирование процесса ионизации в объеме РК ВЧИД, сравнительный анализ результатов измерений и расчета по численной модели с экспериментальными данными и работами других исследователей.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана методика исследования локальных параметров плазмы в РК ВЧИД ММ с применением тройного электростатического зонда и специального алгоритма для обработки экспериментальных данных, позволяющая построить двумерные распределения локальных параметров плазмы в объеме РК.
2. Впервые проведено сравнительное экспериментальное исследование распределений локальных параметров плазмы в объеме РК ВЧИД в режимах с извлечением и без извлечения ионного пучка.
3. Предложена численная модель, позволяющая построить двумерные распределения локальных параметров плазмы в РК ВЧИД.

#### **Практическая и теоретическая значимость результатов работы:**

1. Создана лабораторная модель ВЧИД ММ, позволяющая проводить измерения локальных параметров плазмы в РК, особенностью которой является возможность введения электростатических зондов в плазму через отверстия в стенке камеры.

2. Разработана методика исследования локальных параметров плазмы в РК ВЧИД с применением тройного электростатического зонда без дополнительной аппаратной фильтрации его сигнала. Показана возможность применения данной методики для исследования плазмы ВЧИД.

3. По результатам измерений построены двумерные распределения локальных параметров плазмы в РК ВЧИД ММ для разных массовых расходов рабочего тела (ксенона) в двух режимах: с извлечением и без извлечения ионного пучка. Полученные распределения температуры и концентрации электронов пригодны для использования при численном моделировании процессов в РК ВЧИД.

4. Произведено численное моделирование процесса плазмообразования в объеме РК; результаты расчетов сравнивались с экспериментальными распределениями локальных параметров плазмы в объеме РК ВЧИД ММ, а также с данными других исследователей.

#### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов диссертации обусловлена использованием корректной методики измерений, основанной на апробированных ранее подходах; проведением экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании; совпадением результатов численного моделирования с экспериментом, а также с данными других исследователей.

#### **Личный вклад соискателя**

При непосредственном участии автора:

1. Разработана лабораторная модель двигателя с диаметром пучка ионов 80 мм, использующая ксенон в качестве рабочего тела, и подтверждено соответствие ее интегральных характеристик параметрам опытного образца ВЧИД ММ.

2. Разработана методика зондовой диагностики плазмы ВЧИД с применением тройных электростатических зондов. Созданы система автоматического сбора измеряемых параметров и программы их обработки.

3. Проведена диагностика локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД ММ в разных режимах работы двигателя.

4. Произведена обработка данных эксперимента: построены двумерные распределения температуры и концентрации электронов плазмы в разных режимах работы лабораторной модели ВЧИД ММ.

5. Построена численная модель, позволяющая оценить распределения температуры и концентрации электронов плазмы в объеме РК ВЧИД.

6. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с расчётами по предложенной численной модели и с данными других авторов.

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

Результаты работы использованы при выполнении ОКР по Программе государственной поддержки по созданию высокотехнологичных производств, выполняемой с участием высших учебных заведений, проект «Создание высокотехнологичной производственно-испытательной базы для разработки, стендовой отработки и промышленного производства электроракетных двигателей нового поколения — высокочастотных ионных двигателей малой мощности» по договору № 02.G25.31.0072. Результаты работы использованы при выработке рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкций ВЧИД ММ.

### **Апробация результатов**

Результаты исследований, описанных в диссертации, представлены в 3 научно-технических отчётах, патенте на полезную модель (№158759 РФ, опубл. 20.01.2016), в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ, в 3 статьях в зарубежных рецензируемых изданиях, индексированных в реферативной базе данных Scopus. Основные результаты работы обсуждались на межведомственном семинаре кафедры 208 в МАИ, докладывались на международных конференциях: XXXVII, XXXVIII, XL, XLI Академических чтениях по космонавтике (Москва, 29 января – 1 февраля 2013, 28–31 января 2014, 26–29 января 2016, 24–27 января 2017); XLII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения — 2016» (Москва, 12–15 апреля 2016); 11-ой, 12-ой, 13-ой, 14-ой, 15-й Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва, 13–15 ноября 2012, 12–15 ноября 2013, 17–21 ноября 2014, 16–20 ноября 2015, 14–18 ноября 2016); 5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsion – New Challenges» (Дрезден, 7–12 октября 2014); 5 International Conference «Space Propulsion 2016» (Rome, Italy, 2–6 May 2016). Образец лабораторной модели ВЧИД ММ представлялся, вместе с докладом, на ежегодной национальной выставке «ВУЗПРОМЭКСПО»-2013 (Москва, 17–18 декабря 2013).

## Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включает в себя 48 рисунков, 12 таблиц, а также список литературы, содержащий 98 наименований. Работа разделена на введение, 3 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** посвящено обоснованию актуальности темы исследования; перечислены объект и предмет исследования, цель работы, основные задачи и методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, обоснована достоверность полученных результатов; показаны реализация и внедрение результатов работы, апробация результатов работы и публикации автора, личный вклад соискателя; кратко рассмотрена структура диссертации и содержание её глав.

**В первой главе диссертации** проведен анализ состояния разработки и перспектив применения ВЧИД. Показаны основные задачи, решаемые с помощью ЭРДУ с ВЧИД: довыведение МКА на орбиту назначения, поддержание и коррекция орбиты в процессе эксплуатации МКА.

Описан принцип работы ВЧИД, при этом внимание уделено процессу ионизации, проходящему в разряде двигателя. Показаны основные факторы, влияющие на эффективность генерации плазмы в индукционном разряде ВЧИД: эффективность передачи мощности от ВЧ поля индуктора в плазму, потери заряженных частиц на стенках РК, процент создаваемых многозарядных ионов в плазме.

Рассмотрены существующие схемы компоновки РК и индуктора ВЧИД, обоснован выбор РК полусферической формы с целью снижения энергетических затрат на ионизацию («цены иона»). В разделе, посвященном анализу экспериментальных и теоретических исследований ВЧИД, приводится краткое описание «трансформаторной модели» рабочего процесса в индукционном разряде, на основании которой можно оценить мощность, вкладываемую в плазму. Показано существование в индукционном разряде ВЧИД явления, аналогичного скин-эффекту в металлическом проводнике, по которому протекает ВЧ ток. Скин-эффект, проявляющийся в плазме, обуславливает снижение амплитуды электромагнитной волны по мере проникновения её в объем плазмы. Можно говорить о существовании

области эффективного поглощения энергии электромагнитного поля индуктора в области у стенки РК. Распределения локальных параметров (температуры электронов  $T_e$  и концентрации заряженных частиц  $n_e$ ) зависят от геометрии этой области. Показано, что плотность тока ионного пучка двигателя пропорциональна:

$$j_i \sim n_e \sqrt{T_e}, \quad (1)$$

В разделе, посвященном постановке задачи исследования, обоснован научный и практический интерес к экспериментальному исследованию ВЧИД ММ. Приведены осложняющие экспериментальные исследования факторы: малый размер РК двигателя и наличие ВЧ электромагнитного поля. Показана необходимость создания простого инструмента для моделирования рабочего процесса двигателя и расчёта потребляемой мощности, который будет использоваться для предварительной оценки параметров заданной компоновки ВЧИД ММ и подтверждения возможности применять двигатель в условиях ограниченного энергопотребления на борту МКА.

