

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
старший научный сотрудник, кандидат технических наук
Рябый Валентин Анатольевич

Москва – 2016

Оглавление

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| 1. Теоретические основы..... | 15 |
| 1.1 Анализ требований к разработке ВЧИИП на основе ВЧИД..... | 15 |
| 1.2 Пути повышения эффективности генерации плазмы в ВЧИ-разряде..... | 19 |
| 1.2.1 Выбор оптимальной формы индуктора..... | 19 |
| 1.2.2 Применение плоских индукторов в ВЧИИП..... | 25 |
| 1.2.3 Применение индукторов с ферритовым сердечником..... | 28 |
| 1.2.4 Применение плоских индукторов с ферритовым сердечником для решения задач увода ОКМ с ГСО..... | 41 |
| 1.3 Обзор физико-математических моделей ВЧИ-разряда..... | 43 |
| 1.3.1 Выводы из трансформаторной модели..... | 49 |
| 1.4 Выводы раздела 1..... | 50 |
| 2. Разработка лабораторной модели ВЧИИП и установки для его испытаний и отработки..... | 51 |
| 2.1 Проведение подготовительных работ для диагностики источника..... | 58 |
| 2.2 Отработка системы поджига разряда..... | 59 |
| 2.3 Разработка СУ..... | 61 |
| 2.4 Выводы раздела 2..... | 63 |
| 3. Решение методологических вопросов интегральной диагностики ВЧИ-устройств и диагностики локальных параметров генерируемой в них плазмы..... | 64 |
| 3.1 Методика оценки интегральных и технических характеристик газоразрядного узла ВЧИИП..... | 64 |
| 3.1.1 Предварительное измерение параметров индуктора..... | 66 |
| 3.1.2 Измерение тока индуктора без разряда..... | 67 |
| 3.1.3 Измерение тока индуктора при горении ВЧИ-разряда..... | 71 |
| 3.1.4 Реализация предложенной методики | 72 |
| 3.2 Особенности организации измерений локальных параметров плазмы посредством зондов Ленгмюра..... | 73 |
| 3.2.1 Проведение зондовых измерений параметров плазмы..... | 74 |
| 3.2.1.1 Использование автоматизированной зондовой станции VGPS-12..... | 74 |
| 3.2.1.2 Конструкция классических цилиндрических зондов Ленгмюра..... | 77 |
| 3.2.2 Расширение возможностей зондовой диагностики..... | 79 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.2.2.1 | Зондовый метод измерения толщины зондового слоя и массы ионов | 80 |
| 3.2.2.2 | Имитатор плоского пристеночного зонда, его конструкция и область применения..... | 88 |
| 3.3 | Выводы раздела 3..... | 90 |
| 4. | Исследование газоразрядного узла лабораторной модели ВЧИИП-10Ф..... | 91 |
| 4.1 | Интегральная диагностика газоразрядного узла ВЧИИП-10Ф..... | 91 |
| 4.1.1 | Предварительные измерения параметров индуктора..... | 91 |
| 4.1.2 | Измерение тока индуктора без разряда..... | 94 |
| 4.1.3 | Измерение тока индуктора при горении ВЧИ-разряда..... | 95 |
| 4.2 | Результаты диагностики локальных параметров плазмы ВЧИ-разряда при рабочем давлении..... | 100 |
| 4.2.1 | Измерения локальных параметров плазмы радиально подвижными прямыми цилиндрическими зондами Ленгмюра..... | 100 |
| 4.2.2 | Измерения локальных параметров плазмы продольно подвижным, вращательным Г-образным цилиндрическим зондом..... | 105 |
| 4.2.3 | Анализ корректности зондовых измерений..... | 108 |
| 4.2.3.1 | Влияние магнитного поля индуктора на результаты локальных измерений параметров плазмы..... | 108 |
| 4.2.3.2 | Влияние рекомбинации заряженных частиц на первом зондодержателе.. | 108 |
| 4.2.4 | Оценка плотности ионного тока на ЭЭ ИОС имитатором плоского пристеночного зонда | 114 |
| 4.3 | Выводы раздела 4..... | 121 |
| 5. | Исследование параметров ионного пучка ВЧИИП-10Ф..... | 123 |
| 5.1 | Расчет и проектирование ИОС..... | 123 |
| 5.1.1 | Конструктивные элементы и геометрические параметры ИОС..... | 123 |
| 5.1.2 | Поиск решений по нахождению минимального угла расходимости ионного пучка..... | 127 |
| 5.1.3 | Предварительный расчет ИОС..... | 128 |
| 5.1.4 | Создание электродов для ВЧИИП-10Ф..... | 140 |
| 5.2 | Результаты экспериментов с ионным пучком..... | 143 |
| 5.2.1 | Испытание ВЧИИП-10Ф в составе «большой установки»..... | 143 |
| 5.2.2 | Экспериментальная отработка характеристик лабораторной модели ВЧИИП-10Ф..... | 148 |
| 5.2.3 | Измерение полуугла расходимости пучка ионов..... | 149 |
| 5.3 | Выводы раздела 5..... | 153 |

| | |
|---|-----|
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 155 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... | 156 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 157 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

История развития электроракетных двигателей от идей до их воплощения и применения составляет уже более века исследования и разработок [1]. «Официальная» история современного ракетостроения и космонавтики берет начало в 1903 году, когда вышла в свет работа К.Э. Циолковского [2], в которой содержатся вывод уравнения Циолковского, фундаментальные математические уравнения космического движения. Восемь лет спустя, в 1911 году выходят публикации К.Э. Циолковского [3, 4], в которых описывается идея электроракетного движения.

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 маневрах по довыведению геостационарных КА в точку стояния [5], включая длительные переходы с геосинхронной на геостационарную орбиту (ГСО) [6, 7]. В последнее время появилась потребность использования ЭРДУ для довыведения геостационарных КА на ГСО, которая позволяет уменьшать стоимость выведения (за счет возможности использования ракеты-носителя (РН) меньшей грузоподъемности или за счет расширения возможности комплектования полезной нагрузки РН несколькими КА) или увеличивать доставляемую на ГСО массу КА. В последнее десятилетие были успешно выполнены исследовательские межпланетные полеты с использованием электроракетных двигателей (ЭРД) в качестве маршевых двигателей автоматических КА [8, 9, 10, 11].

Наиболее плодотворными при развитии ЭРД оказались концепции ионных двигателей (ИД) и стационарных плазменных двигателей (СПД). Концепция ИД была впервые выдвинута в 1917 году Робертом Годдардом [12], а в 1954 году более детально развита и проработана Эрнстом Штулингером [1].

Первый функционирующий ИД был создан в 1959 году в США в NASA (американское космическое агентство) John H. Glenn Research Center под руководством Гарольда Кауфмана [13]. В 1964 году прошла первая успешная демонстрация ионного двигателя в суборбитальном полёте (SERT I) [8]. Двигатель успешно работал в течение запланированной 31 минуты. В 1970 году прошло испытание, призванное продемонстрировать эффективность долговременной работы ИД в космосе (SERT II) [14].

В качестве основного (маршевого) двигателя ИД был впервые применён на КА Deep Space 1 – экспериментальном автоматическом КА, запущенном 24 октября 1998 года РН «Дельта-2» как часть программы NASA «Новое Тысячелетие» [15]. Вторым успешным применением ИД в качестве маршевых стало их использование на аппарате Hayabusa [8] японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA), предназначенном для изучения астероида Итокава. Аппарат был запущен 9 мая 2003 года японской РН М-5 и успешно доставил образцы грунта астероида на Землю [16].

Следующим аппаратом NASA, обладающим маршевыми ИД, стал Dawn – автоматическая межпланетная станция, которая стартовала 27 сентября 2007 года [9]. Этот аппарат был предназначен для изучения астероида Веста и карликовой планеты Цереры и был оснащен тремя двигателями NSTAR [17], успешно испытанными на Deep Space 1 [8].

В проекте GOCE Европейского Космического Агентства на низкоорбитальном КА установленный ИД использовался около четырех лет для поддержания орбиты высотой около 260 км [18], на которой сопротивление атмосферы Земли достаточно велико.

В Японии получили большое развитие работы по созданию СВЧ-ионных двигателей [19-21].

Успешные проекты Deep Space 1, Dawn, Hayabusa, GOCE открыли эру использования ИД на автоматических КА по исследованию дальнего космоса, а проект GOCE показал возможность применения ИД даже на сверхнизких орбитах.

В Российской Федерации основу технологии ЭРД составили СПД [22]. Основная область их применения – системы коррекции, служащие для поддержания параметров рабочей орбиты. В европейской миссии SMART-1 СПД PPS-1350 использовался в качестве маршевого двигателя в исследовательском полете к Луне. Успешная многолетняя эксплуатация СПД на множестве отечественных и зарубежных КА на различных орбитах показала надежность этой российской технологии, которая позволила в течение более 40 лет удовлетворять потребности страны в области двигателей, обладающих высоким удельным импульсом тяги.

Однако развитие солнечной энергетики, увеличение сроков активного существования (САС) КА и стремление улучшить массовую эффективность КА определили важность развития технологии ИД в России. В настоящее время в отечественной ракетно-космической промышленности начата разработка двух типов ИД: ИД с разрядом постоянного тока (ИДПТ) и высокочастотных ИД (ВЧИД). При этом ВЧИД обладают рядом потенциальных технологических и эксплуатационных преимуществ перед ИДПТ:

1) Ионизация рабочего тела осуществляется в ВЧ-разряде индукционного типа так, что внутри газоразрядной камеры (ГРК) отсутствует система электродов, главным элементом которой является катод – наиболее критический элемент конструкции, требующий длительной

отработки. Упрощается система электропитания, так как исключаются высокопотенциальные источники питания электродной системы в плазме ГРК, находящейся под высоким электрическим потенциалом.

2) Отсутствует необходимость в создании внешнего магнитного поля, что ведет к упрощению конструкции двигателя и системы его электропитания.

3) Нет необходимости высокой очистки ксенона, так как ВЧ-разряд не чувствителен к примесям кислорода и других химически активных газовых компонентов. Это свойство ВЧИД можно использовать на этапе наземной отработки, что ведет к снижению затрат на этапе комплексных испытаний, особенно в случае рециклинга ксенона.

4) ВЧ-принцип работы позволяет удобно управлять током пучка в силу линейной зависимости ВЧ-мощности и тока ионного пучка в большом диапазоне токов.

5) Количество двухзарядных ионов в ВЧ-разряде незначительно [23, 24]. Таким образом, выше эффективность ионизации, а также предотвращаются процессы эрозии электродов в ГРК, которые наблюдаются в двигателях, работающих на постоянном токе.

Степень разработанности избранной темы

Работы по разработке и исследованию ВЧИД различной размерности ведутся в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института с 2008 года. При разработке технологии ВЧИД требуется большой объем экспериментальных исследований. Необходимо не только адаптировать известные технические решения, апробированные в Европе, но и исследовать принципиально новые схемы и их возможности развития и применения. В этом отношении большой интерес для разработчиков ВЧИД представляет новая задача, заключающаяся в применении технологии ВЧИД при создании источника ионного пучка космического назначения, предназначенного для воздействия на крупногабаритные объекты космического мусора (КМ).

Для обеспечения безопасной эксплуатации КА в области ГСО согласно разработанным Комитетом по использованию космического пространства в мирных целях на 62-ой Генеральной Ассамблее Организации Объединенных Наций в ноябре 2007 года были приняты к сведению результаты обсуждений по проблеме КМ в Научно-Техническом Подкомитете (документ A/RES/62/217 от 01.02.08), который на своем 673-м заседании в 2007 году принял Руководящие принципы предупреждения образования КМ, разработанные на основе документа Межагентского координационного комитета по КМ (Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) (A/AC.105/890) [25]. Согласно этому документу КА после завершения их функционирования должны быть уведены из области ГСО, в нашей стране это закреплено государственным стандартом [26]. Увод отработавших КА как некооперируемых крупногабаритных объектов КМ (ОКМ) возможен с использованием сервисных КА (СКА).

Создание СКА, обеспечивающих многократное маневрирование в окрестностях ГСО для удаления за время своего САС достаточно большого числа ОКМ, является актуальной проблемой.

В последнее время предлагаются различные технические устройства, которые должны обеспечить увод элементов КМ на безопасные орбиты [27]. Среди них для решения задачи увода из окрестности ГСО ОКМ предлагается использовать СКА с ЭРДУ [27, 28]. При этом одним из эффективных методов воздействия на ОКМ рассматривается метод бесконтактного воздействия, основанный на передаче импульса уводимому ОКМ ионным пучком, инжектируемым с борта СКА («Ion Shepherd» [29]).

Требуемая характеристическая скорость для перелета из окрестности ГСО на орбиту захоронения определяется разностью высот орбиты захоронения и ГСО. Для перелета с малой трансверсальной тягой характеристическая скорость перелета определяется как разность круговых скоростей на начальной и конечной орбитах:

$$\Delta V_{\text{хар}} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{\text{ГСО}}}} - \sqrt{\frac{\mu}{r_{\text{ГСО}} - \Delta h}} \quad (1.1)$$

Для разности высот орбит $\Delta h = 100$ км, определяемой международными требованиями, расчет дает $\Delta V_{\text{хар}} = 10,88$ м/с. Легко получить, что, производя воздействие на достаточно крупный ОКМ (массой порядка единиц тонн) силой в пределах десятков миллиньютон, можно осуществить увод ОКМ из области ГСО за время в пределах десятков суток. Эти обстоятельства позволяют рассматривать метод удаления ОКМ путем воздействия на него ионным пучком весьма перспективным. Однако следует учесть, что к характеристикам ионного пучка, а также в целом к высокочастотному источнику ионного пучка (ВЧИИП) предполагается предъявление специфических требований.

Цель работы – разработка источника ионов на основе ВЧИД для задач увода некооперируемых ОКМ с ГСО.

Задачи исследования

- Анализ требований к разработке ВЧИИП на основе ВЧИД.
- Анализ путей повышения эффективности генерации плазмы в ВЧ-индукционном (ВЧИ) разряде.
- Обзор методов оценки интегральных и технических характеристик газоразрядного узла и диагностики локальных параметров плазмы в ГРК.
- Разработка установки для испытаний и отработки лабораторной модели ВЧИИП.
- Создание лабораторной модели ВЧИИП.
- Получение интегральных характеристик системы ввода ВЧ-мощности, сравнительный анализ с другими системами ввода ВЧ-мощности.

- Проведение диагностики локальных параметров плазмы в ГРК лабораторной модели ВЧИИП путем зондовых исследований пространственного распределения фундаментальных параметров плазмы.
- Моделирование ионно-оптической системы (ИОС) ВЧИИП и её практическая реализация.
- Сравнительный анализ экспериментальных данных по углам расходимости ионного пучка с расчётными значениями.

Научная новизна работы

На основе анализа литературы определена и реализована возможность повышения эффективности ввода ВЧ-энергии в ВЧИ-разряд и равномерности параметров плазмы перед эмиссионным электродом (ЭЭ) ИОС ВЧИИП космического применения с использованием плоского индуктора с ферритовым сердечником.

Разработан новый способ оценки интегральных и технических характеристик газоразрядного узла, позволяющий детализировать баланс ВЧ-мощности по устройству в целом, выявлять качество конструктивного решения и исполнения данного источника плазмы вместе со схмотехникой согласующего устройства путём уточнения потерь ВЧ-мощности на линии электропитания разряда.

Проанализирована методология и техника диагностики локальных параметров плазмы ВЧИ-разряда. Предложено расширение возможностей применения зондов Ленгмюра в невозмущенной плазме для получения сведений о природе плазмообразующего газа и толщине слоя объёмного заряда. Разработан способ уточнения коэффициента для ВЧ-плазмы в формуле Бома для ионного тока, получен эмпирический составной коэффициент для ВЧИ-ксеноновой плазмы, использованной в экспериментах с источником. Предложен способ количественной оценки соответствия экспериментальной плазмы функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) функции Максвелла. Предложен способ и устройство для оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС. Получен безразмерный коэффициент влияния соотношения измерительной поверхности зонда и прилегающей к нему поверхности зондодержателя, позволяющий снизить погрешность измерений зондами Ленгмюра.

Разработана ИОС с плоскими электродами щелевой геометрии отверстий, позволяющей сформировать клиновидный пучок с малыми углами расходимости в двух поперечных направлениях, что обеспечивает получение хорошо сколламированного пучка, исходя из требований к ВЧИИП. Расчетным путем определены зависимости угла расходимости от приведенного первеанса пучка и определены оптимальные значения приведенного первеанса, при которых полуугол расходимости поперек щелей не превышает 4 градусов. Разработана и апробирована методика определения расходимости клиновидного пучка по следам эрозии на

мишени. Экспериментально показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных по расходимости.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Разработана и проведена отработка конструкции лабораторного ВЧИИП с металлической ГРК, обеспечивающей простоту диагностики локальных параметров плазмы и возможность контроля давления, с плоским индуктором, снабженным ферритовым сердечником для повышения энергоэффективности ВЧИИП, и с плоскими электродами ИОС с отверстиями щелевой геометрии, имеющими оптимизированный профиль, улучшающий фокусировку ионного пучка.

Разработана и проверена на практике методика оценки интегральных и технических характеристик ВЧ-индукционного газоразрядного узла ВЧ-ионного двигателя, которая позволяет произвести оценку его операционных и конструктивных параметров, определяющих физико-технический облик изделия, включая степень совершенства его схемотехники и конструкции.

Проведены экспериментальные исследования ГРК по распределению локальных характеристик плазмы в ГРК в рабочем диапазоне изменения давления и ВЧ-мощности. Выявлена относительная равномерность параметров плазмы в ГРК. При этом показано влияние зондодержателя на результаты диагностики локальных параметров плазмы зондом Ленгмюра.

Получено расширение результативности зондовой методики, уточнен коэффициент в формуле Бома, позволяющий определить толщину слоя объёмного заряда и контролировать массу ионов в ВЧИ-разряде. Предложен способ оценки ионного тока на ЭЭ ИОС при помощи имитатора плоского пристеночного зонда.

Спроектирована и создана графитовая ИОС с плоскими электродами с отверстиями щелевой геометрии, позволяющая создавать клиновидный, хорошо сколлимированный пучок ионов.

Методология и методы диссертационного исследования

В диссертации применялись как теоретические, так и экспериментальные, а также теоретико-эмпирические методы проведения исследований. Была разработана методика определения интегральных характеристик ВЧИ-газоразрядного узла, метод определения плотности ионного тока с помощью имитатора плоского зонда, методом физико-математического моделирования были получены распределения ионного пучка, которые были затем верифицированы прямыми измерениями границ эрозии титанового листа. При помощи профилометра методом ступеньки была оценена эрозия стекла, прикрытого маской из стали.

Положения, выносимые на защиту:

-Пути совершенствования конструкции ВЧИИП выбором формы индуктора и схемотехнического решения линии электропитания ВЧИ-разряда.

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

-Метод интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла, выявляющего физико-технический облик изделия, включающий его энергоэффективность.

-Результаты диагностики локальных параметров плазмы в ГРК путем зондовых измерений пространственных распределений фундаментальных параметров плазмы.

-Безразмерный критерий, определяющий влияние зондодержателя на точность диагностики плазмы цилиндрическим зондом Ленгмюра.

-Экспериментальное уточнение коэффициента Бома для ксенонового ВЧИ-разряда мощностью до 200 Вт.

-Методика зондового измерения массы ионов и толщины слоя объёмного заряда на цилиндрическом зонде.

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

-Результаты моделирования геометрии ускорительных ячеек щелевых электродов ИОС и экспериментальное подтверждение их корректности.

-Использование щелевой ИОС, формирующей клиновидный ионный пучок малой расходимости, и экспериментальное подтверждение её эффективности.

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается корректным выбором методик измерений, аккуратностью их проведения, а также инженерной точностью исследования модели ВЧИИП-10Ф в части диагностики плазмы, выбора геометрии системы ионного ускорения в рамках оптимальной физико-математической модели, соответствие экспериментально полученных значений по расходимости пучка ионов расчетным значениям, непротиворечивость результатам других авторов при исследовании технических аналогов.

Реализация и внедрение результатов работы

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

Личный вклад соискателя

Все представленные в диссертационной работе оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

1. Анализ путей совершенствования конструкции ВЧИД по известным литературным данным.

2. Конструирование и создание стенда для испытания и отработки лабораторной модели ВЧИД с усовершенствованными параметрами энергоэффективности системы генерации плазмы в ГРК.
3. Обзор физико-математических моделей ВЧИ-разряда.
4. Разработка и практическая реализация нового способа интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла, выявляющего физико-технический облик изделия, включая его энергоэффективность.
5. Проведение диагностики локальных параметров плазмы в ГРК путем зондовых измерений пространственных распределений фундаментальных параметров плазмы.
6. Получение безразмерного критерия влияния зондодержателя на точность измерений.
7. Разработка способа контроля толщины призондового слоя и массы рабочего газа в ВЧИ-разряде при помощи зондов Ленгмюра.
8. Разработка способа и устройства для оценки плотности ионного тока на ЭЭ ИОС ВЧИД.
9. Проектирование и расчёт сечений плоских электродов ИОС.
10. Разработка экспериментального стенда для получения отпечатка ионного пучка и измерения полуугла его расходимости.
11. Оценка параметров ионного пучка, сопоставление полученных результатов с расчетами.

Аппробация результатов

Основные результаты работы докладывались на следующих 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)

Публикации

Основные научные результаты работы опубликованы в 21 печатной работе, в том числе в 4 статьях в российских рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в 1 статье в рецензируемом научном издании, не входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, а также в 5 статьях в иностранных рецензируемых изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Объем и структура работы

Работа представляет собой рукопись объемом 169 страниц печатного текста, включая 151 рисунок, 3 таблицы, а также список цитируемой литературы, содержащий 138 наименований. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка использованных источников.

Во **введении** обосновывается 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, проводится анализ требований к ВЧИИП, путей повышения энергоэффективности источников, выбор формы индуктора и возможностей применения феррита для будущего ВЧИИП, проводится обзор физико-математических моделей ВЧИ-разряда.