**Во второй главе диссертации** описана экспериментальная часть исследования. Для исследования локальных параметров плазмы (температуры  $T_e$  и концентрации электронов  $n_e$ ) в РК ВЧИД с помощью зондового метода было решено создать лабораторную модель (с диаметром пучка 80 мм) со специальной конструкцией камеры, позволяющей вводить зонд через отверстия в боковой стенке. На рисунке 1 представлены фотографии лабораторной модели ВЧИД ММ и РК с установленным зондом.



Рисунок 1 — Фотография узлов РК и ИОС лабораторной модели ВЧИД ММ (а); фотография тройного электростатического зонда, установленного для измерений локальных параметров плазмы (б).

Для исследования параметров плазмы в стенке РК выполнена группа отверстий для введения зонда. Отверстия располагались между витками индуктора и имели диаметр 1,2 мм. На рисунке 2 приведена схема расположения отверстий в РК лабораторной модели ВЧИД ММ. Зонд в ходе эксперимента устанавливался на «зондодержатель», обеспечивающий возможность перемещения по радиусу РК. На рис. 2 знаком «+» отмечены ряды позиций, в которых проводились измерения.

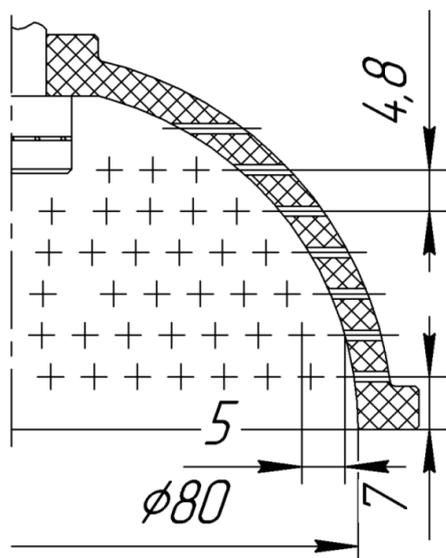


Рисунок 2 — Схема расположения позиций, в которых проводились измерения (осевое сечение).

Поскольку длина рабочего участка зонда составляет  $l_3 = 10$  мм, за точку измерения принималась середина рабочего участка. Для обеспечения герметичности РК свободные отверстия заполнялись цементом на основе порошка  $Al_2O_3$ .

В разделе, посвященном описанию экспериментальной установки, на которой проводились исследования лабораторной модели ВЧИД ММ, приведена схема размещения двигателя в вакуумной камере, схема системы подачи рабочего тела (ксенона), схема электропитания. Для питания индуктора использовался

специальный высокочастотный генератор (ВЧГ), который обеспечивал согласование выходной цепи с индуктором по алгоритму фазовой автоподстройки частоты. Система питания зондов и система сбора данных зондовых измерений имеют гальваническую развязку с остальными системами установки. В рабочем объеме вакуумной камеры в ходе эксперимента поддерживался динамический безмасляный вакуум на уровне  $\sim 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па при массовом расходе ксенона до  $\dot{m} \sim 0,65$  мг/с ( $\dot{V} \sim 6,65$  ст.см<sup>3</sup>/мин.).

Предварительно были проведены испытания лабораторной модели ВЧИД ММ с целью подтверждения уровня интегральных характеристик. Напряжения на эмиссионном и ускоряющем электродах ИОС составляли  $U_+ = 2000$  В и  $U_- = -200$  В соответственно. Параметры тока индуктора поддерживались автоматическим ВЧГ на уровне  $f_{rf} = 1,5 \pm 0,03$  МГц и  $I_{rf} = 5$  А. Основной характеристикой двигателя является зависимость потреблённой ВЧ мощности  $P_{rf}$  от расхода ксенона  $\dot{m}$  при заданных

уровнях тока ионного пучка  $I_i$ . На рисунке 3 приводятся результаты измерений для двух уровней тока ионного пучка двигателя ( $I_i = 100; 120$  мА).

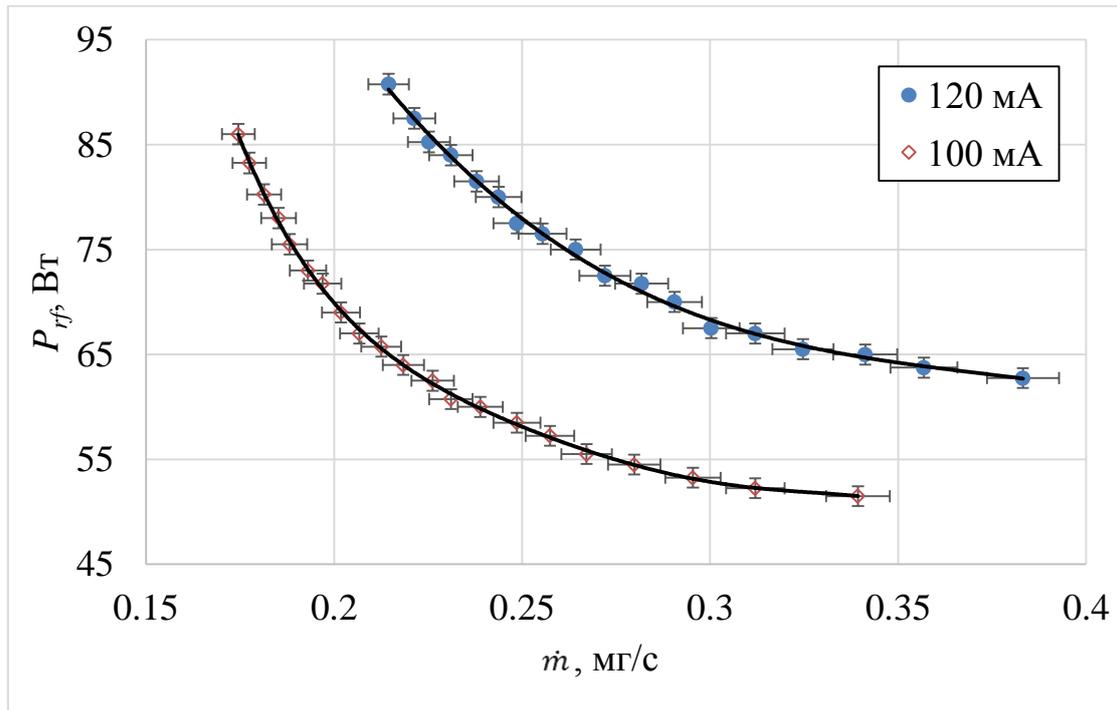


Рисунок 3 — Зависимости мощности ВЧГ от расхода ксенона для лабораторного ВЧИД ММ, работающего при  $I_i = 100; 120$  мА.

Основные параметры ВЧИД, определяющие его эффективность, — цена иона  $C_i$ , коэффициент использования рабочего тела  $\eta_{PT}$ , тяга  $F_t$ . Интегральные характеристики лабораторной модели ВЧИД ММ в двух наиболее устойчивых режимах работы представлены в таблице 1. Они соответствуют параметрам опытного образца разрабатываемого в МАИ двигателя ВЧИД-8.

Таблица 1 — Параметры лабораторной модели ВЧИД ММ при  $I_i = 100; 120$  мА.

№	$I_i$ , мА	$U_+$ , В	$U_-$ , В	$\dot{m}$ , мг/с	$P_{rf,pl}$ , Вт	$C_i$ , Вт/А	$\eta_{PT}$	$F_t$ , мН
1	100	2000	-200	0,22...0,25	62...54	470...515	0,54...0,62	7,2
2	120	2000	-200	0,25...0,29	56...65	490...545	0,56...0,65	8,6

В разделе, посвященном разработке методики зондовой диагностики локальных параметров плазмы индукционного разряда лабораторной модели ВЧИД ММ, рассмотрены теоретические основы зондового метода диагностики. Показано, что классическая методика, базирующаяся на измерении электронного тока насыщения зонда, применима к плазме низкого давления, характерной для ВЧИД ( $p_a = 10...30$  Па). Однако, по сравнению с плазмой разряда постоянного тока, анализ

характеристики одиночного зонда в условиях ВЧ плазмы усложняется тем, что колебания потенциала плазмы приводят к её искажению, показанному на рисунке 4.

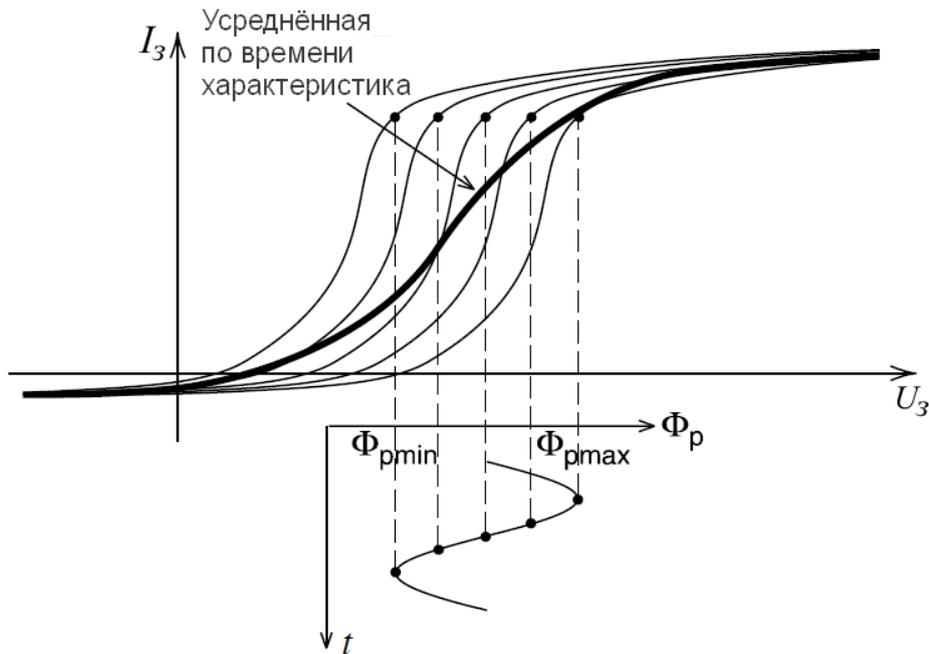


Рисунок 4 — Зондовая характеристика в индукционном ВЧ разряде<sup>1</sup>.

По мере того как потенциал плазмы  $\Phi_p$  колеблется, изгиб кривой будет перемещаться во времени, а поскольку изменение напряжения зонда требует более длительного периода времени, чем период одного ВЧ колебания, регистрируемая приборами усредненная по времени зондовая характеристика будет отличаться от действительной (мгновенной). Это способствует смещению к более низким значениям при определении плавающего потенциала и к завышенной оценке температуры электронов, которую получают из наклона характеристики. Эта особенность индукционного разряда приводит к необходимости компенсации эффектов, искажающих зондовую характеристику, для получения достоверных сведений о параметрах плазмы при проведении исследований в ВЧИД.

Рассмотрены две основные группы методов компенсации указанных ВЧ помех: активные и пассивные. Методы *активной компенсации* предусматривают подключение зонда к дополнительному ВЧ источнику смещения напряжения, а иногда напрямую к основному ВЧГ двигателя. В результате обеспечивается изменение амплитуды и фазы сигнала для достижения максимального значения

<sup>1</sup> Liberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Material Processing. Second Edition. WILEY-INTERSCIENCE, inc., 2005. 794 pp.

плавающего потенциала и минимального значения температуры электронов. Недостатком этой группы методов является существенное усложнение схемы подключения зондовой цепи. Так, в случае работы двигателя в режиме ускорения ионов, потенциал эмиссионного электрода достигает 2000 В, что потребует использования дополнительного источника переменного смещения, гальванически развязанного от схемы питания ВЧИД, но вместе с тем синхронизированного по времени с сигналом ВЧГ.

Методы *пассивной компенсации* подразумевают использование каскадов узкополосных заграждающих фильтров в зондовой цепи, настроенных на основную частоту разряда и её гармоники, или использование дроссельной катушки вблизи коллектора зонда, которая обеспечивает большое сопротивление переменной ВЧ составляющей тока в зондовой цепи. Недостатком этой группы методов является существенное искажение зондовой характеристики, обусловленное уменьшением измеренного тока заряженных частиц на зонд. Использование подобных фильтрующих систем ведёт к необходимости дополнительной математической обработки полученных данных, поскольку часть «полезного» сигнала «вырезается» фильтрами. Поскольку в эксперименте использовался ВЧГ с механизмом фазовой автоподстройки частоты, применение методов пассивной компенсации оказалось осложнено его работой. Так изменение частоты в ходе измерений вынуждает подбирать узкополосные заграждающие фильтры с большей шириной вырезания; а это ещё больше усиливает искажения «полезного» сигнала зонда.