Во **втором разделе** описывается создание модели ВЧИИП-10Ф и его согласующего устройства, отработка системы поджига ВЧИ-разряда.

Третий раздел работы посвящен решению методологических вопросов диагностики газоразрядного узла ВЧИИП. Описан разработанный методологический подход оценки интегральных и технических характеристик газоразрядного узла ВЧИИП. Изложены вопросы организации локальных измерений параметров плазмы посредством зондов Ленгмюра.

В **четвертом разделе** диссертации изложены результаты интегральной диагностики газоразрядного узла ВЧИИП-10Ф, а также результаты диагностики локальных параметров создаваемой им плазмы. Получена высокая энергоэффективность генерации плазмы, а также высокая степень равномерности плазменных параметров внутри объема ГРК.

Пятый раздел диссертации касается вопросов инъекции ионного пучка, посвящен расчету и созданию ИОС, испытаниям и экспериментальному подтверждению расчетных характеристик по углу расходимости ионного пучка. В данном разделе подтверждается возможность использования подобной модели для задач увода ОКМ с ГСО Земли.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В конце диссертации приводится список сокращений и условных обозначений и список использованных источников.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1.1 Анализ требований к разработке ВЧИИП на основе ВЧИД

Диссертация посвящена созданию источника ионов космического применения, основанного на технологии ВЧИД и опирается на опыт создания (преимущественно зарубежный) ВЧИД и их летно-космических испытаний. ВЧИД, в основном, разрабатывались и исследовались в Германии. Научно-технические основы радиочастотных ИД (Radio-Frequency Ion Thruster – RIT) были заложены под руководством профессора Х. Лёба в Гиссенском университете [30]. Были созданы демонстрационные образцы двигателей в диапазоне мощности от нескольких ватт до 8 кВт [31]. Европейские ВЧИД имеют летную историю применения с 1993 года, когда двигатель диаметром 10 см – RIT-10 [32] – производства Daimler-Benz Aerospace (в настоящее время Astrium) был успешно испытан на КА «EURECA» – European Retrievable Carrier). В настоящее время разработан двигатель RIT-22 мощностью до 5 кВт [32].

Активные работы по ИД в СССР проводились с начала 60-х годов XX века. В начале 80-ых годов прошлого века работы в области ИД в России были практически лишены государственной поддержки и лишь в последние годы, исходя из насущных потребностей космической отрасли, возобновлены. Это создает хорошие основы для разработки ВЧИИП космического применения.

Создание ВЧИИП, обеспечивающей формирование пучка ионов высокой энергии, эффективно передающего импульс ОКМ с дистанции 40 метров и более, является новой проблемой. Разработка ВЧИИП на базе технологии ВЧИД основана на получении низкотемпературной плазмы рабочего тела в ВЧИ-разряде и формировании пучка положительных ионов с заданными свойствами с использованием электростатической системы ускорения ионов. Основным элементом ВЧИИП является источник ионного пучка (ИИП), в котором реализуются оба процесса. Принцип построения ИИП по аналогии с ИД схематично представлен ниже (см. рисунок 1.1).

Ионизация рабочего тела (перевод рабочего тела в плазменное состояние) осуществляется в ГРК ИИП, а формирование ионного пучка и ускорение ионов – в ИОС. Электростатическое ускорение ионов может быть осуществлено в практических конструкциях ИОС с коэффициентом полезного действия (КПД), близким к 100 % и с высоким качеством

фокусировки пучка ионов. Компенсация тока и пространственного заряда пучка ионов на выходе из ИД достигается установкой нейтрализатора - источника электронов.



Рисунок 1.1 – Принципиальная схема ИИП (источника ионного пучка)

ВЧИИП от ИД отличается в целевом использовании ионного пучка: в ИД – для создания тяги, в ВЧИИП – для передачи импульса другому телу – ОКМ, отстоящему на большом расстоянии. В силу этого одной из важнейших характеристик ионного пучка в ВЧИИП является его малая расходимость, а плазма в ГРК должна иметь высокую степень равномерности по радиусу, чтобы обеспечить малое отклонение в величине приведенного первеанса элементарных ячеек в разных частях ЭЭ. В данном случае оптимальная величина приведенного первеанса лежит в узком диапазоне плотности ионного тока. Пучок ускоренной квазинейтральной плазмы, попадая на поверхность, воздействует на него с силой, величина которой существенно зависит от угла расходимости ионного пучка, угла падения ионов, отклонения оси пучка от центра тяжести транспортируемого ОКМ и так далее. Величина расходимости пучка и возможные его отклонения в силу ошибок по прицеливанию накладывают ограничения на максимальное расстояние между КА и ОКМ. При этом, как при создании ИД, так и ВЧИИП необходимо стремиться к высокому энергетическому КПД η_e и коэффициенту использования рабочего тела η_M . Ионный пучок создает импульс

$$R = \eta_M \dot{m} v_i, \quad (1.2)$$

где \dot{m} – расход рабочего тела, а скорость ионов v_i в пучке определяется формулой (1.3)

$$v_i = \sqrt{2 \frac{e}{M_i} U_0}, \quad (1.3)$$

где M_i – масса ионов, e – заряд электрона, U_0 – приложенная разность напряжений.

При располагаемой электрической мощности N создаваемый пучком импульс R можно найти формулой:

$$N = \frac{\dot{m} v_i^2}{2\eta_e} = \frac{R v_i}{2\eta_e \eta_M} \quad (1.4)$$

Откуда,

$$R = \frac{2\eta_e \eta_M N}{v_i} \quad (1.5)$$

Из последнего выражения следует, что при располагаемой мощности N импульс R тем выше, чем ниже скорость ионов – скорость истечения рабочего тела. В ИД величина v_i задается, исходя из определения оптимума при решении той или иной транспортной задачи, решаемой с использованием двигателя. Скорость истечения современных ИД составляет до 55 км/с (что соответствует ускоряющему напряжению $U_0 = 2$ кВ). При этом допускается расходимость ионного пучка с полууглом до 15^0 . В случае ВЧИИП необходимо обеспечить полуугол расходимости намного меньше, и это требует другого подхода к проектированию ВЧИИП по сравнению с ИД.

Требования к формированию пучка ионов в ионной пушке, предназначенной для воздействия на удаляемый объект, следуют из оценки расстояния между СКА и удаляемым ОКМ. Это расстояние должно составлять не менее нескольких габаритных размеров удаляемого ОКМ. Приняв за базовый размер ОКМ $L_0 = 5$ м, получим оценку для расстояния L_B , с которого будет оказываться воздействие ионным пучком: от 15 м до 25 м. Площадь воздействия оценим как $\frac{\pi L_0^2}{4} \approx 20 \text{ м}^2$.

Для того чтобы импульс ионного пучка использовался с максимальной эффективностью, полуугол расходимости пучка ионов α должен удовлетворять требованию:

$$\text{tg } \alpha \leq \frac{L_0}{2L_B} \approx \frac{1}{6} \div \frac{1}{10} \quad (1.6)$$

Отсюда допустимые значения полуугла расходимости пучка ионов лежат в пределах $\alpha = 5,7 - 9,5^0$. С увеличением расстояния воздействия требуемое значение полуугла расходимости пучка ионов уменьшается. Практически в диссертации ставится задача создания ВЧИИП с полууглом расходимости ионного пучка меньше 4^0 .

Из эксплуатируемых в настоящее время ЭРД с учетом требования по расходимости пучка ионов только ИД могут рассматриваться в качестве базового аналога ВЧИИП. Оценка потенциальных параметров ВЧИИП может быть произведена на основе анализа характеристик современных ИД. Следует при этом учесть, что требования к ИД по расходимости пучка ионов существенно менее жесткие – более 15^0 . В таблице 1 приводятся данные по существующим ВЧИД, в ней собраны открытые данные из источников [33 – 42]. Как видно из таблицы, расходимость пучка ионов даже существующих ВЧИД весьма велика для требуемых задач, что приведет к уменьшению эффективного расстояния до ОКМ и увеличению воздействия на СКА результатов распыления материалов ОКМ. По этой причине при разработке ИП необходимо

разрабатывать новые технические решения системы формирования слабо расходящихся пучков ионов.

Таблица 1 – Основные характеристики моделей ВЧИД

| Двигатель | RIT-15 | RIT-35 | ESA-XX | RIT-22 (ХТ) | RIT-2Х |
|---------------------------------------|-----------|--------|--------|-------------|-----------|
| Тяга, мН | 50 | 104 | 100 | 100 | 80-115 |
| Потребляемая мощность, Вт | 2000 | 2970 | 3000 | 2570 | 2185-2985 |
| Удельный импульс тяги, с | 2900-3600 | 3195 | - | 4054 | 3400-3435 |
| Полуугол расходимости пучка, град. | 17 | - | - | 19 | 25 |
| Количество перфорированных электродов | 2 | 3 | 3 | 2 | - |
| Диаметр ГРК, см | 15 | 35 | 26 | 21 | - |
| Масса двигателя, кг | 4,2 | 9 | 12,6 | - | 8,8 |

Принципиальная схема взаимодействия ОКМ и СКА показана на рисунке 1.2. В данном случае двигательная установка ЭРДУ СКА создает тягу R_1 для компенсации пучка ВЧИИП R_2 и придания движения всей космической связке ОКМ-СКА. Сила, которая воздействует на ОКМ, приложена к его центру масс.

Для оценок в диссертации приняты некоторые базовые параметры, характеризующие метод увода ОКМ ионным пучком: расстояние между СКА и ОКМ 40 – 60 м, тяга ВЧИИП 60 – 70 мН, тяга, создаваемая ионным пучком вдоль траектории связки: СКА-ОКМ 40 – 60 мН. Масса ОКМ – до 2000 кг, масса СКА – 800 – 900 кг.

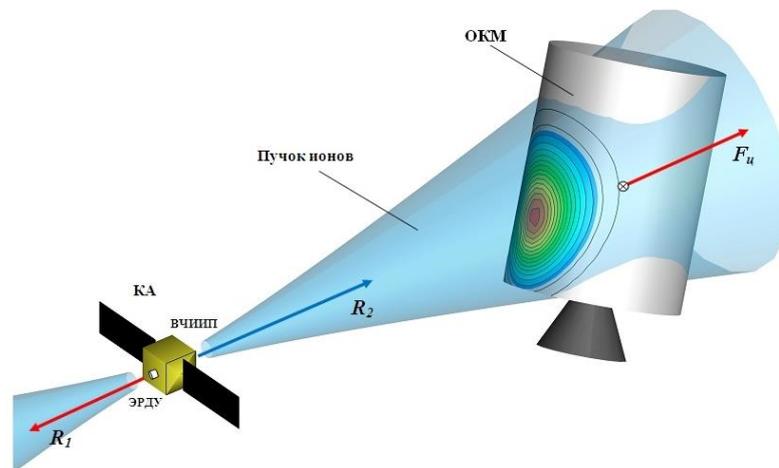


Рисунок 1.2 – Модель силового воздействия СКА на ОКМ при помощи ВЧИИП, установленного на СКА

1.2 Пути повышения эффективности генерации плазмы в ВЧИ-разряде

Эффективность ВЧИИП определяется тремя основными показателями [43]:

1) Степенью равномерности плазмы в зоне её практического использования, например, в источнике плазмы ИД, ИОС которого служит для извлечения ионов из плазмы через систему перфорированных электродов и последующего электростатического их ускорения в виде пучка. Особенно это важно в случае ВЧИИП вследствие необходимости точной фокусировки пучка ионов с малым углом расходимости. Отметим, что в обоих примерах геометрия зоны практического использования плазмы должна быть близка к плоскости. Недостаточная равномерность плазмы означает неравномерный ток ионного пучка ВЧИИП, а это уменьшает тягу ВЧИИП и снижает эффективность воздействия пучка ВЧИИП на ОКМ.

2) Величиной потерь заряженных частиц плазмы на боковых стенках ГРК, обусловленных амбиполярной диффузией этих частиц.

3) Величиной КПД передачи ВЧ-электрической мощности в индукционный разряд.

Цель настоящего подраздела работы – рассмотреть состояние развития ВЧИ-устройств с тем, чтобы выявить наиболее передовые и эффективные технические решения, определяющие прогресс в области ВЧИД и основанной на их технологии ВЧИИП.

1.2.1 Выбор оптимальной формы индуктора

В плане эффективности ВЧИИП форма индуктора имеет важное значение, заметно влияя на все три вида перечисленных выше показателей ВЧИ-устройств.

ВЧИ-разряд впервые наблюдал в 1884 г. немецкий физик В. Хитторф [44], возбуждивший его в среде остаточного газа в стеклянной трубке, помещённой в индуктор цилиндрической

формы. В последующие годы природа этого разряда активно изучалась многими исследователями. В 1941-42 гг. эксперименты с ВЧ-разрядами проводил в блокадном Ленинграде Г.И. Бабат [45], который, работая с мощными ВЧ-генераторами (ВЧГ), впервые получил ВЧИ-разряд при атмосферном давлении. Он первым классифицировал ВЧ-разряды, разделив их на емкостные и индукционные. Г.И. Бабат также положил начало развитию ВЧИ-плазматронов (расходных генераторов плазмы), изучая разряд в кварцевой трубе с наружным цилиндрическим индуктором при прокачке рабочего газа через полость трубы. В дальнейшем плазматроны данного вида были усовершенствованы и доведены до промышленного использования [46].

Во всех этих работах применялись индукторы цилиндрической формы. С помощью плазматронов с цилиндрическим индуктором проводились плазмохимические процессы в потоке плазмы, например, для наработки продуктов плазмохимии или для нанесения покрытий на подложки, а также для проведения плазмохимических процессов на кремниевых пластинах в микроэлектронике, например, в российской промышленной установке Отелло-43 [47]. Примерно в это же время ВЧИ-плазматроны с цилиндрическими индукторами стали применяться в качестве источников плазмы для ВЧИД, разрабатывавшихся при участии профессора Х.В. Лёба [48]. Позднее такие источники ионов, работающие на химически активных газах, стали использоваться в качестве технологических установок [49].

Как известно, преимущество ИД с индукционным разрядом состоит в том, что его ресурс не ограничен наличием электродов в плазме, то есть разрушающихся элементов конструкции. Отсутствие магнитной системы упрощает конструкцию и стоимость системы. Негативной же стороной цилиндрических ВЧИИП, с которых началось развитие ВЧИД, является то, что плазма этих источников неоднородна. Наиболее контрастно эта особенность ВЧИ-источников плазмы проявляется при относительно высоких давлениях, типичных для плазматронов, когда плазма континуальна, т.е. когда средняя длина релаксации энергии электронов:

$$\lambda_e \approx \lambda_e M_i / m_e, \quad (1.7)$$

здесь λ_e – средняя длина свободного пробега электронов, M_i и m_e – массы иона и электрона (соответственно) мала относительно характерного размера ГРК, например, её диаметра D :

$$\lambda_e \ll D, \quad (1.8)$$

При этом скин-слой на границе плазмы носит столкновительный характер, т.е. здесь λ_e много меньше глубины скин-слоя δ , которая определяется как

$$\delta = (2/\mu_0 \omega \sigma)^{1/2}, \quad (1.9)$$

здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота ВЧ-поля, где f – частота ВЧ-поля, σ – электропроводность плазмы). Таким образом, в этих условиях

$$\lambda_e \ll \delta \ll D. \quad (1.10)$$

При выполнении условия (1.10) термодинамическое состояние плазмы близко к локальному термическому равновесию, когда температуры электронов T_e и тяжёлых частиц T_a близки, а ФРЭЭ близка к максвелловской. Зона максимального нагрева электронов плазмы [50] совпадает с зоной максимальной напряжённости электрического поля в разряде, примыкающей к стенке ГРК.

Причина такой неравномерности распределения концентрации электронов по радиусу ГРК $n_e(r)$ в ВЧИ-разряде заключается в том, что азимутальное ВЧ-электрическое поле внутри длинного цилиндрического индуктора, как известно [51], имеет нулевое значение на оси и возрастает к стенке газоразрядного устройства.

В случае ВЧИД и ВЧИИП рабочее давление ксенона значительно ниже атмосферного, а именно, $p \sim 0,1 - 1$ мТорр [48, 49], что обусловлено особенностями процесса электростатического извлечения ионов из плазмы и их дальнейшего ускорения. При этом плазма в ГРК термически неравновесна и представляет собой бесстолкновительную среду с $\lambda_e \geq D$: известно, что при $p \leq 1$ мТорр и мощности ВЧИ разряда $P_p = 40$ Вт, $T_e \sim 6$ эВ, $T_a \sim 400$ К и $n_e \sim 4 \cdot 10^{11}$ см⁻³ [48] оценки для этих параметров при $Q_{ea} = 3,6 \cdot 10^{-15}$ см² [52] дают $\lambda_e \geq 12$ см. Физически явление скин-эффекта при этом сохраняется, но выражение (1.9) для δ в условиях бесстолкновительной плазмы становится неприменимым.

Таким образом, в ВЧИД скин-слой носит аномальный характер при бесстолкновительном поглощении ВЧ-мощности. Эти физические особенности приводят к перестройке структуры разряда. В работе [48] изучался ксеноновый ВЧИД с кварцевой ГРК внутреннего диаметра 10 см, окружённой цилиндрическим индуктором. С помощью двойных зондов Ленгмюра были измерены радиальные распределения $T_e(r)$ и $n_e(r)$. В частности, при $p = 0,8$ мТорр, $f = 2,2$ МГц и падающей ВЧ-мощности $P = 40$ Вт был получен следующий результат по $n_e(r)$, представленный на рисунке 1.3.

Видно, что согласно эксперименту [48] в бесстолкновительной ксеноновой плазме распределение $n_e(r)$ оказалось более равномерным с максимумом концентрации электронов n_e на оси пучка. С точки зрения физики этот результат можно интерпретировать следующим образом [53]: полученное в [48] радиальное распределение концентрации электронов $n_e(r)$ иллюстрирует проявление нелокальной кинетики электронов, видоизменяющей ФРЭЭ, и их нелокальной электродинамики, характеризующей аномальный скин-эффект. При этом реализуются бесстолкновительное поглощение электронами ВЧ-мощности и перенос нагрева электронов из скин-слоя с максимальной напряжённостью электрического поля в осевую зону ВЧИ-разряда, где это поле мало и равно нулю на оси. Исследование природы ВЧИ-разряда

низкого давления [53] показывает, что кинетика его электронов становится нелокальной при длине релаксации энергии электронов $\lambda_\varepsilon > \delta$ точнее при $pD < 1$ Торр×см (для $D = 10$ см, это неравенство означает $p < 100$ мТорр), а электродинамика – при более низких давлениях порядка $p < 10$ мТорр.

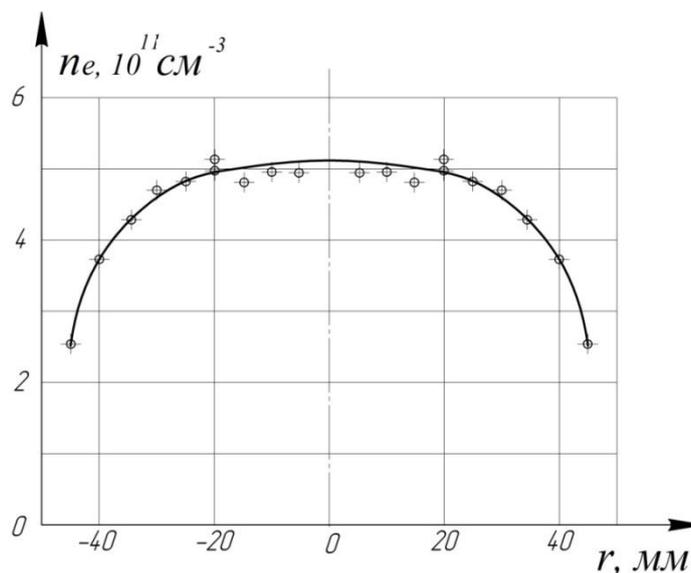
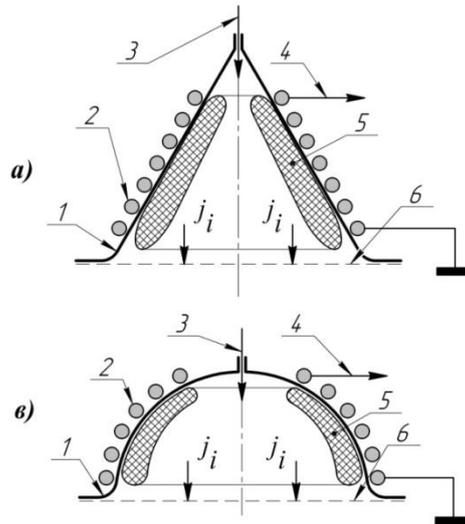


Рисунок 1.3 – Радиальное распределение $n_e(r)$ в ГРК ВЧИД [48]

Таким образом, при давлениях, характерных для ВЧИД, электродинамика электронов устраняет корреляцию между локализацией ВЧ-электрического поля (в цилиндрическом ВЧИ-разряде – вблизи стенки ГРК) и зоной интенсивного нагрева электронов (там же – на оси разряда) и тем самым, улучшает равномерность пространственного распределения плазмы (см. рисунок 1.3). Однако в ВЧИД с цилиндрическим индуктором боковая поверхность газоразрядной зоны сильно развита, имеет протяжённость вдоль индуктора вплоть до ИОС. В результате наблюдаются значительные потери заряженных частиц, снижающие степень ионизации плазмы в целом зоне её использования и усиливающие неравномерность распределения $n_e(r)$. Все эти явления уменьшают общую эффективность цилиндрических ВЧИИП.

Для улучшения ситуации исследователями был предпринят переход сначала к конической форме индуктора [54] и затем – к купольному индуктору [55, 56] (рисунок 1.4), у которых боковая поверхность газоразрядного объёма и, следовательно, потери заряженных частиц на стенке ГРК и неравномерность их радиального распределения должны были уменьшиться.



а) конусный индуктор; б) куполообразный индуктор

1 – диэлектрический корпус, 2 – индуктор, 3 – подача рабочего тела, 4 – подключение к согласующему устройству (СУ) и ВЧГ, 5 – плазма, 6 – ЭЭ – первый электрод ИОС

ВЧИД

Рисунок 1.4 – Эволюция формы индуктора

При таком изменении формы индуктора и геометрии диэлектрического корпуса ВЧИИП величина газоразрядного объёма уменьшается быстрее по сравнению с уменьшением площади его боковой поверхности, что приводит к росту относительной доли потерь заряженных частиц на стенках ГРК. Именно поэтому повышение равномерности плазмы в зоне её использования и увеличение общей эффективности таких устройств оказались малозаметны.

Более продуктивным оказался переход к плоской форме индуктора, впервые такая схема нашла применение в составе технологической установки [57] (см. рисунок 1.5) и получила развитие в [58] (см. рисунок 1.6). На рисунке 1.5 позиция 7 обозначает плоский индуктор, который расположен в атмосфере, диэлектрическое окно 13 отделяет вакуумный объём 9 в корпусе 10.

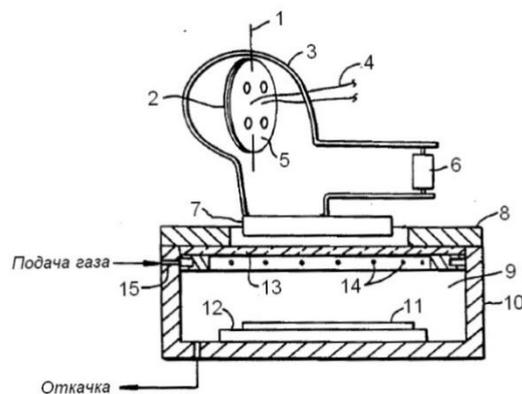


Рисунок 1.5 – Схема травления на установке, предложенной Джоном Огле [57]

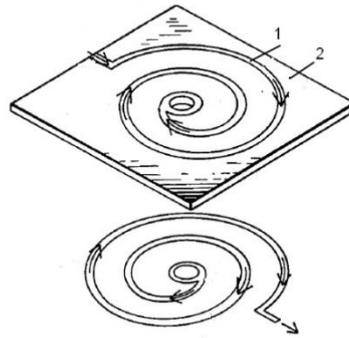
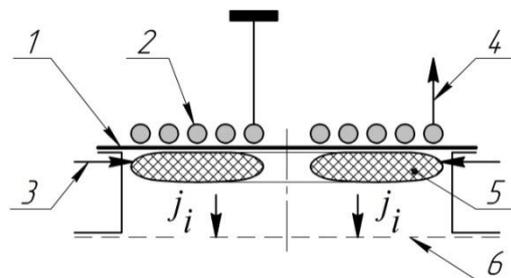


Рисунок 1.6 – Схема плоского спирального индуктора 1 на диэлектрической подложке 2, предложенная впервые в 1982 году в патенте [58]

Типичная схема ВЧИИП с плоской геометрией индуктора изображена на рисунке 1.7. Видно, что техническое решение газоразрядного устройства с плоской формой ВЧИ-разряда оптимально с точки зрения потерь заряженных частиц на стенках ГРК, причём эффект должен относительно расти при увеличении диаметра ГРК, и это может быть использовано при разработке ГРК ВЧИИП. Ниже будет показано, что снижение потерь заряженных частиц на стенках приводит к повышению общего уровня концентрации электронов n_e в плазме при удовлетворительной равномерности распределения $n_e(r)$. Имеется также технологический и экономический аспекты данной модификации ВЧИИП – сложный в изготовлении диэлектрический корпус цилиндрической ГРК вырождается в значительно более простой и недорогой диэлектрический диск. При этом конструкция ВЧИИП упрощается из-за возможности выполнить его корпус из металла. Эти технологические преимущества могут особенно существенно сказаться при разработке крупногабаритных ВЧИД.



1 – диэлектрическая крышка, 2 – индуктор, 3 – подача рабочего тела, 4 – подключение к согласующему устройству (СУ) и ВЧГ, 5 – плазма, 6 – ЭЭ – первый электрод ИОС
ВЧИД

Рисунок 1.7 – Плоский индуктор на диэлектрическом диске 1

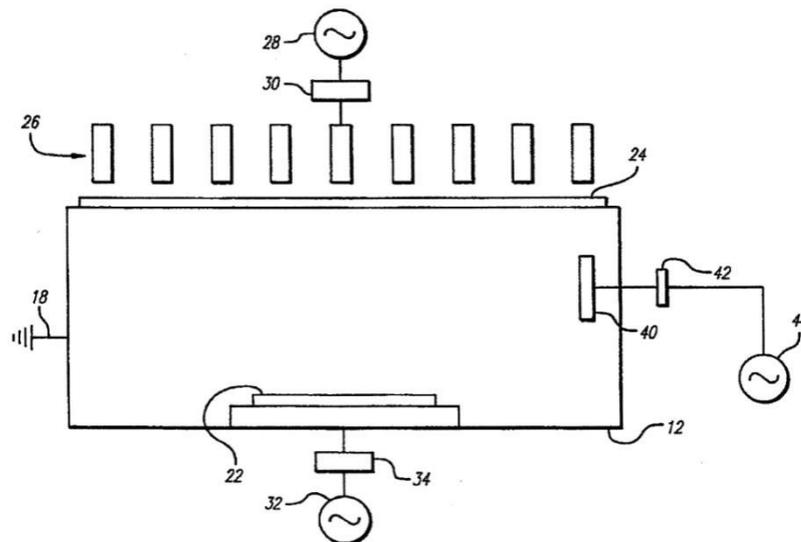
Из представленного разнообразия форм индукторов можно сделать заключение, что устройства с плоским индуктором наиболее рационально используют энергию ВЧГ при

плоской форме зоны использования плазмы – ионизованной среды около ЭЭ ВЧИД. Этот тезис предстоит доказать в следующих разделах диссертации.

При плоской геометрии ВЧИД уплотнение перед ИОС и уплотнения диэлектрического окна оказываются разнесёнными в пространстве и конструктивно независимыми, что упрощает конструкцию уплотнений ИОС в случае космического исполнения ВЧИД.

1.2.2 Применение плоских индукторов в ВЧИИП

Кратко рассмотрим известные из научной и патентной литературы некоторые плоские ВЧИИП. В качестве типичного устройства можно указать плазмохимический реактор по патенту [59] для обработки полупроводниковых пластин (рисунок 1.8).



28 – ВЧГ1, 44 – ВЧГ2, 32 – ВЧГ3, 30, 34, 42 – СУ, 26 - индуктор, 24 – диэлектрическое окно, 18 – заземление, 22 – подложка, 12 – вакуумная камера, 40 – вспомогательный ВЧ электрод
Рисунок 1.8 – Плоский технологический ВЧИИП [59] (номера позиций взяты из патента [59])

Здесь сечение витков спирального индуктора имеет прямоугольную форму. На подложкодержатель и на плазменный объём подано ВЧ-смещение.

Другой вариант ВЧИ-плазмохимического реактора с плоским спиральным индуктором был запатентован в [60] (рисунок 1.9).

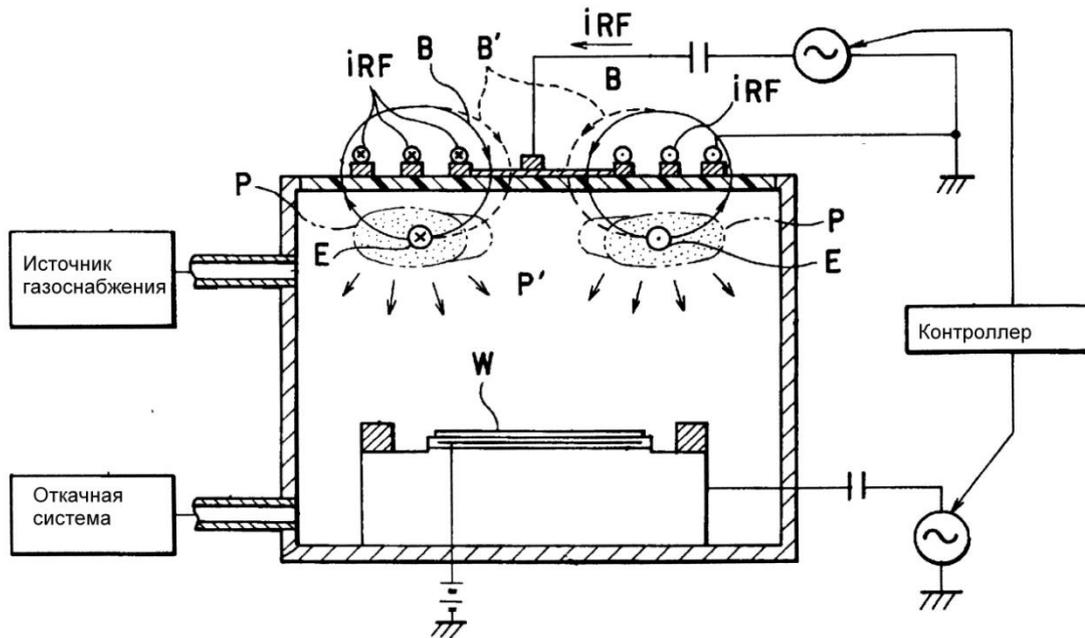


Рисунок 1.9 – ВЧИ-источник технологической плазмы с плоским индуктором [60]

На подложку W (см. рисунок 1.9) этого ВЧИИП поданы как постоянное напряжение смещения, так и ВЧ-смещение с независимо подбираемой частотой. В описании патента [60] приведены два варианта радиальных распределений $n_e(r)$ (см. рисунок 1.10), полученные при наличии медного диска в центре индуктора в качестве электростатического экрана (линия Pd) и при его отсутствии (линия Pd').

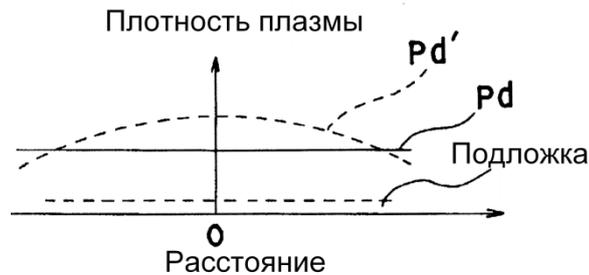


Рисунок 1.10 – Два варианта радиального распределения $n_e(r)$ по патенту [60]

Данные этого патента свидетельствуют о том, что ВЧИИП могут обеспечивать равномерность плазмы достаточно высокой степени при использовании специальных средств. Параметры подобных плоских ВЧИИП были детально исследованы в работах [61, 62] как в плане диагностики интегральных и технических характеристик газоразрядного узла, так и локальных измерений с помощью ленгмюровских и магнитных зондов (рисунок 1.11).

В данных работах было использовано трансформаторно-резонансное СУ как наиболее оптимальное для источника плазмы данного вида с точки зрения эффективности передачи ВЧ-мощности в разряд $\eta_p = P_p/P$, приведенной в работе [61]. Эксперименты проводились в

аргоновом ВЧИ-разряде на частотах 3.39 МГц, 6.78 МГц и 13.56 МГц при давлении $p = 1 - 100$ мТорр и мощности разряда $P_p = 10 - 200$ Вт.

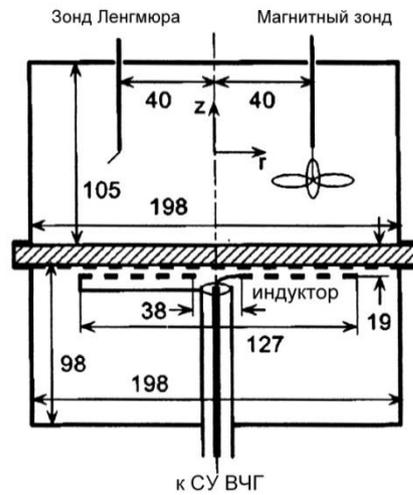


Рисунок 1.11 – Плоский ВЧИИП [61, 62]

Если результаты [61] по энергетической эффективности плоского ВЧИ-разряда экстраполировать на частоту $f \sim 2$ МГц, характерную для ВЧИД, то для рабочего давления ВЧИД $p = 1$ мТорр при мощности разряда $P_p = 200$ Вт получаем КПД ввода мощности в разряд $\eta_p \approx 0,5$. Это означает, что на этом режиме мощности генератора, равной $P \approx 400$ Вт, суммарная мощность потерь составляет около $P_{\text{пот}} \approx 200$ Вт. Данный уровень η_p нельзя считать верхним пределом для плоского ВЧИД, так как имеется ещё резерв для повышения КПД путем уменьшения толщины диэлектрического окна, разделяющего плазму и индуктор, перехода на ксенон, степень ионизации которого будет выше из-за меньшего потенциала ионизации, а также применения феррита (см. следующий подраздел).

Плоский ВЧИИП был исследован также в МГУ в 2008 г. [63]. Полученные в этой работе данные зондовых измерений радиального распределения $n_e(r)$ показали вполне высокую равномерность ВЧИ-плазмы в зоне её практического использования (рисунок 1.12).

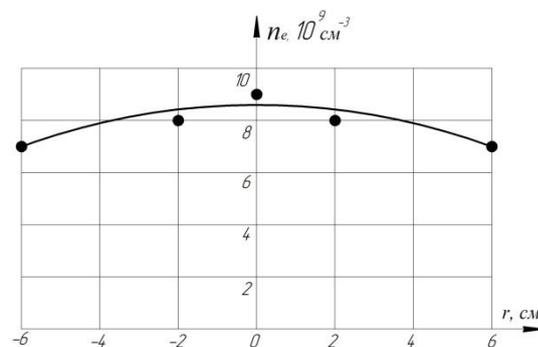
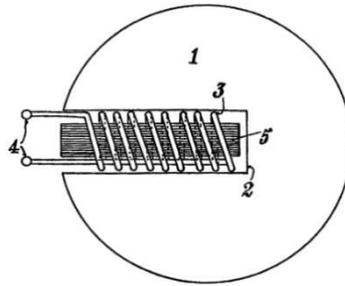


Рисунок 1.12 – Радиальное распределение $n_e(r)$ в ВЧИ-источнике плазмы [63]

1.2.3 Применение индукторов с ферритовым сердечником

Одной из важных возможностей повышения эффективности ВЧИ-разряда явилось применение индуктора с ферромагнитным сердечником, имевшим относительную магнитную проницаемость $\mu \gg 1$. Такое техническое решение было предложено в 1933 г. применительно к осветительным ВЧ-лампам, в которых ВЧИ-разряд возбуждался в колбе с внутренним индуктором, внутри которого находился стержень из трансформаторного или прессованного порошкового железа с $\mu \leq 8$ [64] (рисунок 1.13).



1 – стеклянная колба, 2 – внутренний стеклянный стакан, 3 – индуктор, 4 – выводы индуктора, 5 – ферромагнитный сердечник

Рисунок 1.13 – Осветительная лампа с ВЧИ-разрядом [64]

Судя по описанию данного изобретения, оно было создано чисто эмпирически, при наблюдениях за яркостью свечения такой газоразрядной лампы. Ферромагнитный сердечник, заполняющий внутреннюю полость индуктора, заметно снижает потери ВЧ-мощности в индукторе, увеличивая КПД передачи ВЧ-мощности в разряд η_p .

Индуктор, близкий по форме к плоскому и снабжённый ферритовым сердечником, был использован в установке для плазмохимической обработки полупроводниковых пластин (рисунок 1.14) [65].

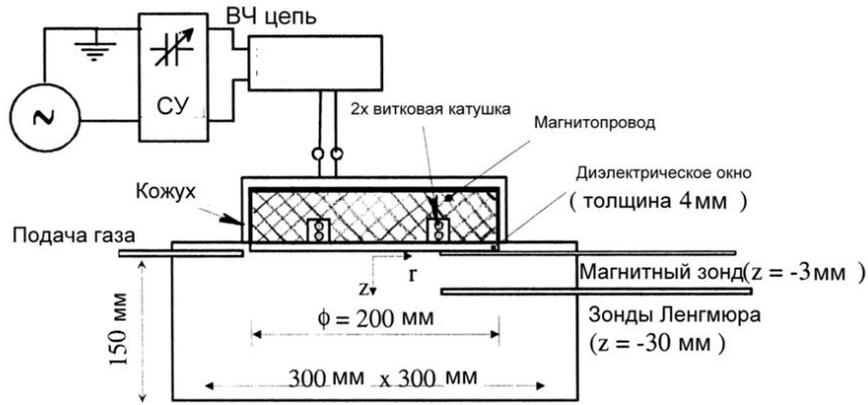


Рисунок 1.14 – Технологическая установка на основе ВЧИ-разряда [65]

Здесь исполнение индуктора почти согласовано с геометрией зоны использования плазмы для обработки пластин диаметром до 20 см. Задачей работы [65] явилось увеличение индуктивности индуктора с одновременным усилением связи индуктора с разрядом путем увеличения коэффициента взаимной индукции индуктора с токовым витком разряда за счёт повышения напряжённости магнитного поля вокруг индуктора и в зоне разряда. Эта задача была решена двумя путями:

1) Размещением индуктора в ферритовом сердечнике согласно рисунку 1.15. Данный незамкнутый сердечник обеспечивал концентрацию магнитно-силовых линий вокруг индуктора и в зоне разряда, что должно было увеличить индуктивность индуктора и витка тока разряда с одновременным усилением их взаимной индуктивной связи. В [65] использовался феррит “Fluxtrol F” с магнитной проницаемостью $\mu = 14$ и точкой Кюри $T_c = 637$ К при рабочей частоте 5 МГц.

2) Таким конструктивным решением узла индуктора, при котором диэлектрическая стенка, отделяющая индуктор от газоразрядного объёма, оказалась разгруженной от действия атмосферного давления (см. рисунок 1.14). За счет этого толщину диэлектрической стенки можно было уменьшить в 6 раз с 25 мм до 4 мм, соответственно. Очевидно, что в таком варианте проникновение магнитного поля в плазму существенно возросло.

Испытания установки, представленной на рисунке 1.14, проводились в аргоновом ВЧИ-разряде на частоте 13,56 МГц. Падающая мощность ВЧГ изменялась в диапазоне $P = 100 - 700$ Вт, давление аргона составляло $p = 5 - 30$ мТорр. Установка испытывалась при наличии и отсутствии ферритового сердечника индуктора, а также при разных толщинах диэлектрического окна (4 мм и 25 мм). Индикаторами эффективности передачи ВЧ-мощности в разряд служили: изменение уровня n_e , фиксировавшееся зондами Ленгмюра, показания магнитного зонда, измерявшего радиальную компоненту магнитного поля индуктора, и

изменение тока и напряжения индуктора. Оказалось, что при использовании разделительной стенки толщиной 25 мм применение ферритового сердечника индуктора по сравнению с работой без феррита привело к росту концентрации электронов примерно на 50 % и усилению напряжённости магнитного поля на 20 – 30 % на одинаковом расстоянии 3 мм (рисунок 1.14). Использование тонкого диэлектрического окна дало увеличение концентрации электронов в 3 – 4 раза. При давлении 5 мТорр измерялось также радиальное распределение концентрации электронов. Оказалось, что в газоразрядной зоне диаметра 120 мм ферритовый сердечник обеспечил улучшение равномерности плазмы примерно на 5 %. Все отмеченные изменения могли быть глубже при возбуждении ВЧИ-разряда на рабочей частоте ферритового сердечника (5 МГц). В заключение была предложена схема полупромышленного плазмохимического реактора с подложкодержателем размером 81 × 86 см. Индуктор этого реактора предполагалось выполнить в виде плоской змейки, уложенной в канавках плоского ферритового сердечника. Однако в [65] проводились лишь предварительные его испытания.

В последующей работе [66] тех же авторов эта технологическая установка получила дальнейшее развитие. Её схема представлена на рисунке 1.15.

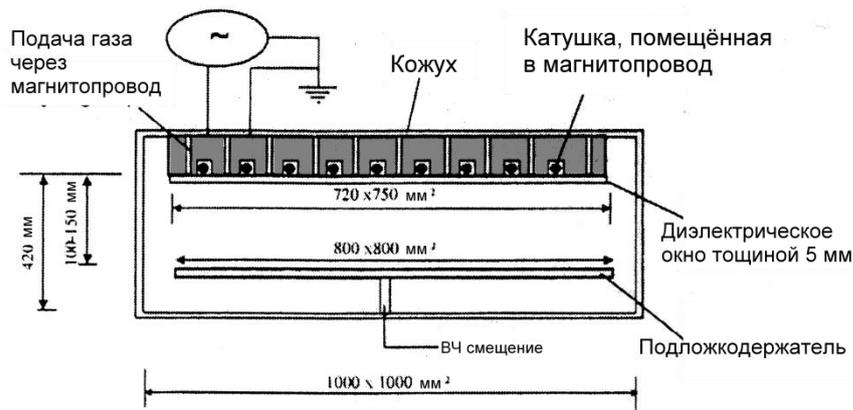


Рисунок 1.15 – Технологическая установка на основе ВЧИ-разряда [66]

Здесь сердечник индуктора был выполнен из феррита «Филипс 8С11» (никель-цинковый, с магнитной проницаемостью $\mu \sim 10^3$, точкой Кюри $T_c = 398$ К, рабочей частотой $f \leq 4$ МГц), а индуктор – в виде двух или трёх параллельно включённых петель с последовательно подсоединёнными индивидуальными катушками индуктивности для подстройки. Рабочим телом служил аргон, его давление изменялось в диапазоне $p = 1 – 5$ мТорр. Вначале было выполнено сравнение параметров установки при работе на частотах 13,56 МГц и 2 МГц. В качестве индикатора использовался пропорциональный концентрации электронов n_e ионный ток насыщения j_i плоского зонда Ленгмюра, установленного в центре газоразрядного пространства на расстоянии 30 мм от диэлектрической стенки индуктора.

Оказалось, что при изменении падающей мощности ВЧ-генератора от 1 до 4 кВт значения j_i при $f = 2$ МГц и давлении 1,5 мТорр выросли примерно в 4 раза по сравнению с плотностью тока ионов при $f = 13,56$ МГц (рисунок 1.16).