Вышесказанное потребовало разработки иной методики зондовой диагностики для ВЧ разряда. В исследованиях<sup>1 2 3 4</sup> было показано, что достоверную оценку температуры электронов можно получить с помощью частично компенсированных зондов (когда узкополосные заграждающие фильтры формируют сигнал зонда, не точно соответствующий ВЧ колебаниям в плазме) или же с помощью полностью некомпенсированных зондов в случае использования многоэлектродных зондов

---

<sup>1</sup> Collingwood C. Investigation of a Miniature Differential Ion Thruster: thesis ... D.Phil. Southampton. 2011. 228 pp.

<sup>2</sup> Oksuz L., Soberon F., Ellingboe A.R. Analysis of uncompensated Langmuir probe characteristics in radiofrequency discharges revisited // J. Appl. Phys, Vol. 99, 2006. pp. 1-5.

<sup>3</sup> Annaratone B.M., Counsell G.F., Kawano H., Allen J.E. On the use of double probes in RF discharges // Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 1, May 1992. pp. 232-241.

<sup>4</sup> Naz M.Y., Ghaffar A., Rehman N.U., Naseer S., Zakauallah M. Double and Triple Langmuir Probes Measurements in Inductively Coupled Nitrogen Plasma // Progress In Electromagnetics Research, No. 114, 2011. pp. 113-128.

(симметричного двойного зонда Ленгмюра и симметричного электростатического тройного зонда). При этом использование многоэлектродных зондов позволяет изменить соотношения, необходимые для анализа зондового сигнала, и в случае применения тройного электростатического зонда это существенно упрощает регистрацию и обработку зондового сигнала.

В данной работе для исследования индукционного разряда лабораторной модели ВЧИД ММ была реализована методика диагностики локальных параметров плазмы с помощью тройного электростатического зонда без дополнительных средств компенсации ВЧ помех. Устройства регистрации сигнала подключались к компьютеру, который обеспечивал автоматический сбор и обработку данных. Распределение потенциалов и схема подключения зонда приведены на рисунке 5.

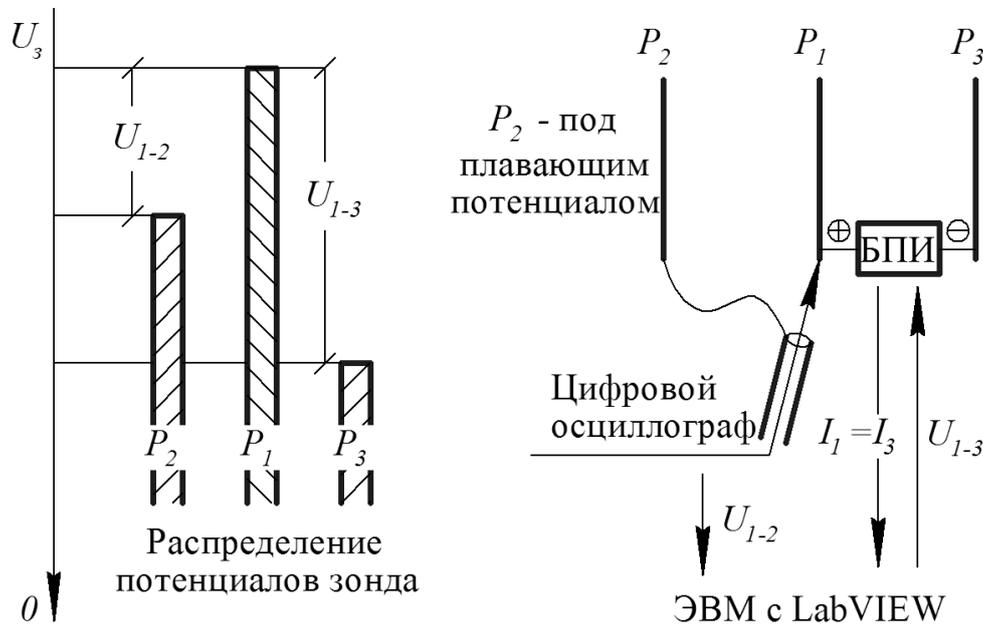


Рисунок 5 — Распределение потенциалов в тройном электростатическом зонде и схема подключения зонда к измерительному оборудованию.

Основные преимущества использования тройного электростатического зонда перед другими контактными методами исследования плазмы:

- все потенциалы зондовой системы остаются вблизи плавающего потенциала, таким образом, большие токи, выпадающие из плазмы, не могут повредить зонд и относительно слабо возмущают окружающее зонд плазменное образование;
- отсутствие монотонно изменяющегося напряжения на коллекторах зонда позволяет сделать практически мгновенные измерения ( $1 \dots 10$  мкс);
- коллекторы одинаковой геометрии разведены на несколько дебаевских длин  $\lambda_D$ , так что слои объёмного заряда, окружающие каждый из коллекторов зонда, не

взаимодействуют друг с другом; при этом коллекторы достаточно близки, чтобы в зондовой системе не было больших градиентов локальных параметров плазмы;

- тройной электростатический зонд обладает малой чувствительностью к колебаниям плазмы, так как все коллекторы испытывают одновременные возмущения.

Допущения, принятые при разработке методики измерений:

- в невозмущённой плазме сохраняется квазинейтральность  $n_e = n_i$  до границы плазмы со слоем объёмного заряда вокруг зонда;
- ФРЭЭ в невозмущённой плазме подчиняется распределению Максвелла;
- измерения проводятся в условиях бесстолкновительного и тонкого слоя объёмного заряда, так что область сбора заряженных частиц коллектором принимается равной площади поверхности коллектора зонда;
- отдельные коллекторы зонда разделены расстоянием больше толщины слоя объёмного заряда  $h$ , так что слои не перекрывают друг друга ( $\delta_3 > h \approx \lambda_D$ ).

Приведен расчёт геометрических параметров зонда, с учётом необходимости минимизирования искажающих плазменное образование факторов и позволяющий реализовать основное условие применимости зондового метода диагностики. Протяженность возмущённой области коллектора зонда сопоставима с радиусом Дебая  $h \approx \lambda_D = 2 \cdot 10^{-5}$  м. При этом зоны собирания отдельных коллекторов зонда, разделённые расстоянием 0,4 мм, не накладываются друг на друга.

Рабочий участок тройного электростатического зонда представляет собой (см. рис. 6) три идентичных коллектора из вольфрам-рениевого сплава ( $d_3 = 0,2$  мм;  $l_3 = 10$  мм), расположенных на расстоянии  $\delta_3 = 0,4$  мм друг от друга. Коллекторы закрепляются в диэлектрической трубке ( $d_T = 1,2$  мм;  $l_T = 80$  мм), изготовленной из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , и фиксируются в трубке цементом на основе алунда.

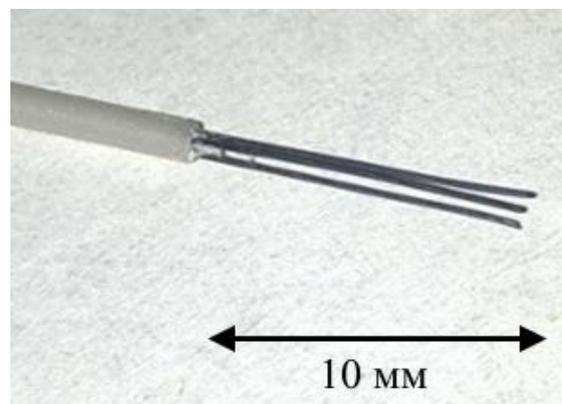
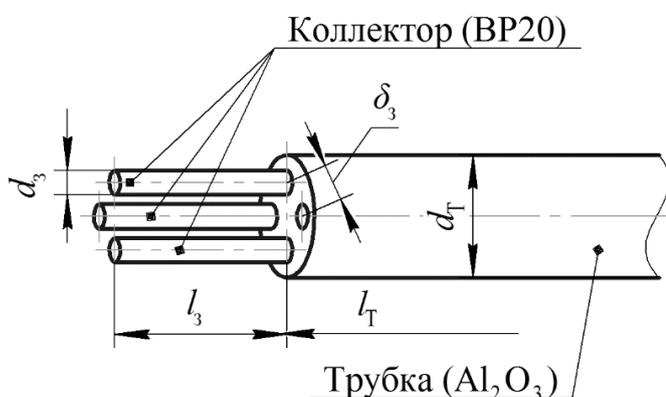


Рисунок 6 — Схема рабочего участка тройного электростатического зонда и фотография собранного зонда.

Регистрация параметров проводится относительно зонда  $P_2$  (см. рис. 5), находящегося под плавающим потенциалом  $\varphi_f$ . Блок питания и измерения (БПИ) обеспечивает установку постоянной разности потенциалов, смещающей зонды  $P_1$  и  $P_3$  относительно  $\varphi_f$ ; при этом БПИ измеряет протекающий через себя ток  $I = I_1 = I_3$ . Напряжение на положительно смещённом зонде  $P_1$  измеряется цифровым осциллографом. Данная система управляется программным пакетом, написанным на языке программирования LabVIEW и обеспечивающим синхронные измерения  $U_{1-2}$  и  $I$ . Одновременное измерение тока  $I = I_1 = I_3$  и напряжений в зондовой системе  $U_{1-2}$  и  $U_{1-3}$ , по существу, обеспечивает измерение трёх точек на зондовой характеристике: точки плавающего потенциала  $\varphi_f$  (является опорной точкой системы) и двух точек токов насыщения.

В рассматриваемой зондовой системе с тремя коллекторами соотношения для определения температуры  $T_e$  и концентрации электронов  $n_e$  запишутся следующим образом:

$$\frac{1 - \exp\left(\frac{-eU_{1-2}}{kT_e}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-eU_{1-3}}{kT_e}\right)} = \frac{1}{2}, \quad (2)$$

$$n_e = \sqrt{\frac{m_{ix}e}{kT_e}} \cdot \frac{I_3 \cdot \exp\left(\frac{1}{2}\right)}{e \cdot S \cdot \left(\exp\left(\frac{eU_{1-2}}{kT_e}\right) - 1\right)}. \quad (3)$$

где  $S$  — площадь поверхности коллектора;  $k$  — постоянная Больцмана.

В работе <sup>1</sup> было показано, что применение данных соотношений может приводить к ошибкам измерения локальных параметров, связанным с увеличением эффективной площади собирания коллектора зонда. Анализ условий эксперимента показал, что это обусловлено тем, что при росте потенциала, приложенного к коллектору, происходит увеличение толщины слоя объёмного заряда зонда. Для плазменных образований ВЧИД, характеризующихся низкой плотностью и температурой электронов  $T_e < 6$  эВ, отклонение оценки величины температуры не превысит 6%, а завышение величины концентрации электронов не превзойдёт 15%. Данный уровень погрешностей можно гарантированно обеспечить в ходе сравнительных измерений, при которых соблюдается единство физических условий эксперимента. При этом исследования проводятся с участием одного и того же

<sup>1</sup>Chen S.L., Sekiguchi T. Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe // J. Appl. Phys., Vol. 36, No. 8, August 1965. pp. 2363-2375.

оборудования, а результаты измерений обрабатываются едиными методами. Достоверность полученных в ходе экспериментов данных в целом была подтверждена повторяемостью собранных параметров. Так для трех случайно выбранных позиций зонда был проведён повторный эксперимент для каждого из режимов работы лабораторной модели ВЧИД ММ. Максимальное расхождение измерений температуры и концентрации электронов не превысило относительную погрешность измерений и составило ~15%.