Проведённый эксперимент показал, в какой степени ферритовый сердечник индуктора увеличивает КПД передачи ВЧ-мощности в разряд при работе на рекомендуемой частоте для материала ферромагнитного сердечника индуктора. Этот результат может послужить критерием для оценки данных предыдущей статьи [65], где была использована неоптимальная частота. В работе [66] представлены также результаты настройки ВЧИ-установки с целью оптимизации пространственной однородности плазмы перед полупроводниковыми пластинами размера до 60 см. Результат этого исследования иллюстрирует распределение ионного тока насыщения $j_i(x)$, измеренное диаметральной цепочкой зондов Ленгмюра, ориентированной поперёк петель индуктора. Давление аргона составляло при этом 1,5 мТорр, частота ВЧ-поля – 2 МГц, мощность разряда – 2 кВт, удаление зондов от диэлектрического окна – 30 мм. Полученное распределение $j_i(x)$ было пересчитано в распределение $n_e(x)$ по абсолютной величине концентрации электронов в центре газоразрядной зоны, полученной с помощью зонда Ленгмюра $n_e \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (рисунок 1.17).

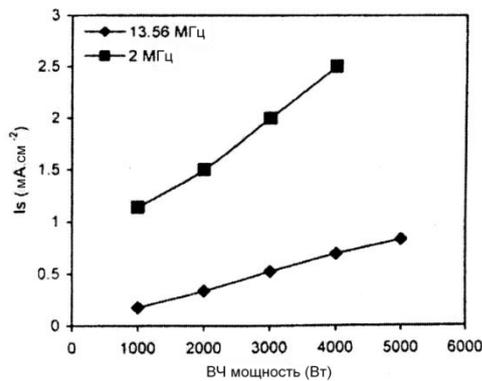


Рисунок 1.16 – Зависимость ионного тока насыщения плоского зонда от падающей мощности ВЧГ при двух разных частотах

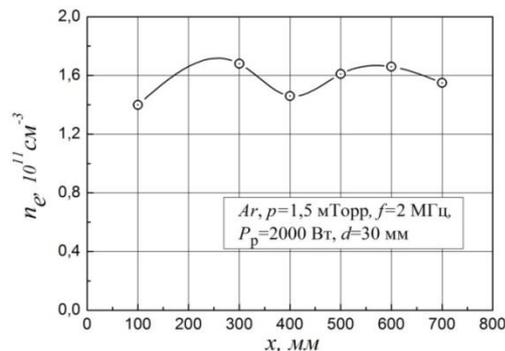


Рисунок 1.17 – Распределение концентрации электронов в направлении поперёк петель индуктора [66]

Видно, что при размере рабочей зоны до 60 см неравномерность плотности плазмы $n_e(x)$ не превышает $\pm 10\%$. В целом по всему рабочему пространству реактора эта цифра на два процента больше.

В работе [67], посвящённой экспериментальному изучению влияния исполнения ферромагнитного сердечника индуктора на энергетическую эффективность ВЧИ-разряда, в аналитической и экспериментальной формах были проанализированы возможности её повышения. На основе ранее проведённого исследования [68] показано, что отношение потерь ВЧ-мощности в индукторе $P_{\text{и}}$ к мощности разряда P_p можно представить выражением

$$P_{\text{и}}/P_p = \left[(Q_p + \omega/\nu)^2 + 1 \right] / k^2 Q_p Q_0 \quad (1.11)$$

где $Q_p = \omega L_p / R_p$ – добротность плазменного витка разряда, L_p – индуктивность плазменного витка, R_p – его активное сопротивление, ν – частота столкновений электронов с тяжёлыми частицами (обычно это частота столкновений электрон-атом из-за малой степени ионизации плазмообразующего газа ВЧИ-разряда), k – коэффициент взаимной индукции индуктора с плазменным витком разряда, обусловленный взаимной индуктивностью

$$M = k(L_1 L_p)^{1/2} \quad (1.12)$$

(здесь L_1 – индуктивность индуктора), Q_0 – добротность индуктора в отсутствие разряда на рабочей частоте.

Если отношение $P_{\text{и}}/P_p$ обозначить как τ , то отношение

$$\eta_p = P_p / P, \quad (1.13)$$

характеризующее эффективность передачи ВЧ-мощности в разряд, можно записать как

$$\eta_p = 1 / (1 + \tau) \quad (1.14),$$

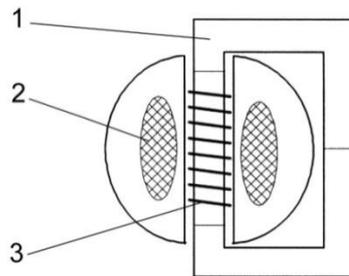
Таким образом, получаем [69], что

$$P = P_{\text{и}} + P_p \quad (1.15)$$

На самом деле в эту сумму войдут потери мощности на кабелях, разъёмах, в согласующем устройстве и в окружающих электропроводящих деталях, однако качественно можно полагать, что для повышения η_p в первую очередь необходимо снижать отношение τ , т.е. потери мощности в индукторе по отношению к мощности разряда. Для этого, как видно из уравнения (1.11), нужно уменьшать рабочую частоту f вплоть до выполнения неравенства $\omega \ll \nu$, увеличивать коэффициент k взаимной индукции индуктора с разрядом до $k \approx 1$ и увеличивать оба значения добротности, входящей в (1.11). В частности, поскольку электрическое сопротивление плазменного витка R_p уменьшается с ростом мощности разряда (так как растёт температура и проводимость плазмы), а это означает увеличение Q_p , то

экономически разумной оказывается работа на повышенных мощностях разряда. Наконец, обе величины добротности возрастают с увеличением индуктивности как индуктора, так и разряда, а для этого необходимо снабдить индуктор ферритовым сердечником с высокой магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$.

Экспериментальная часть работы [67] посвящена изучению относительных потерь ВЧ-мощности $\tau = P_{и}/P_{р}$ при различных конструктивных исполнениях сердечника индуктора в едином устройстве, представлявшем собой индукционную осветительную лампу (см. рисунок 1.18).



1 – ферритовый сердечник, 2 – плазма, 3 – индуктор

Рисунок 1.18 – Индукционная осветительная лампа [67]

Лампа была выполнена в виде сферической стеклянной колбы со сквозной диаметральной стеклянной трубкой. В трубке был размещён цилиндрический индуктор, внутри которого либо отсутствовал сердечник, либо находился ферритовый сердечник, либо были встречно введены два конца U-образных ферритовых сердечников, образовавших замкнутый ферромагнитный контур (изображен на рисунке 1.18), подобных используемым в токамаках. Колба была наполнена смесью криптон/ртуть при парциальных давлениях 0,5 Торр/6 мТорр соответственно, рабочая частота составляла 2,5 МГц. Измерения электрических параметров разряда при трёх указанных вариантах исполнения сердечника индуктора дали следующие результаты по τ (см. рисунок 1.19).

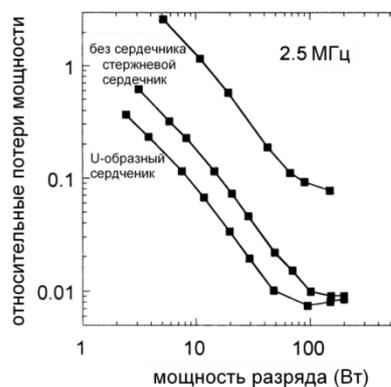


Рисунок 1.19 – Зависимость относительных потерь ВЧ-мощности разряда при наличии двух видов ферритовых сердечников и без них

Оказалось, что с ростом мощности разряда потери в индукторе быстро снижаются, причём, относительные потери мощности индуктора с замкнутым ферритовым сердечником оказались примерно на порядок величины меньше потерь в индукторе без сердечника. Как показали электрические измерения [67], этот эффект обусловлен уменьшением тока индуктора в 30 раз и в 3 раза при мощности разряда 10 Вт и 100 Вт, соответственно, с одновременным уменьшением напряжения индуктора на 36 % и 18 % при тех же значениях мощности разряда.

Эксперимент показал, что рост мощности ВЧ-разряда сопровождается перераспределением потерь на катушке (которые уменьшаются) и мощности разряда (которая возрастает) [67]. Это перераспределение усиливается с увеличением степени охвата индуктора ферромагнитным сердечником. В данной работе измерения проводились при мощностях разряда до 200 Вт. Данный эффект наблюдается также и при больших мощностях, как показали экспериментальные данные работ [65, 66], полученные при падающей мощности ВЧГ до 5 кВт.

В экспериментальной работе [70] был всесторонне исследован вариант ВЧИИП с двумя плоскими коаксиальными индукторами, снабжёнными незамкнутыми ферритовыми сердечниками. Схема этого устройства, представлена на рисунке 1.20.

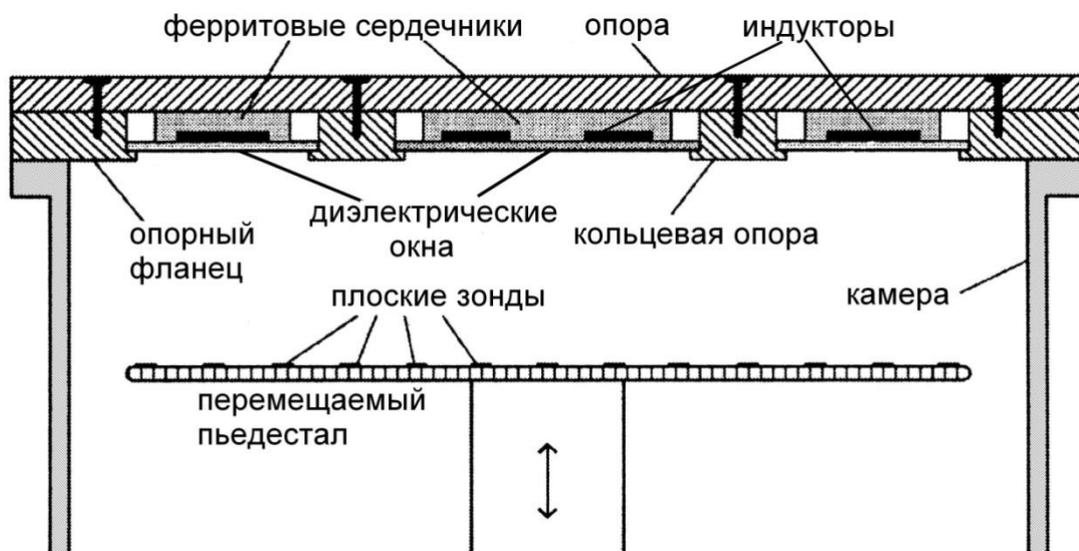


Рисунок 1.20 – ВЧИ-источник плазмы с двумя коаксиальными плоскими индукторами [70]

Для измерения радиального распределения плазмы использовалась цепь плоских зондов Ленгмюра, установленных на подвижном подложкодержателе. В проведённых экспериментах испытывался только внешний индуктор (наружный диаметр индукторного узла около 20 см), возбуждавший ВЧИ-разряд в аргоне на частоте 2 МГц. В качестве материала для ферромагнитного сердечника его индуктора использовался никель-марганцевый феррит с

магнитной проницаемостью $\mu = 120$ и точкой Кюри $T_C = 623$ К. Интегральная диагностика показала, что при мощности разряда в $P_p = 200$ Вт КПД передачи ВЧ-мощности от генератора к разряду при давлении $p = 1$ мТорр достигал $\eta_p = 0,8$, т.е. он увеличился на 60 % по сравнению с аналогичным источником плазмы, индуктор которого не имел ферритового сердечника ([61], рисунок 1.11). При этом мощность генератора уменьшилась до $P \approx 250$ Вт, а мощность потерь упала до $P_{\text{пот}} \approx 50$ Вт. Таким образом, использование ферритового сердечника индуктора, разомкнутого в сторону разряда, привело к увеличению η_p примерно в полтора раза и к снижению в 4 раза потерь в системе передачи ВЧ-мощности от генератора к разряду. Это обусловлено, как показано в работе [67], снижением напряжения и тока индуктора. При этом уменьшились потери в соединительных кабелях, разъёмах, согласующем устройстве, в индукторе и на возбуждение вихревых токов в окружающих индуктор электропроводящих деталях.

В экспериментах [70] были измерены радиальные распределения плотности ионного тока на плоские зонды, расположенные на подложке, имеющей отрицательное смещение потенциала -15 В, на расстоянии 25 мм от диэлектрического окна при различных давлениях аргона в диапазоне $2 - 50$ мТорр. Результаты для давления $p = 2$ мТорр и $P_p = 200$ Вт представлены на рисунке 1.21.

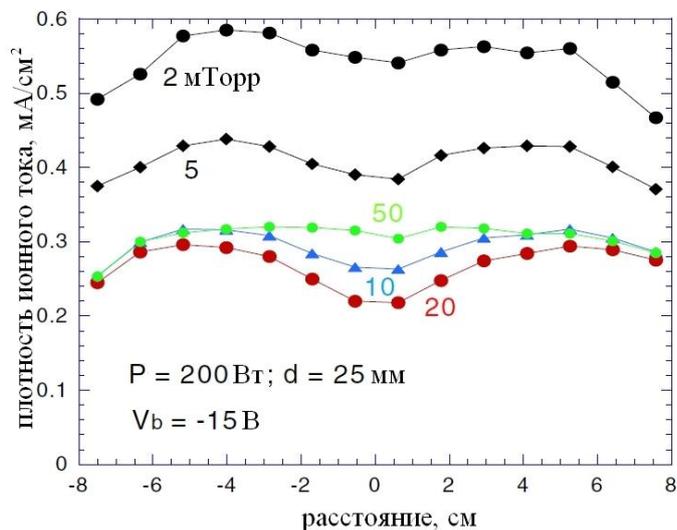


Рисунок 1.21 – Радиальное распределение ионного тока при разных давлениях аргона на расстоянии 25 мм от индуктора при мощности разряда 200 Вт [70]

Абсолютные величины концентрации электронов на оси в данном эксперименте составили $n_e = 10^{11}$ см $^{-3}$.

Полученные данные с неравномерностью распределения ионного тока порядка ± 10 % качественно характеризуют ВЧИ-источники плоской геометрии. Очевидно, что при

необходимости неравномерность параметров плазмы в ВЧИ-источнике [70] можно уменьшить путём одновременной подачи независимо регулируемого ВЧ-напряжения на обе секции индуктора.

Имеется две дополнительные возможности улучшения результатов работы [70]:

1) Упомянутое выше использование в качестве рабочего газа ксенона – традиционного рабочего тела ВЧИД. Этот шаг приведёт к повышению степени ионизации плазмы, т.к. первый потенциал ионизации ксенона $U_i = 12,1$ эВ значительно ниже этого же параметра для аргона $U_i = 15,7$ эВ, а ионнозвуковая скорость ксенона, определяющая потери плазмы на стенках, примерно в 2 раза меньше; при этом проводимость газоразрядной плазмы и ток разряда возрастут. Благодаря снижению напряженности ВЧ-поля, требующегося для поддержания степени ионизации плазмы, относительные потери мощности в индукторе уменьшатся обратно квадрату напряженности поля, что приведёт к общему росту эффективности системы.

2) Ослабление амбиполярной диффузии заряженных частиц плазмы к стенке ВЧИ-источника касповым магнитным полем (направленным вдоль поверхности стенки), которое затормозит амбиполярную диффузию заряженных частиц к стенке, повысит степень ионизации рабочего тела, улучшит однородность плазмы в зоне использования и увеличит общую эффективность ВЧИ-устройства. Такое поле нетрудно создать, если на внешней поверхности ГРК, выполненной из немагнитного материала, например, из нержавеющей стали, установить радиально ориентированные постоянные магниты с чередующейся полярностью торцов по аналогии с известными источниками Кауфмана.

В одном из последних обзоров по ВЧИИП с ферромагнитными сердечниками индукторов (ФМВЧИИП) [71] представлена история развития ФМВЧИИП, ранние попытки их реализации, некоторые последние продвижения и примеры успешных разработок. Сопоставительный анализ ФМВЧИИП и традиционных ВЧИ-систем показал существенные преимущества ФМВЧИИП в части высокого КПД передачи мощности в разряд и возможности работать почти при полном отсутствии плавающего ВЧ-потенциала плазмы, низких концентрациях электронов и при малых толщинах газоразрядной зоны, сохраняя эффективный контроль качества пространственного распределения плотности плазмы.

Дополнительно к рассмотренным в настоящей работе техническим решениям по созданию ВЧИИП различной размерности представлены системы, состоящие из пространственно распределённых наборов ВЧИ-газоразрядных систем с замкнутыми ферритовыми сердечниками [72]. Эти газоразрядные ячейки характеризуются рекордными значениями КПД передачи ВЧ-мощности в разряд – до 98 %. Они komponуются таким образом, чтобы объединить газоразрядные пространства индивидуальных ячеек в плазменную зону плоской геометрии размерностью до 100 см. На рисунке 1.22 показан вариант ВЧИ-

газоразрядной ячейки – источника света, содержащего замкнутую стеклянную трубку, охваченную двумя замкнутыми ферритовыми сердечниками, каждый из которых имеет индуктор – первичную обмотку высокоэффективной ВЧИ-газоразрядной системы.

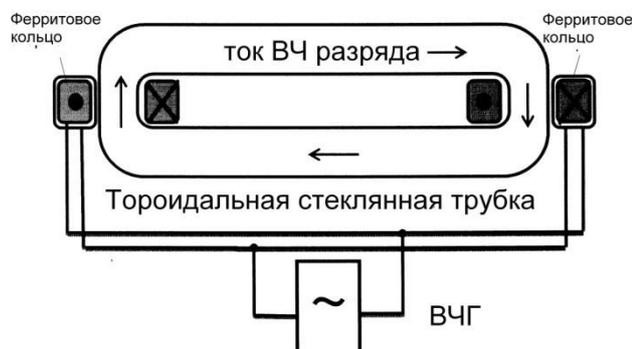


Рисунок 1.22 – ВЧИ-газоразрядная ячейка в замкнутой трубке с использованием замкнутых ферритовых сердечников [71]

Видно, что здесь два индуктора соединены параллельно и, в свою очередь, подключены к ВЧГ. Для формирования набора таких ячеек, образующих крупномасштабную ВЧИ-систему, они видоизменяются следующим образом (см. рисунок 1.23):

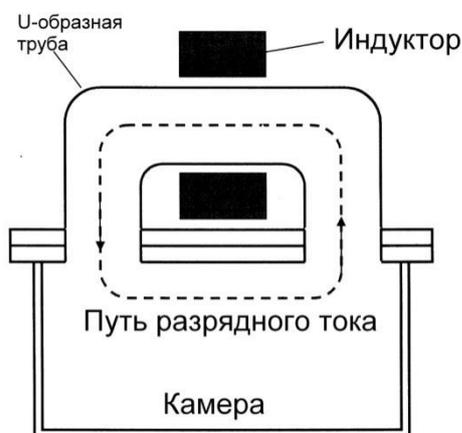


Рисунок 1.23 – ВЧИ-газоразрядная ячейка с замкнутым ферритовым сердечником и трактом разряда, замкнутым через полость камеры [71]

В таком виде ВЧИ-ячейка представляет собой присоединённую к общей камере U-образную кварцевую трубку с одним или двумя охватывающими её тороидальными ферритовыми сердечниками. Схема такой камеры [72], окружённой периферийной цепочкой ВЧИ-газоразрядных ячеек с парами замкнутых ферритовых сердечников, представлена на рисунке 1.24.

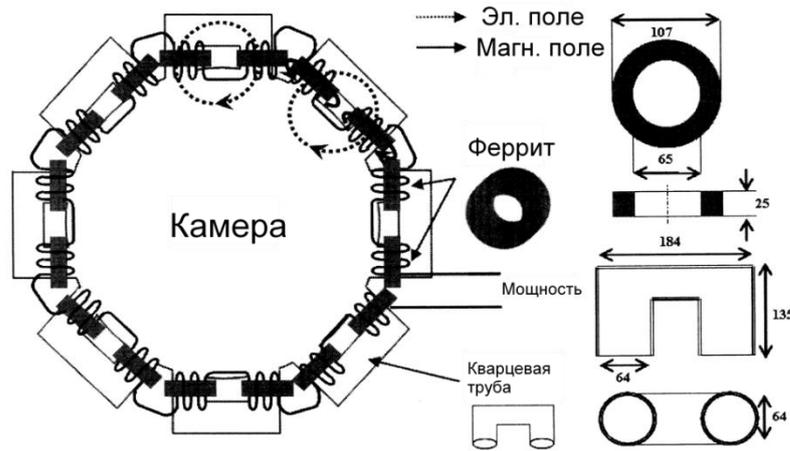


Рисунок 1.24 – Схема камеры с набором ВЧИ-газоразрядных ячеек на периферии камеры [71]

Реальная ВЧИ-установка, испытанная в работе [72], показана в рабочем состоянии на фотографии рисунка 1.25. Её габариты обеспечивают создание ВЧИ-устройств (ВЧИД или технологической системы) размерности до 30 см.



Рисунок 1.25 – ВЧИ-газоразрядная система с периферийным набором замкнутых ВЧИ-разрядных ячеек на рабочем режиме [71]

Выполненные в данной камере зондовые измерения радиального распределения концентрации электронов в аргоновой плазме при давлении 5 мТорр показали изменение неравномерности распределения $n_e(x)$ в пределах 2 – 11 % при уровнях ВЧ мощности в диапазоне 300 – 2400 Вт, соответственно (см. рисунок 1.26).