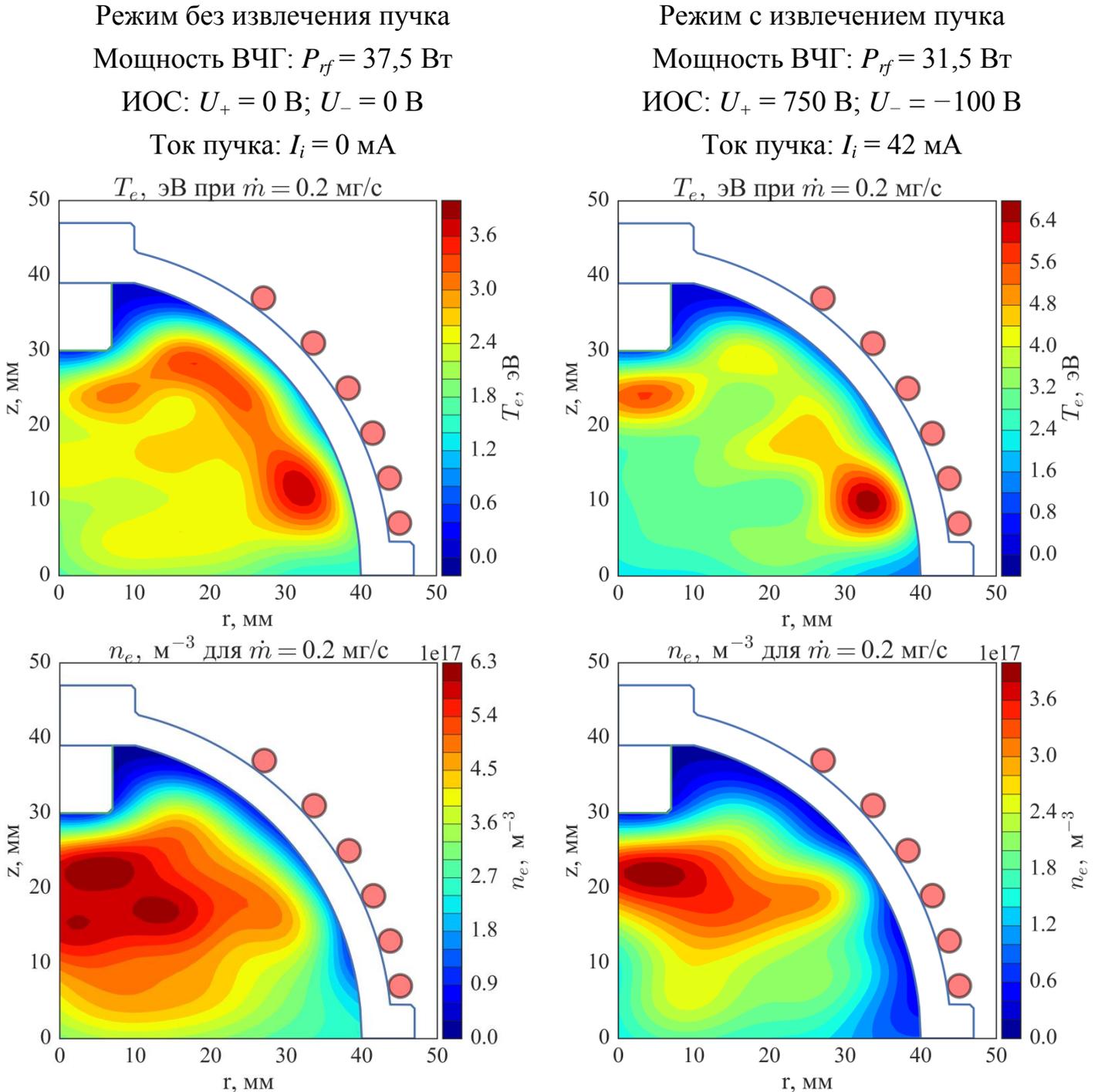
Для расчётов локальных параметров плазмы и построения их двумерных распределений была создана специальная программа обработки и визуализации данных, написанная на языке программирования Python. В таблице 2 представлены интегральные параметры режимов работы двигателя, для которых проводились измерения. Исследуемые режимы отличны от режимов, рассмотренных в табл. 1, поскольку наличие гальванической развязки в системе питания зондов ограничивает напряжение на эмиссионном электроде ИОС на уровне  $\leq 800$  В. Распределения локальных параметров плазмы в РК двигателя для всех изученных режимов качественно сопоставимы. Для примера на рисунке 7 приводится результат обработки данных для одного из режимов работы лабораторной модели ВЧИД ММ.

Таблица 2 — Режимы работы лабораторной модели ВЧИД ММ в ходе измерения локальных параметров плазмы.

$\dot{m}$ , мг/с	$P_{rf}$ , Вт (без ускорения пучка ионов)	$P_{rf}$ , Вт (с ускорением пучка ионов)	$I_i$ , мА	$C_i$ , Вт/А (с ускорением пучка ионов)	$\eta_{PT}$	$F_i$ , мН
0,16	36	28	35	800	0,30	1,5
0,18	36	29	39	744	0,29	1,7
0,20	37,5	31,5	42	750	0,29	1,8
0,22	37,5	33,5	45	744	0,28	2,0
0,24	40	35	48	729	0,27	2,1

Анализируя полученные распределения (см. рис. 7), можно увидеть, что температура электронов имеет максимум в пристеночной области (напротив трех витков, близких к срезу РК), что свидетельствует о том, что передача энергии от электромагнитного поля индуктора в плазму в этой области осуществляется наиболее эффективно. В этой области азимутальная компонента электромагнитного поля  $E_\theta$  индуктора максимальна по сравнению с осевой областью двигателя. При полученных параметрах плазмы можно говорить о существовании аномального скин-слоя в пристеночной области. Электроны набирают в нём энергию, достаточную для

осуществления ионизации рабочего тела во всём объёме РК двигателя. Таким образом, реализуется механизм нелокальной диссипации энергии электронов в индукционном разряде лабораторной модели ВЧИД ММ.



При переходе от режима стационарного горения индукционного разряда в РК без извлечения ионного пучка к режиму с извлечением ионного пучка происходит перестройка рабочего процесса двигателя — концентрация электронов снижается в 2 раза, а их температура возрастает в 2 раза. Это приводит к увеличению области скин-слоя и к снижению потребляемой ВЧГ мощности. Так для диапазона исследуемых расходов рабочего тела это снижение составляло до 4...8 Вт.

Данный эффект надо рассматривать как взаимосвязанный комплекс процессов. Можно предложить следующую гипотезу. Потоки заряженных частиц, выпадающих на стенку, изменяются пропорционально энергетическим потерям в разряде:

$$\Gamma_{iw} \sim \frac{kT_e}{2e} + \Phi_p, \quad (4)$$

$$\Gamma_{ew} \sim \frac{2kT_e}{e} + \Phi_p. \quad (5)$$

Извлечение ионов из плазмы приводит, при сохранении квазинейтральности плазмы, к снижению концентрации электронов. При этом в увеличенном в размерах скин-слое меньшее количество электронов поглощает прежнее количество энергии, и их температура должна расти. Энергия электронов расходуется на ионизацию и, вследствие увеличения размеров скин-слоя, должны увеличиваться потоки заряженных частиц на стенки. Как следствие должна расти потребляемая ВЧ мощность, но мы видим обратный эффект. Объяснением этого может служить то, что большую часть энергии электроны тратят на ионизацию вне скин-слоя и образовавшиеся ионы не гибнут на стенках РК, а диффундируют к ИОС. С учетом условий (4) и (5), потоки заряженных частиц, диффундирующих к ИОС, зависят от потенциала плазмы. Данная диффузия возможна при наличии в плазме РК градиента потенциала. Однако конструкция лабораторной модели не предполагала проведение измерений ближе 7 мм от ИОС, что, в свою очередь, не даёт возможности достоверно судить о распределении потенциала плазмы вблизи эмиссионного электрода ИОС и подтвердить высказанную гипотезу. Но в целом снижение мощности (см. табл. 2), полученное в эксперименте, свидетельствует о том, что режим без извлечения пучка является менее эффективным, поскольку больше энергии тратится на ионизацию рабочего тела и гибель ионов на стенках камеры.

**В третьей главе диссертации** произведено сравнение экспериментальных данных с данными других исследователей. Качественное совпадение распределений, полученных в диссертационной работе, с экспериментальными данными других

авторов; а также их близкие количественные значения, позволяют рекомендовать методику измерения локальных параметров плазмы тройным электростатическим зондом для исследования индукционных разрядов.

Приведено описание разработанной инженерной модели рабочего процесса ВЧИД ММ для расчёта концентрации заряженных частиц. Инженерная модель позволяет оперативно оценивать основные параметры двигателя и отсеивать заведомо неудачные компоновочные решения его РК и индуктора.

Поскольку многие исходные данные (например, сечения столкновения частиц) определены с погрешностью в 10% и более, нет смысла в повышении точности инженерной модели сверх этого предела. При построении модели принимались следующие допущения:

- ФРЭЭ подчиняется распределению Максвелла, для начала расчёта требуются первичные средние значения температуры  $T_e$  и концентрации электронов  $n_e$ .
- В расчётной области, включающей плазменное образование, соблюдается условие квазинейтральности  $n_e = n_i$ .
- Поведение электронов и ионов рассматривается в жидкостном макроскопическом приближении.
- Плотность нейтральных частиц  $n_a$  считается равномерной по всей расчётной области с плазмой и определяется из заданного давления в РК и температуры стенки.
- Индуктор задаётся как отдельные осесимметричные витки, соединённые последовательно.
- Разряд рассматривается как полностью индукционный, то есть не учитывается ёмкостная составляющая, существующая благодаря межвитковым «паразитным» ёмкостям.
- В модели нет возможности полноценного расчёта скин-слоя, распределение температуры электронов в плазменном образовании эквивалентно  $T_e \sim A$ , где  $A$  — векторный потенциал электромагнитного поля, Вб/м.
- Процессы рекомбинации и релаксации, происходящие в пристеночном слое, не рассматриваются.

Методика реализована с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics.

Приведены результаты расчёта для массового расхода ( $\dot{m} = 0,16 \dots 0,24$  мг/с (шаг 0,02 мг/с)). Данные численного моделирования сравнивались с экспериментом. На

рисунке 8 приведены результаты расчёта параметров плазмы в РК лабораторной модели ВЧИД ММ при массовом расходе ксенона  $\dot{m} = 0,2$  мг/с.

Результаты расчёта качественно повторяют распределения, полученные в ходе эксперимента (см. рис. 7), количественные расхождения с данными экспериментов не превышают 20%. Модель можно рекомендовать для обоснования допустимости изменений в конструкции при проектировании ВЧИД. Так, поскольку плотность тока ионного пучка по выражению (1) пропорциональна концентрации и температуре электронов,

предварительный расчёт позволит оценить и снизить градиенты изменения локальных параметров плазмы, обеспечив в результате равномерное выпадение ионов на электрод ИОС. Это способствует стабильности тяговых характеристик, так как будет обеспечиваться деформация электрода, не приводящая к увеличению угла расходимости пучка или к короткому замыканию межэлектродного промежутка<sup>1</sup>. А равномерные потоки заряженных частиц обеспечивают одинаковое распыление электродов ИОС в окрестностях каждой апертуры, что продлевает ресурс двигателя в целом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении поставленных в диссертации задач были достигнуты следующие результаты:

1. Разработана лабораторная модель ВЧИД ММ, приспособленная для зондовой диагностики локальных параметров плазмы в разрядной камере двигателя.

<sup>1</sup> Могулкин А.И. Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей: дис. канд. тех. наук: 05.07.05. / Могулкин Андрей Игоревич. – М., 2015.– 161 с.

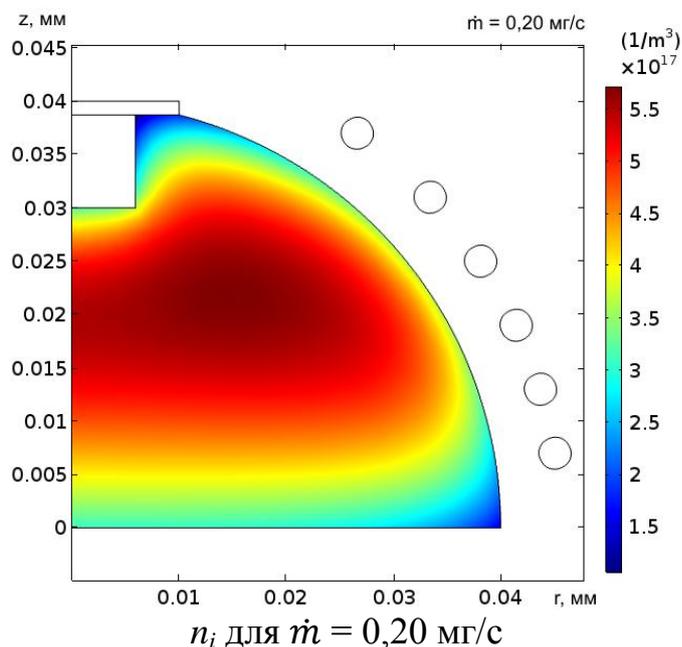


Рисунок 8 — Результаты расчёта распределения концентрации заряженных частиц в лабораторной модели ВЧИД ММ (при  $f_{rf} = 1,5$  МГц,  $I_{rf} = 5$  А).

Лабораторная модель при токе ионного пучка 120 мА и ВЧ мощности 65 Вт обеспечивает следующие тяговые характеристики: тяга двигателя — 8,6 мН, цена иона — 490 Вт/А и коэффициент использования рабочего тела — 0,65, которые соответствуют параметрам летных образцов ВЧИД.

2. Разработана методика автоматизированных измерений локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД ММ. Применение в методике тройного электростатического зонда позволило изучить распределения локальных параметров плазмы — температуры и концентрации электронов — в плазме РК на разных режимах работы двигателя. Обоснована достоверность и произведена верификация результатов измерений — погрешность определения значений локальных параметров плазмы, как и для аналогичных плазменных образований, исследованных другими авторами, составляет не более 30 %.

3. Экспериментальные результаты позволили впервые получить двумерные распределения локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД ММ при извлечении ионного пучка из ИОС двигателя. Сравнение с режимом без извлечения пучка показало, что происходит увеличение толщины аномального скин-слоя. Это повышает эффективность ввода энергии в разряд, о чем свидетельствует снижение потребляемой ВЧ мощности на 4...8 Вт.