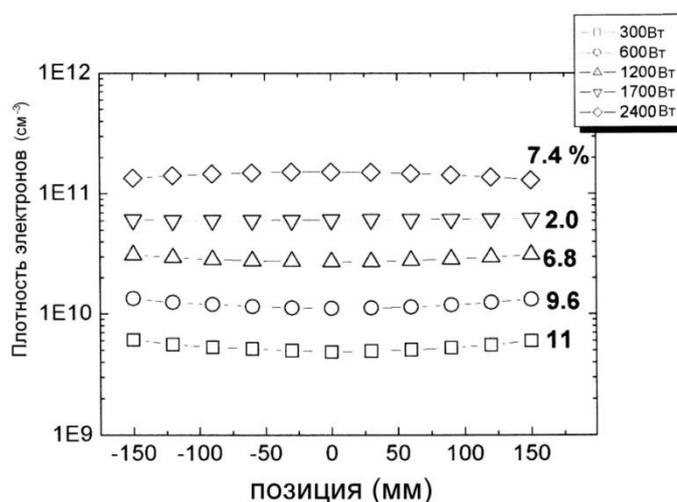


Рисунок 1.26 – Радиальное распределение концентрации электронов, измеренное в ВЧИ системе рисунка 1.25 при давлении $p = 5$ мТорр [71]

На рисунке 1.27 показана ВЧИ-система, составленная из плоского набора ячеек с замкнутыми ферритовыми сердечниками.

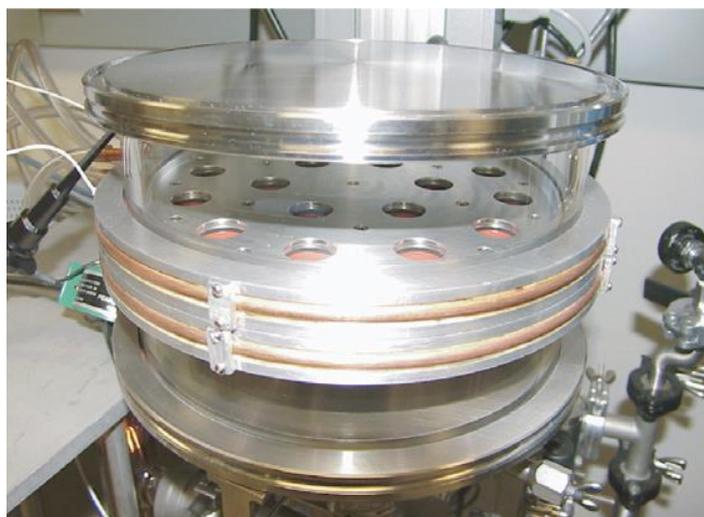


Рисунок 1.27 – ВЧИ газоразрядная система с плоским набором замкнутых ВЧИ-разрядных ячеек, встроенных в перегородке рабочей камеры [71]

Газоразрядные ячейки этой системы образуют своеобразную перегородку с отверстиями для колец ВЧИ-разрядов. Она разделяет газоразрядную камеру на две части, в которых возможно проведение двух параллельных плазменных или плазмохимических процессов. Однако в ВЧИД с единой ГРК такая система вряд ли может быть применена.

Интересная особенность, которая возникает в ФМВЧИИП в виде набора газоразрядных ячеек с замкнутыми ферритовыми сердечниками, соединённых в последовательные цепочки, показанных на рисунке 1.24, состоит в способности самоуправления распределением плотности

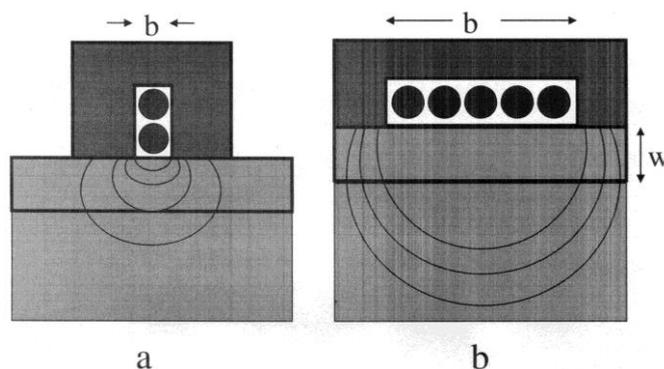
плазмы. Такие сердечники характеризуются коэффициентом взаимной индукции индуктора с разрядом $k \approx 1$ и обеспечивают практически омический импеданс индуктора, обратно пропорциональный локальной величине концентрации электронов n_e . Этот же характер зависимости от n_e характеризует ВЧ-мощность разряда:

$$P_p = I^2 R_{coil} \sim 1/n_e, \quad (1.16)$$

где I – ток индуктора, R_{in} – активное сопротивление индуктора.

Таким образом, любое локальное уменьшение n_e вызовет локальное увеличение мощности разряда, которое вернёт n_e к исходной величине. Таким образом, эта отрицательная обратная связь в случае кругового набора газоразрядных ячеек позволит автоматически создать азимутально однородное кольцо плазмы, а в случае последовательно включённых круговых наборов ячеек – выровнять однородность плазмы также и по радиусу.

Отметим, что в работе [71] дано наглядное объяснение ограничению эффективности короткого цилиндрического индуктора в канавке ферритового сердечника, как было сделано в экспериментах [65] (см. рисунок 1.14), в сравнении с плоским индуктором [70]: в этой работе торцы ферритового сердечника разнесены на расстояние b много большее, чем в [65]. При большей величине b , как видно из рисунка 1.28, наводимые индуктором магнитно-силовые линии геометрически проникают в плазму разряда гораздо глубже, что обеспечивает большую величину коэффициента взаимной индукции k токового витка разряда с индуктором. А увеличение k согласно (1.11) приводит к уменьшению потерь ВЧ-мощности в индукторе и, следовательно, к увеличению эффективности η_p передачи ВЧ-мощности в разряд.



а) короткий цилиндрический индуктор [65] и б) плоский индуктор [70]

b – расстояние между внутренними кромками торцов ферритовых сердечников,

w – толщина диэлектрического окна, отделяющего индуктор от разряда

Рисунок 1.28 – Схемы магнитно-силовых линий около торцов разомкнутых ферритовых сердечников

1.2.4 Применение плоских индукторов с ферритовым сердечником для решения задач увода ОКМ с ГСО

Источник PEGASES (Plasma Propulsion with Electronegative GASES) был представлен в качестве новой идеи в ЭРД, основная особенность которой выражалась в ускорении одновременно как положительных, так и отрицательных ионов для создания тяги. Идея заключается в том, чтобы на выходе из источника получить квазинейтральный поток ионной плазмы с очень малым содержанием электронов, решая одновременно задачу токовой и пространственной нейтрализации пучка. Первый прототип этой схемы был детально описан в работах [73, 74]. Преимуществом такой системы авторы считают отсутствие необходимости в нейтрализаторе – источнике электронов, являющемся неотъемлемой частью ИД. Идея вызывает много вопросов, но в данном случае интерес представляют результаты первых экспериментов. Особенностью прототипа I источника (см. рисунок 1.29) было использование цилиндрического индуктора с тремя витками, который создавал геликоновый разряд электроотрицательных газов на рабочей частоте 13,56 МГц (I_2 , SF_6 , O_2).

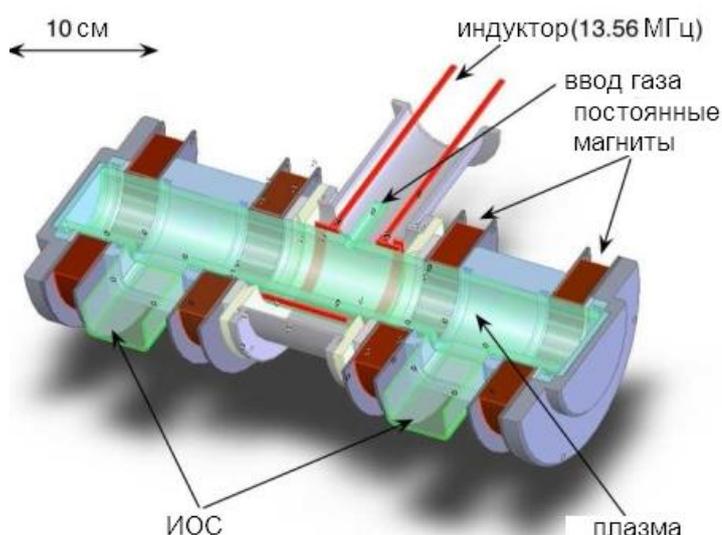


Рисунок 1.29 – Первое исполнение модели PEGASES (прототип I)

Однако эффективность плазмообразования в такой системе была невелика и составляла в случае азота 35 % для ВЧ-мощности 600 Вт.

Сама теория работы подобного устройства была рассмотрена в приведенных выше работах, а также обобщена в [75]. Его создатели предполагают использование ВЧИИП в полупроводниковой индустрии для проведения процессов травления при отсутствии поверхностного заряда [76 – 78], инжекции нейтрального пучка для термоядерного синтеза [79] и в качестве ЭРД [73, 74].

Позднее при сотрудничестве с проф. В.А. Годяком был создан прототип II, который отличала большая эффективность (см. рисунок 1.30).

В этом прототипе ВЧИИП применена прямоугольная ГРК с плоским индуктором и ферритовым сердечником. За счёт этого повысилась эффективность ионизации. В созданной таким образом плазме галогенного газа (например, йода) постоянные магниты, создающие магнитное поле напряженностью до $2,45 \times 10^{-2}$ Тл, позволяют отсечь электроны и образовать ион-ионную область, а ИОС, работая попеременно с частотой 30 кГц, ускоряет и отрицательные и положительные ионы, которые затем рекомбинируют. Преимущество такой схемы заключается в сниженных затратах рабочего тела. При этом сильно усложняется сам двигатель, а характеристики его получаются весьма скромными, что, возможно, свидетельствует о неверно подобранной частоте работы ИОС, часть потока ионов просто не успевает проходить её и «запирается». ФРЭЭ, а также основные параметры получаемой плазмы в такой системе вдоль магнитных фильтров были исследованы в работе [80]. В статье [81] подробно описываются рабочие процессы в новом прототипе и полученные параметры источника. При расходе смеси аргона и элегаза SF₆ по 13 см³/мин каждый и ускоряющем напряжении 500 В были получены следующие параметры: тяга 2 мН, удельный импульс тяги – 120 с. По словам авторов, такие слабые результаты являются свидетельством того, что рабочие условия были далеки от оптимальных для данного источника. ВЧ-мощность при частоте 4 МГц составляла 200 Вт, а потребление ИОС с рабочей частотой 30 кГц составило 500 Вт. В последующей работе [82] при повышении ускоряющего напряжения до 1000 В, снижении суммарного расхода SF₆ (в космосе предполагается применение иода) и аргона (возможно применение любого инертного газа) до 6 см³/мин была получена тяга 5,5 мН. Скромные результаты по тяге и удельному импульсу тяги, сильное усложнение системы питания и управления двигателем, в купе с соответствующим понижением его надежности, а также применение классической оптики с круглыми отверстиями, не позволяющей получать малые углы расходимости пучка, приводят к выводу о малой реальной перспективе применения такой системы для увода ОКМ [83].

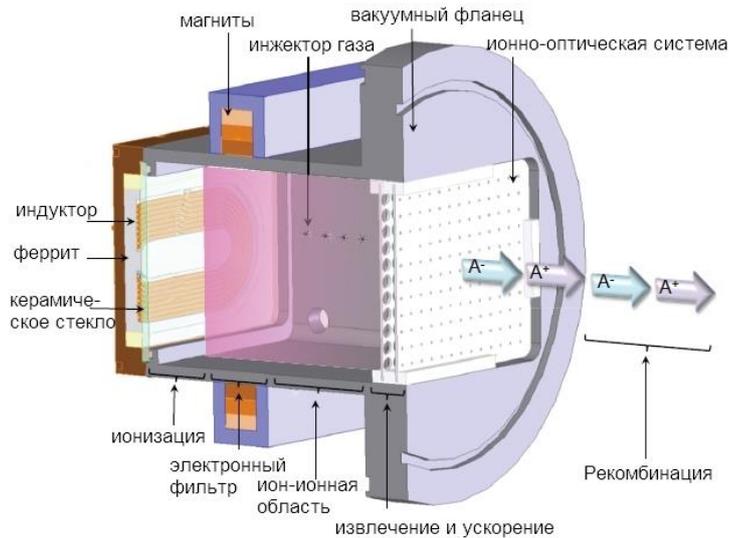


Рисунок 1.30 – Второе исполнение модели PEGASES (прототип II)

1.3 Обзор физико-математических моделей ВЧИ-разряда

Индуктивный ВЧ-разряд лучше всего моделируется трансформаторной моделью [84]. Анализ ВЧИ-разряда начинается с электромагнитного описания, берущего начало ещё в ранних работах Томпсона [85].

Трансформаторная модель в ВЧИ-разрядах была предложена Пеляком, Годяком и Александровичем [68]. В ней индуктор и плазма формируют трансформатор, в котором плазма представляет собой вторичную обмотку воздушного трансформатора. Первичная обмотка имеет индуктивность L_{coil} и активное сопротивление R_{coil} . Эти две величины определяют добротность индуктора $Q \equiv \omega L_{\text{coil}}/R_{\text{coil}}$. Эти величины можно получить экспериментально, но можно также и рассчитать теоретически. Общая схема ВЧИ-разряда представлена на рисунке 1.31. Электрическое поле индуцируется азимутально, а магнитное поле – аксиально. При высокой плотности плазмы оба поля затухают внутри скин-слоя δ .

Индуктор и плазменный виток связаны между собой посредством взаимной индуктивности M . Эта величина учитывает напряжение, которое возникает во вторичной обмотке при изменении тока первичной обмотке и наоборот. В расчетах M предполагается реальной в предположении, которое будет сформулировано ниже.

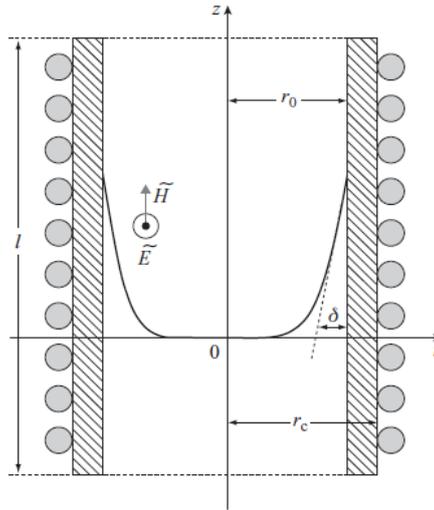


Рисунок 1.31 – Схематичное представление ВЧИ-разряда. Разряд зажигается в диэлектрической трубке с внутренним радиусом r_0 , внешним радиусом r_c и длиной $l \gg r_0$

Связанные цепи, показанные на левой стороне рисунка 1.32, могут быть преобразованы в одну цепь, содержащую активное сопротивление R_s и индуктивность L_s , как показано на правой стороне рисунка 1.32.

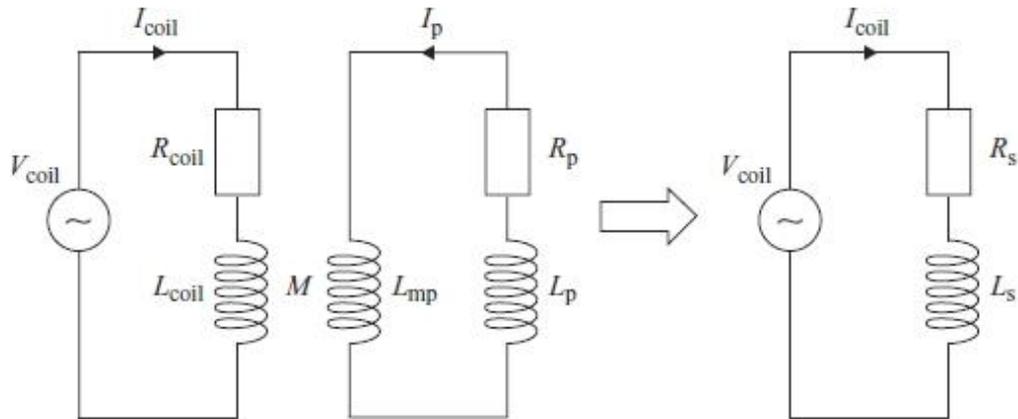


Рисунок 1.32 – Трансформаторная модель ВЧИ-разряда. На правой половине рисунка вторичная обмотка была преобразована в одну эквивалентную цепь с первичной обмоткой

Применяя законы Кирхгофа для выше упомянутых цепей, имеем:

$$\tilde{V}_{\text{coil}} = i\omega L_{\text{coil}} I_{\text{coil}} + R_{\text{coil}} I_{\text{coil}} + i\omega M \tilde{I}_p, \quad (1.17)$$

$$\tilde{V}_p = i\omega L_{\text{mp}} \tilde{I}_p + i\omega M I_{\text{coil}} = -\tilde{I}_p \left[R_p + iR_p \frac{\omega}{\nu_m} \right], \quad (1.18)$$

$$\tilde{V}_{\text{coil}} = (i\omega L_s + R_s) I_{\text{coil}}, \quad (1.19)$$

где ν_m – частота упругих соударений электронов и нейтралов, Далее преобразования приводят к:

$$R_s = R_{\text{coil}} + M^2 \omega^2 \left(\frac{R_p}{R_p^2 + \left(\omega L_{\text{mp}} + R_p \left(\frac{\omega}{v_m} \right)^2 \right)^2} \right), \quad (1.20)$$

$$L_s = L_{\text{coil}} - M^2 \omega^2 \left(\frac{L_{\text{mp}} - R_p / v_m}{R_p^2 + \left(\omega L_{\text{mp}} + R_p \left(\frac{\omega}{v_m} \right)^2 \right)^2} \right). \quad (1.21)$$

Для того чтобы точно описать при помощи трансформаторной модели ВЧИ-разряд, R_s должно быть равно $R_{\text{coil}} + R_{\text{ind}}$, а L_s должно быть равно L_{ind} во всем диапазоне давлений (где R_{ind} и L_{ind} получены из электромагнитной модели (см. рисунок 1.33, в котором r_0 – внутренний радиус канала, r_c – внешний радиус, а l – длина канала).

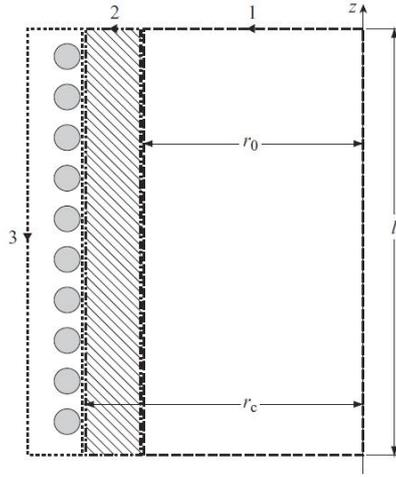


Рисунок 1.33 – Контуры токов Ампера в плазме (1), в диэлектрической трубке (2) и индукторе (3)

Эквивалентная схема системы определяется электромагнитными полями при помощи комплексной теоремы Пойнтинга. Она состоит из активного сопротивления и индуктивности:

$$R_{\text{ind}} = \frac{2\pi N^2}{l\omega\epsilon_0} \text{Re} \left[\frac{iKr_0 J_1(Kr_0)}{\epsilon_p J_0(Kr_0)} \right], \quad (1.22)$$

$$L_{\text{ind}} = L_{\text{coil}} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_c^2} \right) + \frac{2\pi N^2}{l\omega^2\epsilon_0} \text{Im} \left[\frac{iKr_0 J_1(Kr_0)}{\epsilon_p J_0(Kr_0)} \right], \quad (1.23)$$

которые зависят от концентрации электронов через комплексную электромагнитную проницаемость ϵ_p и $K \equiv k_0 \sqrt{\epsilon_p}$ – комплексное волновое число в плазме, где $k_0 \equiv \omega/c$ – волновое число в свободном пространстве, где c – скорость света в вакууме, а N – число витков трансформатора. Полное сопротивление системы, состоящее из реактивных и активных компонентов, может быть получено с помощью теоремы Пойнтинга для гармонических переменных по времени полей [86]. Общий вклад мощности, состоящий из суммы рассеянной и

запасенной электромагнитным полем мощностей в цилиндре радиуса r , определяется выражением

$$\tilde{P} = -\frac{1}{2}\widetilde{E}_\theta(r_0)\widetilde{H}_z(r_c)2\pi r_c l = \frac{1}{2}Z_{ind}I_{coil}^2, \quad (1.24)$$

где Z_{ind} – общий комплексный импеданс системы.

Из электромагнитной модели можно получить и значения L_{mp} и R_p – эквивалентное сопротивление плазмы.

$$L_{mp} = \frac{\mu_0 \pi r_0^2}{l}. \quad (1.25)$$

Выражение (1.25) не применимо при низкой концентрации электронов, где ток не локализован в скин-слое. Ток возникает от электрического поля, имеет максимум на границе плазмы и спадает линейно от границы к центру при низкой плотности электронов. В этом случае L_{mp} равна половине величины, представленной в выражении (1.25).

Эквивалентная цепь с общими параметрами системы построена на основе уравнений Максвелла для электромагнитных полей при помощи комплексной теоремы Пойнтинга. (см. рисунок 1.34).

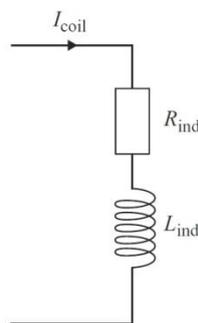


Рисунок 1.34 – Эквивалентная схема плазменной нагрузки на индуктор

При низкой концентрации электронов имеем $L_{ind} \approx L_{coil}$, то есть плазма не вносит свой вклад в индуктивность. При высокой концентрации $L_{ind} = L_{coil} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_c^2}\right)$. В этом случае магнитное поле, возбуждаемое индуктором, частично компенсируется магнитным полем, производимым токовым витком в плазме.

В случае низкой концентрации электронов ток в плазме очень мал и возрастает вместе с концентрацией электронов.

Сопротивление плазмы согласно трансформаторной модели можно найти по формуле

$$R_p = \frac{R_{ind}}{N^2}. \quad (1.26)$$

В режиме низкой концентрации, когда $v_m \ll \omega$, выражение для определения сопротивления плазмы принимает вид

$$R_p = \frac{\pi r_0}{\sigma_m l \delta}, \quad (1.27)$$

а в противоположном случае, при высоком давлении, –

$$R_p = \frac{\pi r_0 \omega_{pe}}{\sigma_m l c} \left(\frac{2\omega}{v_m} \right)^{1/2}. \quad (1.28)$$

Здесь $\sigma_m = e^2 n_e / m_e v_m$ – электропроводность плазмы, $\omega_{pe} \equiv \left(\frac{n_{e0} e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2}$ – частота взаимодействия электронов в плазме, так называемая плазменная частота, n_{e0} – концентрация электронов в центре плазменного образования.

Из выражения (1.18) можно получить взаиминдуктивность системы посредством выражения:

$$M^2 \omega^2 = \left[R_p^2 + \left(\omega L_{mp} + R_p \left(\frac{\omega}{v_m} \right) \right)^2 \right] \frac{|\tilde{I}_p|^2}{I_{coil}^2}. \quad (1.29)$$

Используя уравнения (1.20) и (1.21), получаем:

$$R_s = R_{coil} + R_p \frac{|\tilde{I}_p|^2}{I_{coil}^2}, \quad (1.30)$$

$$L_s = L_{coil} - \left(L_{mp} + \frac{R_p}{v_m} \right) \frac{|\tilde{I}_p|^2}{I_{coil}^2}. \quad (1.31)$$

Для того чтобы сформулировать общую трансформаторную модель ВЧИ-разряда, необходимо максимально корректно вычислить поглощённую мощность. Для этого используется выражение $R_p |\tilde{I}_p|^2 = R_{ind} I_{coil}^2$, которое приводит к:

$$R_s = R_{coil} + R_{ind}, \quad (1.32)$$

$$L_s = L_{coil} - L_{mp} \left(\frac{R_{ind}}{R_p} \right) - \frac{R_{ind}}{v_m}. \quad (1.33)$$

Таким образом, сопротивление R_s в полной мере соответствует электромагнитной модели. Как бы то ни было, оказывается, что L_s не равно L_{ind} во всем диапазоне концентраций электронов, хотя они имеют общие пределы на граничных значениях концентраций электронов. При высокой концентрации электронов $R_{ind} = N^2 R_p$, а инерционная часть R_{ind}/v_m мала, следовательно, индуктивность преобразуется в

$$L_s \approx L_{coil} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_c^2} \right). \quad (1.34)$$

На рисунке 1.35 показано сравнение индуктивностей трансформаторной модели L_s и электромагнитной модели L_{ind} во всем диапазоне концентраций электронов. Разница довольно значительна лишь в среднем диапазоне.

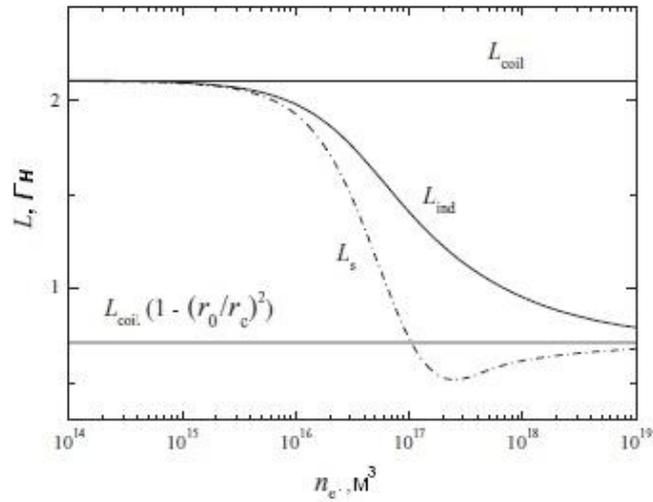


Рисунок 1.35 – Индуктивность в трансформаторной модели. L_s относится к индуктивности, полученной в трансформаторной модели, L_{ind} как функция концентрации электронов для $v_m/\omega = 1$. Выбраны $N = 5$, $r_0 = 0,065$ м, $r_c = 0,08$ м и $l = 0,3$ м

Таким образом, взаимоиנדуктивность M остается реальной величиной. Взаимоиנדуктивность является функцией плотности электронов, что подразумевает изменение коэффициента связи трансформатора. Коэффициент связи трансформатора определяется выражением $M^2/L_{coil}L_{mp}$, следовательно, он невелик, когда значение взаимоиנדуктивности мало и приближается к единице, когда связь идеальна. В случае трансформатора, выполненного из двух уложенных длинных соленоидов, этот коэффициент является отношением радиуса внутренней обмотки r_0 к радиусу внешней r_c . Рисунок 1.36 показывает величину коэффициента связи для трансформатора ВЧИ-разряда как функцию концентрации электронов, рассчитанную через M в уравнении (1.29). При высокой концентрации электронов имеем $M^2/L_{coil}L_{mp} \rightarrow r_0/r_c$, потому что ток течет в скин-слое, и плазма, в самом деле, ведет себя как одновитковая внутренняя обмотка. При низкой концентрации электронов коэффициент связи снижается по той причине, что ток, наведенный в плазме, распространяется поперек по радиусу ГРК.

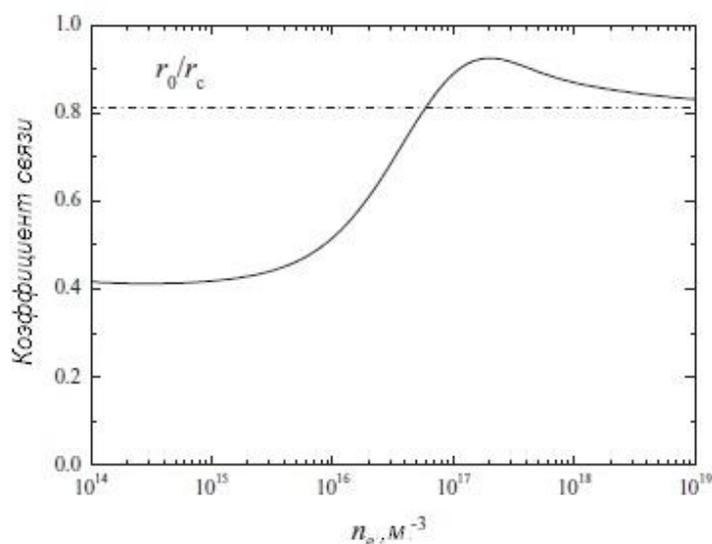


Рисунок 1.36 – Коэффициент связи как функция концентрации электронов

Заметим, что при высокой концентрации электронов получим $L_S \approx L_{coil} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_c^2}\right)$. Если диэлектрическое окно бесконечно тонкое, то $\frac{r_0^2}{r_c^2} \approx 1$, следовательно, $L_S \approx 0$. Это случай идеального трансформатора, для которого индуктивное сопротивление вторичной обмотки полностью компенсирует реактивное сопротивление первичной, таким образом, первичная цепь становится чисто активной. Для наибольшей взаимоиндуктивности необходимо сохранять окно таким тонким, чтобы расстояние между индуктором и плазмой было наименьшим, и коэффициент связи – наибольшей [84].

1.3.1 Выводы из трансформаторной модели

Из трансформаторной модели плазмы ВЧИ-разряда можно сделать следующие выводы:

1. Сопротивление плазмы является постоянно убывающей функцией концентрации электронов, в то время как ток плазмы увеличивается при низкой концентрации электронов до насыщения при $I_p = NI_{coil}$.
2. Сопротивление R_S должно увеличиваться при низких концентрациях электронов n_e , проходя через максимум и снижаясь затем при дальнейшем росте n_e .

3. Для достижения вышеизложенного взаимоиנדуктивность в трансформаторной модели должна быть функцией концентрации электронов.

4. Строго говоря, комплексная взаимоиנדуктивность (M с мнимой и реальной частями) требуется для модельного описания сопротивления и индуктивности трансформированной цепи во всем диапазоне концентраций электронов. Здесь M предполагается чисто реальной за счет приблизительной формы выражения для индуктивности.

5. В общем, можно сделать вывод, что трансформаторная модель хорошо применима для высоких концентраций электронов и имеет некоторые ограничения в случае низких и средних концентраций.

6. При расчетной концентрации плазмы в ГРК ВЧИИП $(2 - 5) \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ трансформаторная модель может использоваться для оценок при проектировании.

1.4 Выводы раздела 1

На основе изложенного материала раздела можно сделать следующие выводы:

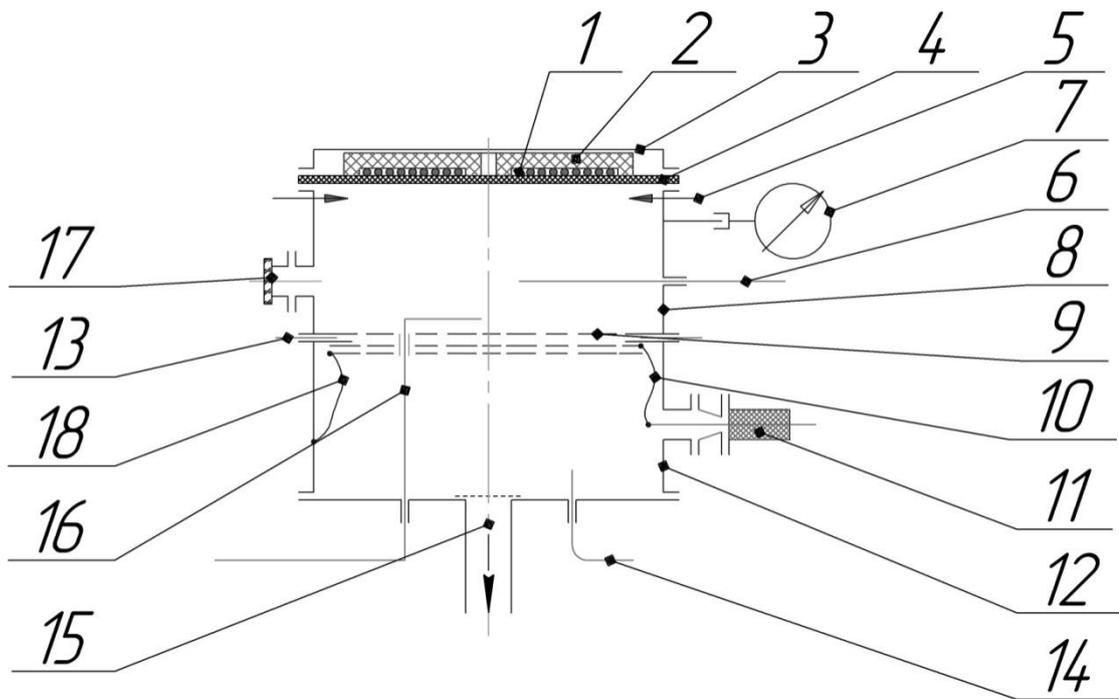
1. Для решения задач создания ВЧИИП с максимальной степенью однородности плазменного образования по радиусу ГРК следует использовать плоский индуктор.
2. Для повышения коэффициента взаимоиנדуктивности между индуктором и плазмой необходимо использование ферритового сердечника с высокой температурой Кюри (для работе в вакууме) и высокой магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$.
3. Диэлектрическое окно между индуктором и плазмой необходимо делать максимально возможной тонким для повышения степени взаимоиנדуктивности между ними.
4. Трансформаторная модель наиболее полно и точно описывает ВЧИ-разряд. При этом плазма и индуктор моделируются как две обмотки трансформатора.

2. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ВЧИИП И УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕГО ИСПЫТАНИЙ И ОТРАБОТКИ

В качестве модели для проработки возможности создания инжектора ионного пучка была принята схема с плоским индуктором, частично охваченным ферритовым сердечником с установкой этого узла на диэлектрической стенке в торце металлической ГРК [87]. Таким образом, индуктор оказывается на воздухе, что позволяет избежать ряда проблем с паразитными утечками ВЧ-мощности на гермовводах, сокращаются потери в линии электропитания разряда, так как СУ может быть установлено максимально близко к ГРК, и общие потери. Металлическая ГРК обеспечивает проведение зондовых измерений и контроль давления в ГРК. Толщина диэлектрического окна определяет эффективность передачи мощности в разряд [88], поэтому она должна быть минимальной выдерживающей воздействие атмосферного давления. Прототипом данной модели послужило устройство, составившее предмет изобретения [89] и детально изученное экспериментально в [70]. Основные мотивы такого выбора – 1) стремление организовать плоское и по возможности равномерное плазменное образование перед ИОС, обеспечивающее минимум потерь заряженных частиц плазмы на боковых стенках газоразрядного узла; и 2) применение ферритового сердечника индуктора существенно повышает эффективность передачи ВЧ-энергии в ВЧИ-разряд.

Для обеспечения малого угла расходимости пучка важно поддержать одинаковой величину ионного тока в каждой точке пространства в зоне около ЭЭ ИОС. Создание высокой степени равномерности распределения параметров плазмы в ГРК позволит обеспечить равномерный приведенный первеанс пучков ионов в отдельных ячейках ИОС. А использование ферритового сердечника с плоским индуктором повысит энергоэффективность газоразрядной системы. В предыдущем разделе показано, что ферритовый сердечник увеличит взаимоиндуктивность индуктора с плазмой и тем самым снизит потери и повысит энергоэффективность ВЧИИП. Исследование такого ВЧИИП и анализ его характеристик создадут важный задел в области развития ВЧИД в данном направлении.

Первоначально была выбрана металлическая ГРК. Его конструкция обеспечивала простоту проведения диагностики локальных параметров плазмы и возможность контроля давления в ГРК. Диагностика локальных параметров плазмы зондами Ленгмюра позволит изучить степень однородности плазменного образования вблизи ЭЭ ИОС. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1.



1 – индуктор в виде плоской спирали, разомкнутый в сторону газоразрядного пространства; 2 – ферритовый сердечник, разомкнутый в сторону газоразрядного пространства; 3 – крышка индукторного узла; 4 – диэлектрическое окно; 5 – подача ксенона; 6 – радиально-подвижный одиночный зонд Ленгмюра; 7 – высоковакуумный датчик давления; 8 – газоразрядная секция вакуумной камеры; 9 – трёхэлектродная ИОС; 10 – токоподвод потенциала УЭ; 11 – гермоввод токоподвода УЭ; 12 – ионно-пучковая секция вакуумной камеры; 13 – изолятор; 14 – технологический зонд; 15 – откачной патрубков; 16 – вращательно-и поступательно-подвижный одиночный зонд Ленгмюра; 17 – смотровое окно; 18 – заземление

ЗЭ

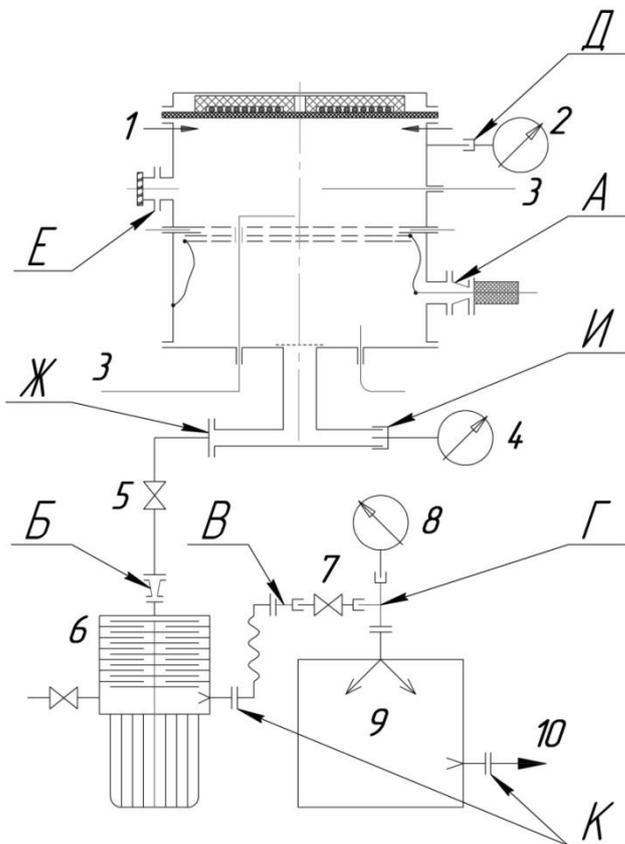
Рисунок 2.1 – Конструктивная схема установки для исследования характеристик ГРК ВЧИИП

В её газоразрядном пространстве удобно размещаются радиально-подвижный 6 и продольно-поворотно-подвижный 16 зонды Ленгмюра, а также вакуумный датчик давления 7. Вакуумная камера установки состоит из двух секций – газоразрядной 8 и ионно-пучковой 12. Предусмотрена возможность визуального наблюдения за горением разряда и перемещением зондов Ленгмюра с помощью смотрового окна 17.

На стыке двух секций 8 и 12 вакуумной камеры размещена трёхэлектродная ИОС, включающая ЭЭ, контактирующий с плазмой разряда, за ним следует ускоряющий электрод (УЭ) и далее – замедляющий электрод (ЗЭ). Высокий положительный потенциал подаётся на корпус газоразрядной секции вакуумной камеры, электрически соединённой с ЭЭ, а

относительно небольшой отрицательный потенциал УЭ подаётся через гермоввод 11. При такой системе распределение потенциалов ИОС корпус газоразрядной секции вакуумной камеры электроизолирован от ионно-пучковой секции с помощью изолятора 13 и для обеспечения электробезопасности персонала должен быть окружён диэлектрическим защитным кожухом, например, из оргстекла (на схеме не показан). Данная установка получила название ВЧИИП-10Ф, где последняя буква обозначает на применение индуктора с ферритовым сердечником.

Схема варианта данной установки в настольном исполнении представлена ниже (см. Рисунок 2.2). Такой вариант позволил облегчить проведение измерений параметров источника, как интегральных, определяющих эффективность генерации плазмы по методике [90], так и локальных свойств плазменного образования при помощи диагностики зондами Ленгмюра [91].



Переходники:

- A-NW25/16 – сам+хомуты
- Б-NW50/DN40CF – хомут NW50
- В-NW16/3/4"VCRмама – сам+хомут NW16
- Г-3/4"VCRмама/3/4"VCRпапа/KF16(NW16)-хомут KF25(NW25)

Фиттинги:

- Д-3/4"VCR – комплект
- Е-NW25 – хомут
- Ж-NW50 – хомут
- И-Ultratorr – комплект
- К-NW16(KF16) – 2 хомута+половинка с патрубком
- 1. Подача Хе
- 2. Датчик давления MKS Baratron 627A-1198
- 3. Зонд Ленгмюра
- 4. Лампа ионизационная
- 5. Клапан Varian Vacuum Valve
- 6. Турбомолекулярный насос Varian Turbo-V70
- 7. Клапан Key High Vacuum Valve SA-50-VCR
- 8. Датчик давления Varian TC Gauge L6141-303
- 9. Механический насос Anest Iwata ISP-90
- 10. Выхлоп механического насоса

Рисунок 2.2 – Вакуумная система настольного исполнения для испытания газоразрядной секции ВЧИИП-10Ф

Объём ГРК составил около $1.9 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. Для обеспечения безмасляной откачки вакуумной камеры были использованы следующие средства откачки:

1. турбомолекулярный насос Varian Turbo-V70, США (откачка безмасляная со скоростью откачки $68 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при предельном разрежении – 8×10^{-10} Торр);
2. спиральный механический насос Anest Iwata ISP-90, Япония (откачка безмасляная, скорость откачки – $1,5 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, предельное разрежение – $3,8 \times 10^{-2}$ Торр).

В качестве высоковакуумных средств измерений были применены MKS Baratron 627A-1198 и Pfeiffer IKR 251, а в качестве низковакуумных – датчик Пирани Pfeiffer TPR 280.

Схема линии электропитания ВЧИ-разряда, включающая трансформаторное СУ представлена ниже (см. рисунок 2.3).

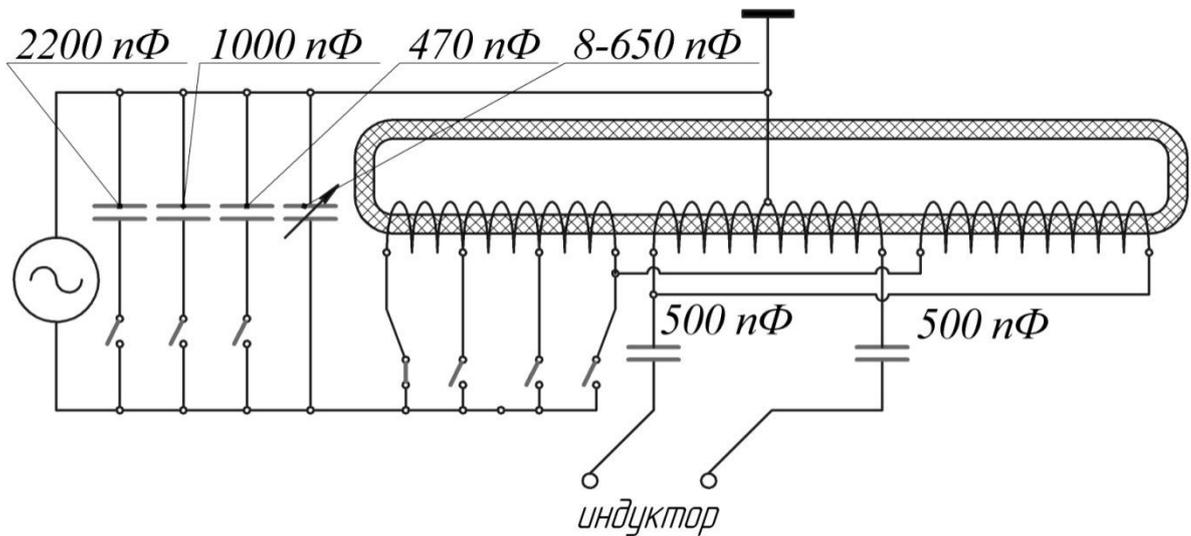


Рисунок 2.3 – Схема передачи ВЧ-мощности от ВЧГ к индуктору

В качестве ВЧГ был использован генератор Seren R601-13, США (рабочая частота регулируется в диапазоне 1.7 – 2.1 МГц, максимальная мощность – 600 Вт). Линия передачи ВЧ-мощности от ВЧГ к индуктору содержала измеритель ВЧ-мощности (падающей и отражённой) на выходе ВЧГ и СУ трансформаторного типа. Такой тип СУ обеспечивает наименьшие потери в линии электропитания разряда. Данное СУ трансформаторного типа представляет собой секционированный понижающий ВЧ-трансформатор, выполненный на ферритовом кольце. Центральная точка подключённой к индуктору средней секции трансформатора, заземлена с целью симметризации напряжения на индукторе, что способствует снижению в два раза ВЧ-плавающего потенциала плазмы разряда. В результате уровень ВЧ-компоненты на слое объёмного заряда зонда Ленгмюра снижается, что увеличивает надёжность локальных измерений. Параметры СУ были подобраны для рабочей частоты 1.8 – 2 МГц. Данное СУ было смонтировано и предварительно испытано совместно с индуктором.