4. Разработана инженерная модель для расчёта двумерных распределений концентрации заряженных частиц в индукционном ВЧ разряде, которая может быть рекомендована для оценки параметров индукционного разряда в ВЧИД.

5. Сравнение расчётных двумерных распределений параметров плазмы с экспериментальными данными свидетельствует об их качественном совпадении, количественное расхождение не превышает 20%.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В изданиях из рекомендованного ВАК при Министерстве образования и науки РФ перечня рецензируемых научных изданий:**

1. Кожевников В.В., Смирнов А.А., Смирнов П.Е., Черный И.А. Автоматизированная система диагностики параметров выходного пучка радиочастотного ионного двигателя // Труды МАИ — 2014. — № 75. — 24 с. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49699>.
2. Кожевников В.В., Хартов С.А. Исследование многоэлектродными зондами локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2016. — № 2. — С. 26-33.

3. Антропов Н.Н., Ахметжанов Р.В., Кожевников В.В. и др. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2016. — № 2. — С. 4-14.
4. Кожевников В.В., Хартов С.А. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2017. — № 3. — С. 13-20.
5. Кожевников В.В., Смирнов П.Е., Суворов М.О., Хартов С.А. Разработка высокочастотного ионного двигателя, работающего на атмосферных газах // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2017. — № 3. — С. 5-12.
6. Канев С.В., Кожевников В.В., Хартов С.А. Физико-математическая модель процессов в ионизационной камере электроракетного двигателя, использующего атмосферные газы в качестве рабочего тела // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2017. — № 3. — С. 21-30.

**В рецензируемых иностранных изданиях, входящих в международные реферативные базы (Scopus):**

7. Antropov N.N., Akhmetzhanov R.V., Kozhevnikov V.V., et.al. *Experimental research of radio-frequency ion thruster* (Conference Paper) // Proceedings of the International Astronautical Congress; Guadalajara; Mexico; 26 September 2016 through 30 September 2016; Code 126413. — ISSN: 00741795 Publisher: International Astronautical Federation, IAF
8. Antropov N.N., Akhmetzhanov R.V., Kozhevnikov V.V., et.al. *Experimental research of radio-frequency ion thruster* // Thermal Engineering, Volume 63, Issue 13, 1 December 2016, pp. 957-963. ISSN: 00406015. DOI: 10.1134/S0040601516130036
9. Kozhevnikov V., Khartov S., Suvorov M., Cherniy I. *Plasma Local Parameters Measuring in the Low Power Radio-frequency Ion Thruster's Discharge Chamber* // Procedia Engineering, Volume 185, 2017, pp. 432-437.

**Патент на полезную модель:**

10. Гаврюшин В.М., Кожевников В.В., Нигматзянов В.В. и др. Патент на полезную модель — №158759 РФ. Ионно-плазменный двигатель, Заявитель: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — № 2014142905, Заяв. 24.10.2014, Опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

**Другие публикации:**

11. Вебер А.В., Кожевников В.В., Хартов С.А., Черный И.А. Разработка комплекса для диагностики плазмы в разряде и струе радиочастотного ионного двигателя // Сб. тез. докл. 11-ой Международной конф. «Авиация и космонавтика – 2012», 13-15 ноября 2012, Москва. — М.: МАИ, 2012. С. 198-199.
12. Кожевников В.В., Хартов С.А., Черный И.А. Комплекс диагностики плазмы радиочастотного ионного двигателя // Сб. тез. докл. XXXVII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и др., 29 января – 1 февраля 2013, Москва. — М.: Комиссия РАН, 2012. С. 110-111.

13. Кожевников В.В., Смирнов А.А., Смирнов П.Е., Хартов С.А., Черный И.А. Автоматизированная система диагностики параметров выходного пучка радиочастотного ионного двигателя // Сб. тез. докл. 12-ой Международной конф. «Авиация и космонавтика — 2013», 12-15 ноября 2013, Москва. — М.: МАИ, 2013. С. 317-319.
14. Кожевников В.В., Смирнов А.А., Смирнов П.Е., Хартов С.А., Черный И.А. Аппаратно-программный комплекс диагностики параметров струи ионного двигателя // Сб. тез. докл. XXXVIII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и др., 28-31 января 2014, Москва. — М.: Комиссия РАН, 2014. С. 82-83.
15. Гончаров Л.А., Кожевников В.В., Смирнов А.А., Смирнов П.Е., Хартов С.А. Опыт создания тягоизмерительных устройств // Сб. тез. докл. 13-ой Международной конф. «Авиация и космонавтика — 2014», 17-21 ноября 2014, Москва. — М.: МАИ, 2014. С. 279-280.
16. Кожевников В.В., Хартов С.А., Черный И.А. Измерения локальных параметров плазмы в газоразрядной камере высокочастотного двигателя малой мощности // Сб. тез. докл. 14-ой Международной конф. «Авиация и космонавтика — 2015», 16-20 ноября 2015, Москва. — М.: МАИ, 2015. С. 115-117.
17. Каширин Д.А., Кожевников В.В., Ахметжанов Р.В. и др. Разработка и экспериментальная отработка высокочастотного ионного двигателя малой мощности // Сб. тез. докл. 14-ой Международной конф. «Авиация и космонавтика — 2015», 16-20 ноября 2015, Москва. — М.: МАИ, 2015. С. 112-113.
18. Кожевников В.В., Хартов С.А., Черный И.А. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности // Сб. тез. докл. XL академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и др., 26-29 января 2016, Москва. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 74-75.
19. Каширин Д.А., Кожевников В.В., Ахметжанов Р.В., Богатый А.В. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя // Сб. тез. докл. XL академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и др., 26-29 января 2016, Москва. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 73.
20. Кожевников В.В., Хартов С.А., Черный И.А. Исследование локальных параметров плазмы высокочастотного ионного двигателя малой мощности // Сб. тез. докл. (том 3) XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2016», г. Москва, 12-15 апреля 2016. С. 712-713.
21. Кожевников В.В., Хартов С.А. Распределения температуры и концентрации электронов плазмы в газоразрядной камере высокочастотного двигателя малой мощности // Сб. тез. докл. 15-ой Международной конф. «Авиация и космонавтика — 2016», 14-18 ноября 2016, Москва. — М.: МАИ, 2016. С. 291-292.
22. Кожевников В.В., Хартов С.А. Распределения локальных параметров плазмы в газоразрядной камере высокочастотного двигателя // Сб. тез. докл. XLI академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и др., 24-27 января 2017, Москва. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 73.