Конструкция ГРК источника ионов в варианте, соответствующем вышеприведенной схеме для проведения интегральных и локальных измерений (см. рисунок 2.1), представлена ниже (см. рисунок 2.4). Данная настольная система для проведения измерений вне большой вакуумной камеры условно названа в работе «малой установкой».

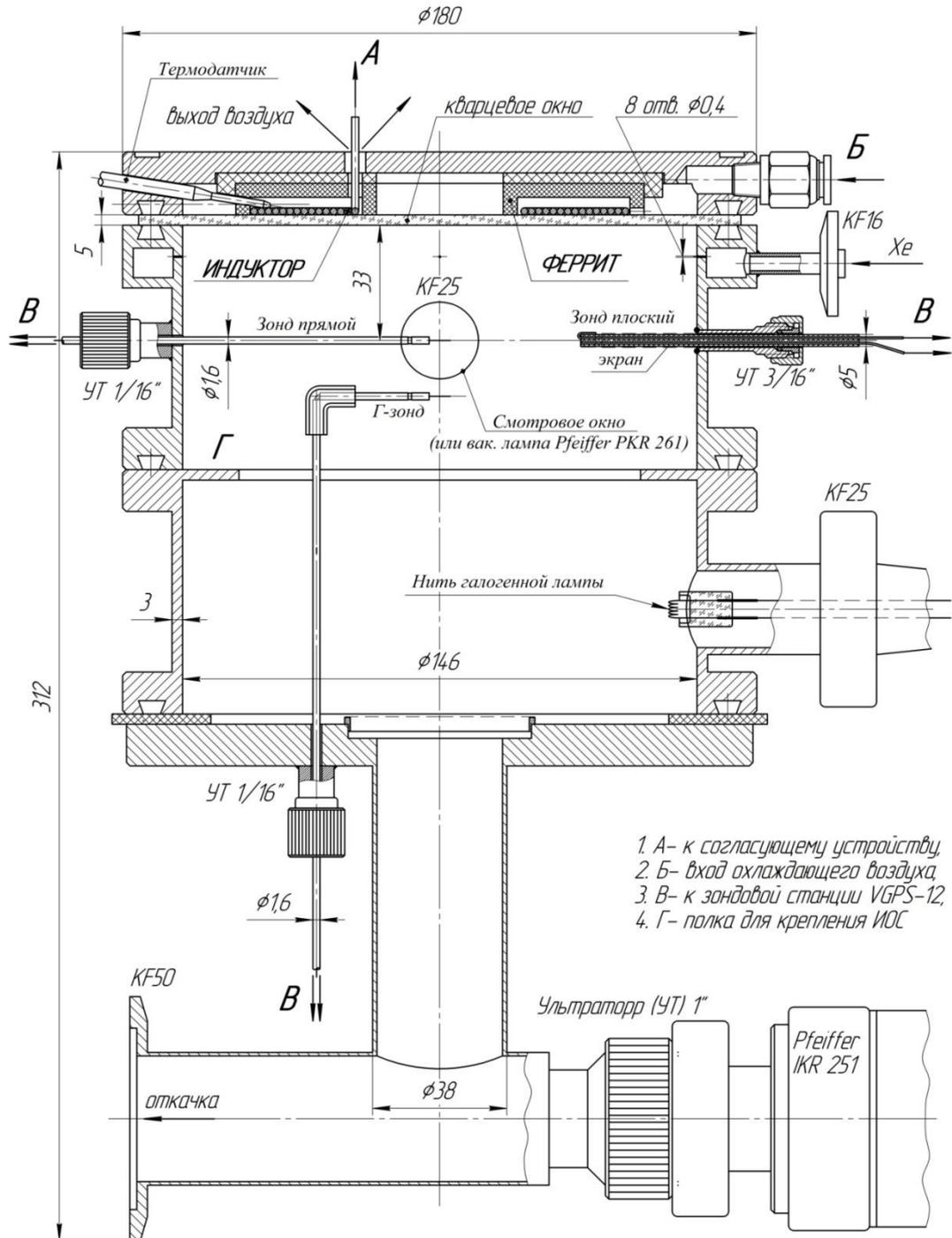


Рисунок 2.4 – Общий вид настольной «малой установки» ВЧИИП-10Ф без ИОС

В данном варианте экспериментальной установки ИОС в конструкции узла не использовалась, поскольку защитная сетка (для турбомолекулярного насоса) на выходном патрубке создавала согласно результатам измерений такое же газодинамическое сопротивление

потоку подаваемого в разряд ксенона, за счет чего в газоразрядном пространстве устанавливалось требуемое динамическое давление ксенона для работы с ИОС – 2 мТорр. Диагностика плазмы проводилась с помощью зондовой станции Plasma Sensors VGPS-2012, США. Электронные узлы данной станции не могут работать при потенциале плазмы относительно земли выше 200 – 250 В, а на электроизолированный ЭЭ ИОС предполагается подача напряжения до 4.5 кВ относительно потенциала земли. Таким образом, в настоящее время зондовые измерения не могут быть совмещены с извлечением ионного пучка из плазмы ВЧИ-разряда в данной установке. Однако, как известно из ранее выполненных исследований ВЧИ-источников ионов [65], интегральные параметры ВЧИ-плазмы очень консервативны по отношению к процессу извлечения из неё ионов. Поэтому зондовая диагностика ВЧИ-плазмы при отсутствии ИОС дала вполне значимые результаты по свойствам ГРК для изучения данной системы.

Полномасштабное использование ИОС было реализовано в варианте «большой установки» (см. рисунок 5.32), то есть на вакуумном стенде большого объёма. Здесь используется переходной фланец для присоединения ионного источника к вакуумному стенду У2В-2 объёмом около 20 м³ с безмасляной откачкой тремя криогенными насосами Velco-1250 до предельного динамического вакуума порядка 10⁻⁷ Торр. В этом варианте проведено исследование работы ИОС и генерируемого ионного пучка в требуемом диапазоне его параметров.

Предполагалось два возможных варианта исполнения ВЧИИП – атмосферное и вакуумное (см. рисунки 2.5, 2.6). В качестве основного был выбран атмосферный вариант (рисунок 2.5), который позволил избежать проблем с подачей ВЧ-мощности через гермовводы, и связанные с этим потери, проблемы согласования из-за увеличения длины линии электропитания разряда и проблемы охлаждения индуктора.

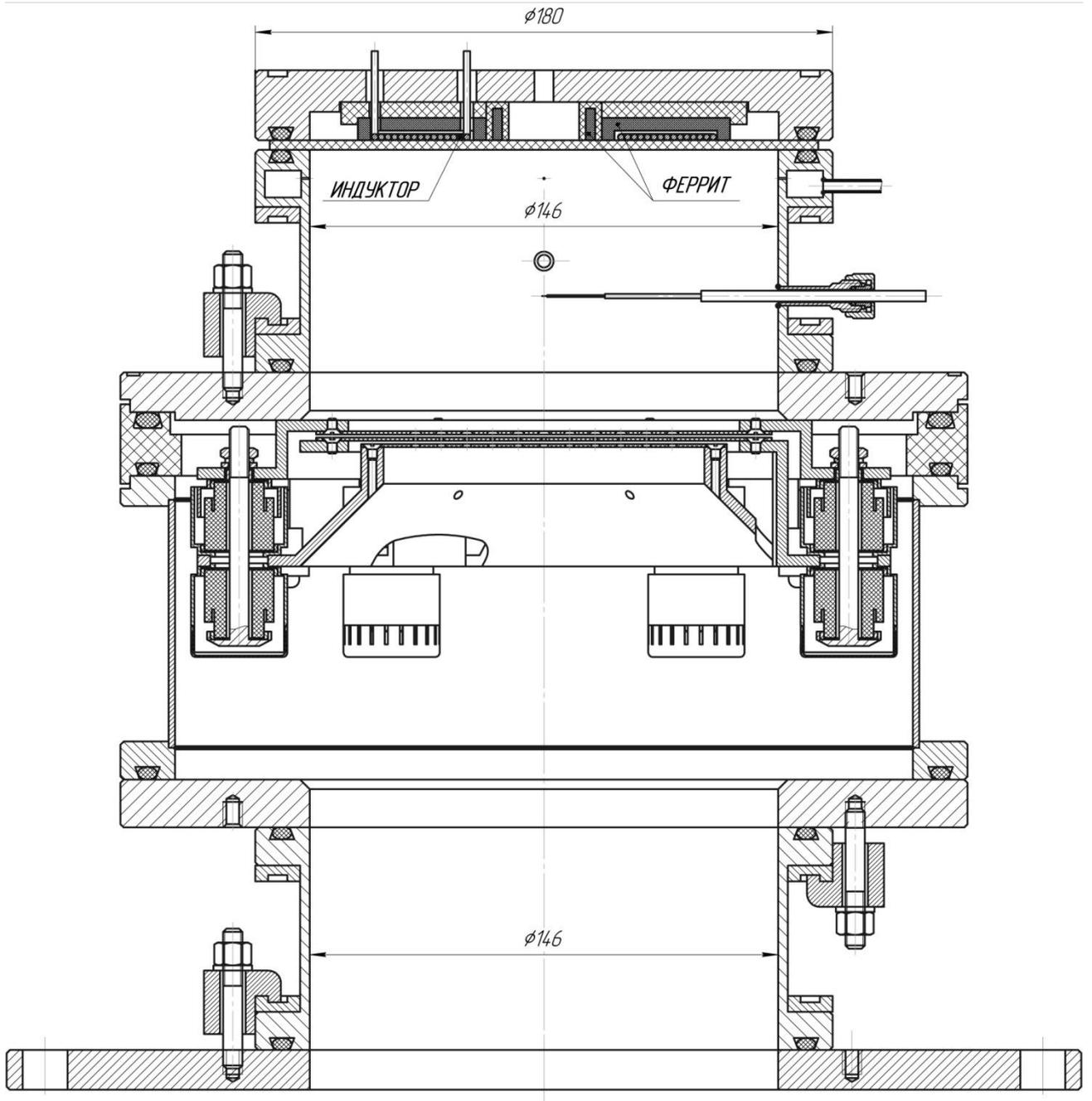


Рисунок 2.5 – Конструкция ВЧИИП-10Ф в варианте «большой установки» в атмосферном
ИСПОЛНЕНИИ

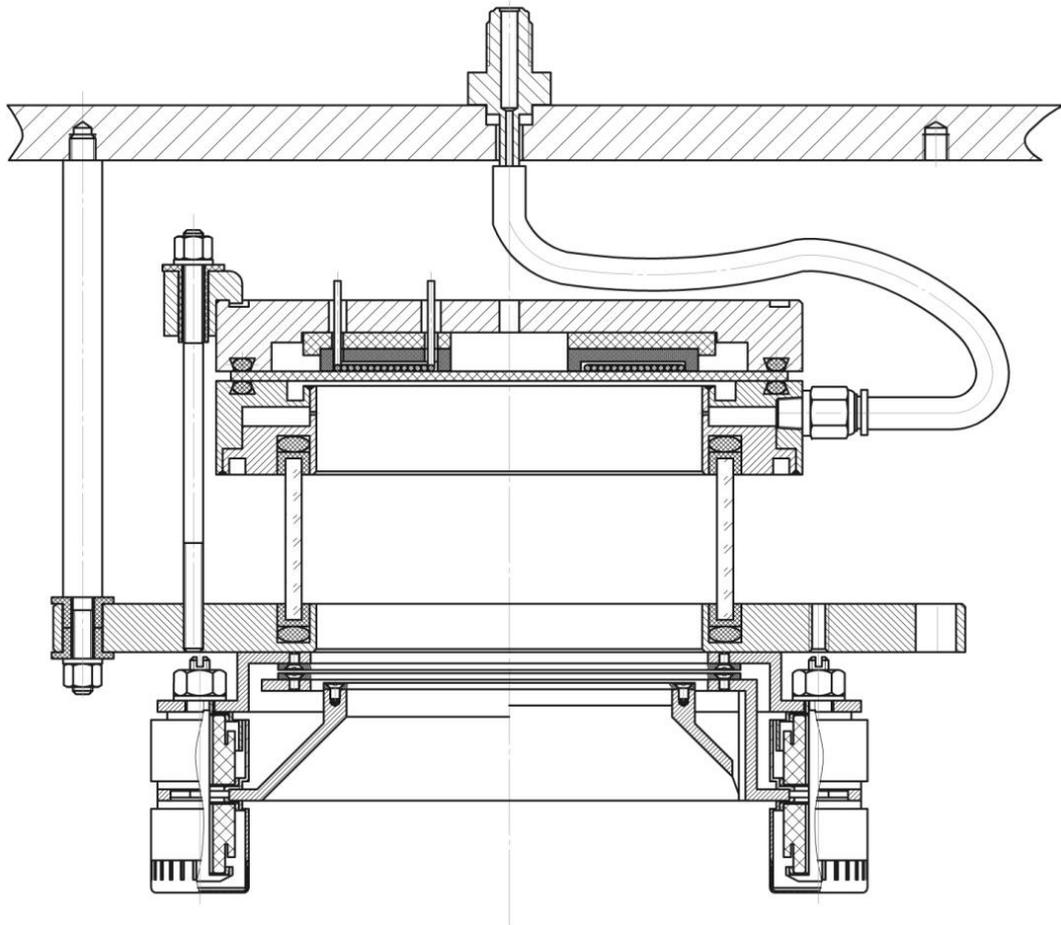


Рисунок 2.6 – Конструкция ВЧИИП-10Ф в варианте «большой установки» в вакуумном исполнении

2.1 Проведение подготовительных работ для диагностики источника

Общий вид установки с откачной системой показан на рисунке 2.7. Результаты испытаний показали, что предельный статический вакуум в газоразрядном пространстве установки достиг $p = 1,8 \cdot 10^{-6}$ Торр. Давление в откачном тройнике при этом составило $p = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Торр.



Рисунок 2.7 – Общий вид установки «малая установка»

В этих экспериментах в качестве измерителей вакуума использовались датчики фирмы Pfeiffer: в вакуумной камере – PKR261, в откачном тройнике – IKR251, на входе форвакуумного насоса – TPR280. Отметим, что в ходе экспериментов с ВЧИ-разрядом при повышенной мощности ($P \geq 250$ Вт) вакуумная камера разогревалась до температур порядка 100°C , что приводило к заметному обезгаживанию стенок вакуумной камеры, и предельный вакуум в газоразрядном пространстве снижался почти до $1 \cdot 10^{-6}$ Торр. Такое явление, конечно, уменьшало загрязняющую примесь воздуха в потоке ксенона, но мало отражалось на давлении плазмы в газоразрядном пространстве. При расходе ксенона $q = 2$ смл/мин. динамическое давление в ГРК составляло $p \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Торр.

2.2 Отработка системы поджига разряда

Поджиг разряда в данной установке производился путём введения в газоразрядное пространство нагреваемой вольфрамовой нити галогеновой лампы, как показано на чертеже рисунка 2.5. Практически эту задачу решил ввод в вакуумное пространство вскрытой кварцевой колбы галогенной лампы G5.38 (60 Вт, 12 В) через стандартный керамический гермоввод. Её

вольфрамовая нить, нагреваемая высокочастотным током (на частоте 40 кГц) от блока питания Feron TRA203 служила источником электронов. Свободные электроны возбуждали ВЧИ-разряд при подаче на нить постоянного отрицательного потенциала порядка -100 В относительно заземлённой вакуумной камеры. Внешний вид ГРК при горении в ней ВЧИ-разряда показан на рисунке 2.8.

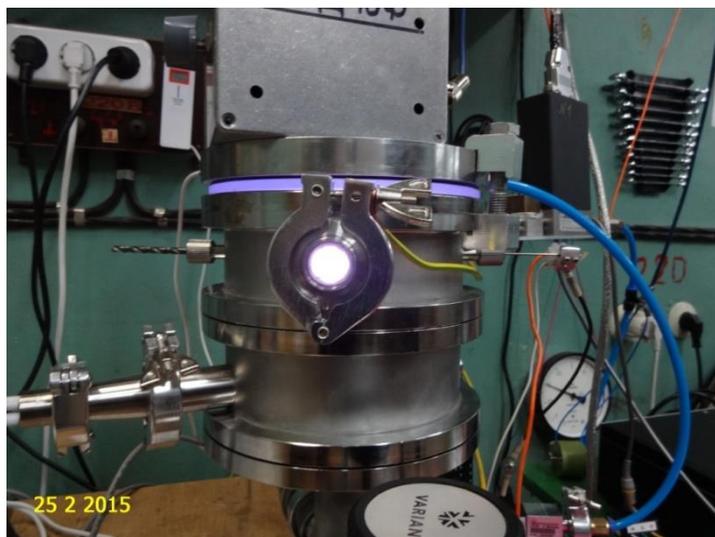


Рисунок 2.8 – Вид вакуумной камеры во время ВЧИ-разряда в ней при мощности ВЧГ ~200 Вт

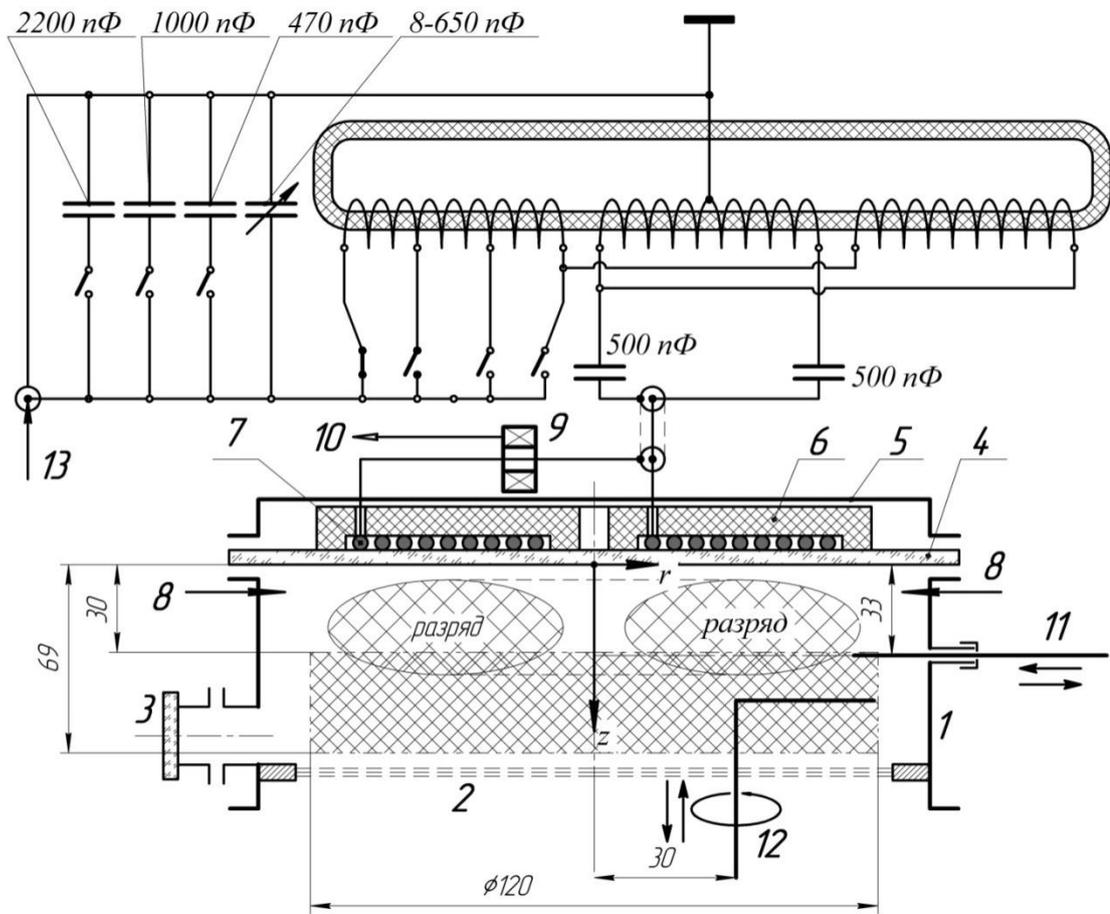
Горение ВЧИ-разряда в варианте «большой установки» представлено на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Горение ВЧИ-разряда в варианте «большой установки» при падающей мощности ВЧГ – 100 Вт

2.3 Разработка СУ

Схема разработанного СУ вместе со схемой газоразрядного узла представлена на рисунке 2.10. Его внешний вид представлен на рисунках 2.11 и 2.12.



1 – вакуумная камера, 2 – ИОС, 3 – смотровое окно, 4 – кварцевое окно между плазмой и индуктором, 5 – крышка узла индуктора, 6 – ферритовый сердечник индуктора, 7 – индуктор, 8 – подача ксенона, 9 – пояс Роговского Pearson mod. 2878, 10 – прямой зонд Ленгмюра, 11 – Г-образный зонд Ленгмюра

Рисунок 2.10 – Схема доработанного СУ вместе со схемой газоразрядного узла ВЧИИП-10Ф

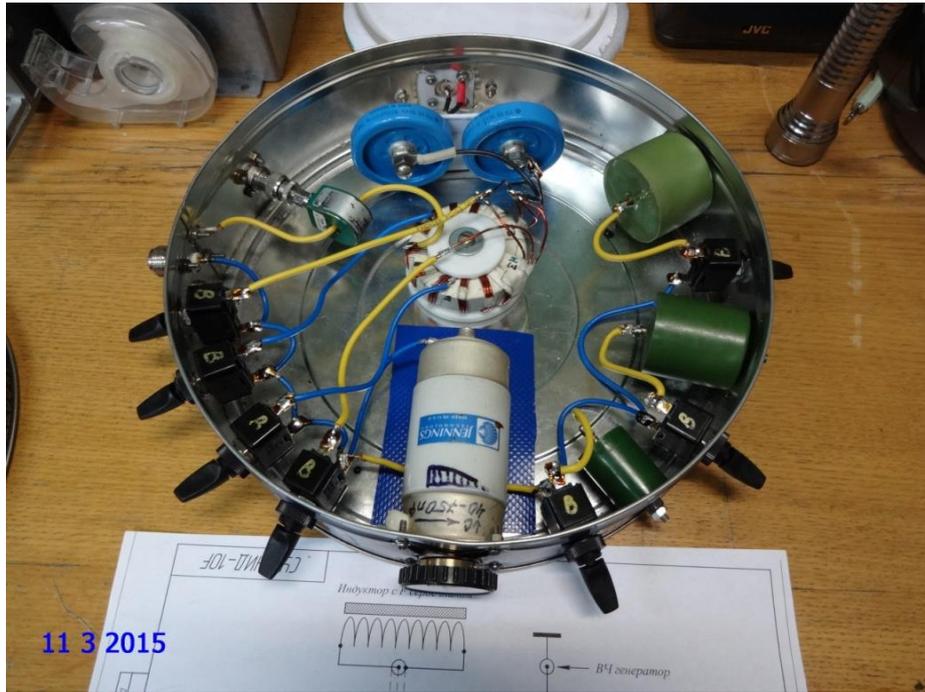


Рисунок 2.11 – Внешний вид СУ



Рисунок 2.12 – Разработанное СУ в составе станда

На рисунке 2.11 виден пояс Роговского Pearson Electronics, Inc., model 2878, установленный на одном из выводов согласующего трансформатора и предназначенный для регистрации «чистого» тока индуктора (без добавления токов возможных утечек). На рисунке 2.12 виден кабель, соединяющий СУ с экранированным выводом индуктора на его крышке. Кроме того, в нижней секции ГРК видны выводы пусковой галогенной лампы, подсоединённой к её блоку питания Feron TRA203, а также источник постоянного напряжения, стоящий на ВЧГ Seren R601, вывод которого подключён красным проводом к пусковой кнопке (на левой

опорной стойке главного вакуумного клапана). Испытания данного СУ показали его возможность точного согласования нагрузки с ВЧГ при падающей мощности до 300 Вт включительно.

2.4 Выводы раздела 2

В данном разделе кратко описано создание модели ВЧИИП-10Ф. Из двух разработанных устройств была выбрана модель с индуктором, расположенным в атмосфере. На данном этапе такое решение позволило избежать проблем с подачей ВЧ-мощности через гермовводы и связанных с этим потерь, проблем согласования, в связи с увеличением длины линии электропитания разряда и проблем охлаждения индуктора. Был разработан настольный стенд, позволяющий провести полный комплекс исследований газоразрядного узла.

Выполненные конструкторские, электротехнические и доводочные работы привели к созданию установки, позволяющей провести необходимый объем исследований интегральных характеристик ГРК и локальных характеристик генерируемой в ней плазмы.

3. МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЧИ-УСТРОЙСТВ И ДИАГНОСТИКИ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРИРУЕМОЙ В НИХ ПЛАЗМЫ

3.1 Методика проведения оценки интегральных и технических характеристик газоразрядного узла ВЧИИП-10Ф

Целью интегральной диагностики с целью оценки интегральных и технических параметров ГРК ВЧИИП-10Ф явилось определение эффективности (КПД) ввода ВЧ-мощности непосредственно в плазму газового разряда. Интегральная диагностика ВЧИ-газоразрядного блока, проводимая для изучения его работы, позволяет увязать техническое состояние и физические особенности устройства, которые определяются пространственными распределениями фундаментальных параметров плазмы – ФРЭЭ $f(\varepsilon)$, концентрации электронов n_e , температуры электронов T_e и электрического потенциала плазмы. Эти параметры обусловлены поглощением плазмой разряда ВЧ-мощности, передаваемой от ВЧГ по линии передачи ВЧ-мощности, включающей кабели, разъёмы и СУ. Соображение о корректности физического анализа рабочего процесса ВЧИ-систем, требующего обязательного знания ВЧ-мощности разряда для сопоставления с результатами диагностики ВЧИ-газоразрядной плазмы, было высказано в работе [92].

Регистрация мощности разряда составляет суть наиболее распространённого метода интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядных систем, отражающего общую энергетическую эффективность системы. Если в [92] необходимость сопоставления данных интегральной диагностики газоразрядного узла и диагностики локальных параметров плазмы ВЧИ-системы была сформулирована в словесной форме, то в [70] приведены выражения, следующие из закона Ома, где фигурируют падающая мощность ВЧГ P и отражённая от нагрузки мощность $P_{отр}$, разность которых представляет прошедшую к нагрузке мощность $P_{tr} = P - P_{отр}$, а эффективность передачи ВЧ мощности в разряд P_p , или энергетический КПД «генератор-плазма» η_p , представляет собой отношение P_p/P_{tr} , которое записывается как

$$\eta_p = \frac{P_p}{P_{tr}} = 1 - (I/I_0)^2. \quad (3.1)$$

Здесь токи индуктора I и I_0 , измеренные при горении разряда и в его отсутствие, соответственно, определены через активные компоненты $R_{пэ}$, R_l и $R_{и}$ комплексных импедансов: плазмы $Z_{пэ}$ (эквивалентное сопротивление, включённое последовательно в цепь индуктора согласно трансформаторной модели ВЧИ-разряда [68]), линии передачи ВЧ-мощности Z_l , содержащей СУ, кабели и разъёмы, и индуктора $Z_{и}$, соответственно.

При точном согласовании ВЧГ с нагрузкой напряжения на всех реактивных элементах цепи передачи ВЧ-мощности в ВЧИ-разряд оказываются взаимно скомпенсированы. При этом цепь питания разряда становится чисто активной, позволяя определять её параметры согласно закону Ома, лежащему в основе выражения (3.1).

Наиболее полный, классический метод интегральной диагностики ВЧИ-разряда был предложен в работе [68]. В ней описана упомянутая трансформаторная модель ВЧИ-разряда и представлен метод его интегральной диагностики для общего случая частичного согласования ВЧГ с нагрузкой, содержащей активные и реактивные компоненты. Согласно методу [68] считаются известными априори электротехнические параметры индуктора – добротность, индуктивность и активное сопротивление, а также теплофизические свойства газоразрядной плазмы, включая частоту столкновений электронов. В теоретической части работы [68] выведены аналитические выражения для оценок интегральных, пространственно усреднённых параметров плазмы ВЧИ-разряда. В экспериментальной части измерялись ток I , напряжение V цилиндрического индуктора и фазовый сдвиг φ между ними при отсутствии и горении разряда. В итоге получены компоненты комплексного импеданса индуктора, средние величины тока и импеданса разряда, напряжённость электрического поля, величина разряда, потери ВЧ-мощности в индукторе и КПД η_p .

В настоящем подразделе предложена модифицированная, технически расширенная методика интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла ВЧИИП [90] при неизвестных заранее локальных свойствах плазмы. Измеряемыми параметрами являются токи индуктора I и I_0 , фиксируемые измерителями тока на заземлённом выводе индуктора и на выходной линии ВЧГ при точном его согласовании с нагрузкой. Предлагаемая методика, включающая определение ВЧ-мощности разряда, позволяет получить физико-техническое описание 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, который, следуя классической работе [68], включает предварительно найденные электротехнические параметры индуктора, измеряемые, в отличие от [68], в два этапа – при

размещении индуктора в свободном пространстве (вдали от электропроводящих деталей) и в составе собранной конструкции [93]. В набор индикаторов введены также данные о суммарных токах утечки ВЧ-мощности и ряд расчётных параметров цепи разряда, всесторонне характеризующих техническое состояние системы.

3.1.1 Предварительные измерения параметров индуктора

Параметрами, определяемыми на рабочей частоте f , являются добротность (см. формулу 3.5), индуктивность $L_{и}$ и активное сопротивление $R_{и}$ индуктора.

Измеряются они с помощью Q-метра при подключении к нему индуктора, составляющего вместе с приборным калиброванным переменным конденсатором последовательный измерительный контур L - C . Собственная ёмкость индуктора $C_{сб}$ определяется согласно выражению

$$C_{сб} = (C_f - 4C_{2f})/3. \quad (3.2)$$

Индуктивность катушки вычисляется по формуле Томпсона (3.3)

$$\omega = 2\pi f = (LC)^{-1/2}; \quad (3.3)$$

$$L_{и} = [4\pi^2 f^2 (C_f + C_{сб})]^{-1}, \quad (3.4)$$

а её активное сопротивление находится через определение добротности Q , где

$$Q = \omega L_{и}/R_{и}. \quad (3.5)$$

Измерение этих параметров в свободном пространстве, т.е. вдали от электропроводящих деталей, даёт максимально возможные значения добротности индуктора $Q_{св}$ и индуктивности $L_{исв}$, а также минимальную, собственную величину активного сопротивления индуктора $R_{исв}$. При размещении индуктора в собранной системе в её металлических деталях ВЧ-магнитное поле индуктора наводит вихревые токи. Их влияние определяется при повторном измерении тех же параметров, Q , L и R , в составе собранной конструкции. Обозначим эти величины индексом «0» – Q_0 , $L_{и0}$ и $R_{и0}$, который указывает на исходное состояние системы без разряда, до его возбуждения. Результаты этих измерений показывают степень влияния конструкции системы на электротехнические параметры индуктора: добротность Q_0 уменьшается из-за вихревых токов в металлических деталях конструкции, электрическое сопротивление которых

согласно трансформаторной модели ВЧИ-разряда вносит в активное сопротивление индуктора $R_{исв}$ эквивалентное слагаемое $R_{ивэ}$, т.е.

$$R_{и0} = R_{исв} + R_{ивэ}, \quad (3.6)$$

а собственное магнитное поле вихревых токов, характеризуемое индуктивностью $L_{в}$, компенсирует создавшее их внешнее поле, несколько уменьшая $L_{исв}$, т.е.

$$L_{и0} = L_{исв} - L_{в}. \quad (3.7)$$

Именно с этих параметров начинается формирование набора конструктивных индикаторов системы: $Q_{св} \equiv K1, L_{исв} \equiv K2, R_{исв} \equiv K3, Q_0 \equiv K4, L_{и0} \equiv K6, R_{и0} \equiv K8,$

$$\Delta Q_{св} = 100\%(Q_{св} - Q_0)/Q_{св} \equiv K5, \quad (3.8)$$

$$\Delta L_{исв} = 100\%(L_{исв} - L_{и0})/L_{исв} \equiv K7, \quad (3.9)$$

$$\Delta R_{ивэ} = 100\%(R_{и0} - R_{исв})/R_{исв} \equiv K9, \quad (3.10)$$

здесь и далее заглавная буква «К» перед номером индикатора означает «конструктивный».

Отметим, что высокая добротность и относительно небольшое активное сопротивление индуктора означают пониженный уровень потерь ВЧ-мощности в нём и, следовательно, повышенную энергетическую эффективность системы η_p .

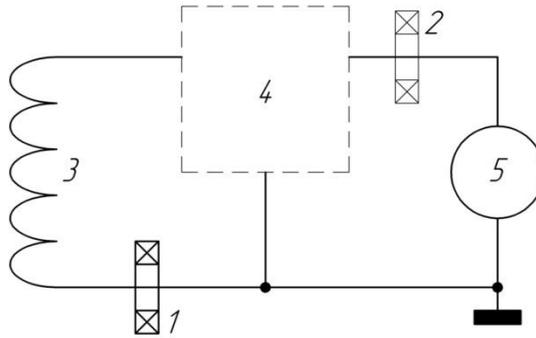
3.1.2 Измерение тока индуктора без разряда

Данное измерение осуществляется без включения подачи рабочего газа в газоразрядное пространство при поддержании в нём вакуума не хуже $\sim 10^{-3}$ Па или атмосферного давления (чтобы условия для возбуждения разряда соответствовали дальним частям обеих ветвей кривой Пашена для остаточного газа в ГРК). На индуктор подаётся ВЧ мощность через СУ, регулировкой которого в ручном или автоматическом режиме отражённая мощность $P_{отр}$ сводится к нулю и затем фиксируется ток индуктора без разряда I_0 . Для этой цели используют измерительный трансформатор тока, в качестве которого обычно применяют пояс Вальтера Роговского, охватывающий проводник с измеряемым током.

Предлагаемая методика интегральной диагностики ВЧИ-системы [94] включает в себя измерение как «чистого» тока индуктора, ответственного за возбуждение и поддержание ВЧИ-разряда, так и этого же тока в сумме с возможными неконтролируемыми утечками по всей линии электропитания разряда. Для этого предлагается использовать два измерителя ВЧ-тока,

размещённые на заземлённом выводе индуктора и на выходной линии ВЧГ. Первый прибор, который назовём главным измерителем, фиксирует «чистый» ток индуктора. Вторым, контрольный измеритель, регистрирует этот ток в сумме с токами неконтролируемых утечек, протекающих в обход индуктора, параллельно ему.

Утечки тока могут возникнуть в любых элементах линии электропитания ВЧИ-разряда. Вначале рассмотрим типичную схему ВЧИ-системы с непосредственным заземлением индуктора, представленную на рисунке 3.1.



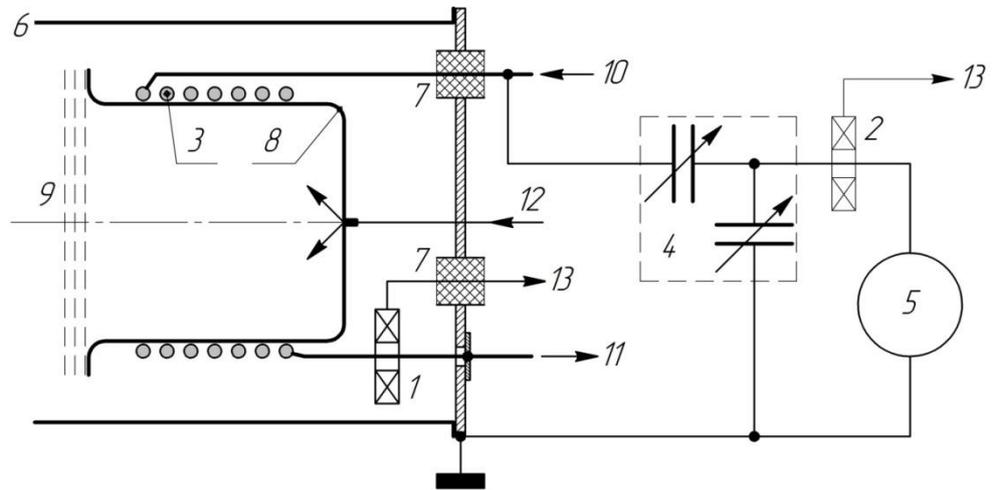
1 и 2 – главный и контрольный измерители тока индуктора, соответственно,
3 – индуктор, 4 – СУ, 5 – ВЧГ

Рисунок 3.1 – Схема ВЧИ-газоразрядной системы с прямым заземлением индуктора

Видно, что утечка тока в СУ (в кабеле, разъёмах и в заземляемых деталях) параллельна индуктору. Она может играть основную роль при использовании индуктора в среде атмосферного давления [68, 70, 92] и проявится в случае некачественного исполнения кабелей, разъёмов и деталей СУ. Если же всё ВЧИ-устройство [95] или его часть в виде ГРК, водоохлаждаемого индуктора и ИОС размещены в вакууме [96], то возможности для неконтролируемых утечек ВЧ-мощности становятся вполне реальными и разнообразными. В качестве примера на рисунке 3.2 приведена схема ионного источника [96, 97].

В данном источнике потери ВЧ-тока могут возникнуть в СУ, в изоляторе вакуумного гермоввода 7 для высоковольтного вывода индуктора 3 в виде поверхностного разряда, в ёмкостном разряде между индуктором и заземлёнными деталями конструкции и во входном потоке 10 охлаждающей индуктор воды. Каналы перечисленных потерь схематически изображены на рисунке 3.3.

Отметим, что газоразрядные каналы утечек ВЧ-тока (7 и/или 8) реализуются при подаче в вакуумную камеру рабочего газа. Если при этом зажигается также и ВЧИ-разряд (см. ниже), то в канале 3 последовательно с исходным активным сопротивлением индуктора $R_{и0}$ возникнет также эквивалентное активное сопротивление плазмы $R_{пз}$.



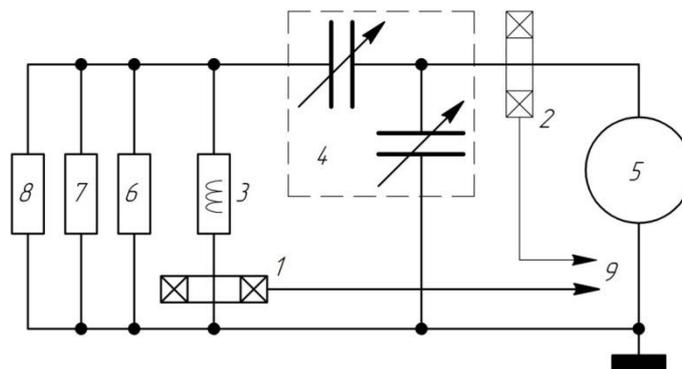
1 и 2 – главный и контрольный измерители тока индуктора, соответственно, 3 – индуктор, 4 – автоматическое конденсаторное СУ, 5 – ВЧГ, 6 – вакуумная камера, 7 – вакуумные гермовводы, 8 – кварцевая ГРК, 9 – ИОС, 10 и 11 – вход и выход охлаждающей воды в индуктор, соответственно, 12 – подача рабочего газа, 13 – подвод к ВЧ-вольтметру

Рисунок 3.2 – Схема ВЧИИП [96, 97]

Совместное измерение тока в обеих позициях 1 и 2 позволяет получить зависимости I_{10} и I_{20} , а при наличии неконтролируемой утечки ВЧ-тока определится также их относительная разность

$$\Delta I_{\text{ут0}} = 100\% [I_{20} - I_{10}] / I_{10}. \quad (3.11)$$

представляющая величину тока утечки в процентах от «чистого» тока индуктора. Все три функции зависят от конструкции и схмотехники системы, поэтому их следует считать конструктивными индикаторами К10, К11 и К12, соответственно.



1 и 2 – главный и контрольный измерители тока индуктора, соответственно, 3 – активное сопротивление индуктора в составе конструкции $R_{\text{и0}}$, 4 – емкостное СУ, 5 – ВЧГ, 6 – поток охлаждающей воды, 7 – поверхностный разряд в вакуумном гермовводе высоковольтного вывода индуктора, 8 – ВЧ-емкостной разряд между индуктором и заземлёнными деталями конструкции, 9 – подвод к ВЧ-вольтметру

Рисунок 3.3 – Схема линии электропитания ВЧИ-разряда в ВЧИИП [96, 97]

Схемотехническое решение и исполнение линии электропитания индуктора, а также конструкции системы при отсутствии в ней ВЧИ-разряда определяют минимальное сопротивление линии и, следовательно, верхний предел ВЧ-тока индуктора I_0 . Вычисления по закону Ома дают ещё три конструктивных параметра: минимальное напряжение нагрузки, равное выходному напряжению ВЧГ

$$V_{н0} = P/I_0 \equiv K13; \quad (3.12)$$

сопротивление нагрузки

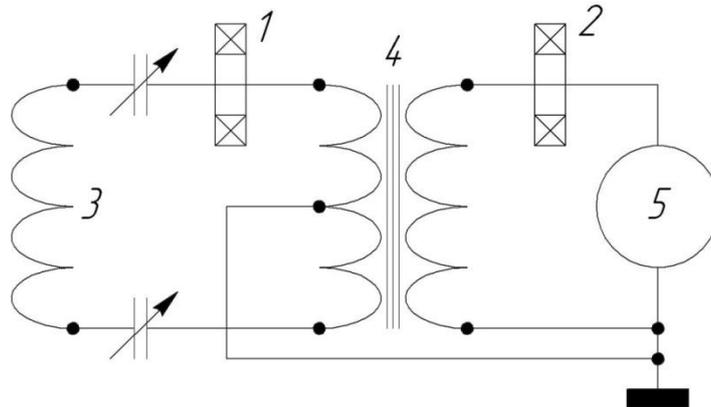
$$R_{н0} = V_{н0}/I_0 \equiv K14, \quad (3.13)$$

равное выходному сопротивлению ВЧГ, и КПД «генератор-индуктор»

$$\eta_{ги0} = P_{и0}/P = R_{и0}/R_{н0} \equiv K15. \quad (3.14)$$

Таким образом, число конструктивных индикаторов системы, характеризующих её конструкцию и схемотехнику, оказалось равным пятнадцати.

В случае трансформаторного СУ возможно заземление индуктора через выходную обмотку согласующего трансформатора, заземлённую в средней точке для симметризации напряжения разряда [70].



1 и 2 – главный и контрольный измерители тока индуктора, соответственно,

3 – индуктор, 4 – согласующий трансформатор, 5 – ВЧГ

Рисунок 3.4 – Трансформаторное СУ [70]

Приведённый вариант трансформаторного СУ интересен тем, что в экспериментах [70] наряду с удобством локальных зондовых измерений в ВЧИ-разряде он обеспечил высокую энергоэффективность системы: $\eta_p = 0,8 - 0,95$ при давлении плазмы $p = 7,5 - 75$ мТорр и мощности разряда $P_p \leq 400$ Вт. В этой работе индуктор находился в среде атмосферного давления, поэтому неконтролируемые утечки ВЧ-мощности в такой системе были мало вероятны.

3.1.3 Измерение тока индуктора при горении ВЧИ-разряда

При горении ВЧИ-разряда в атмосфере рабочего газа с заданным расходом в обеих позициях измерителей ВЧ-тока регистрируются зависимости тока от падающей мощности ВЧГ при точном его согласовании с нагрузкой. В результате получаем две зависимости тока от мощности ВЧГ: I_1 , измеренную на заземлённом выводе индуктора, и I_2 , измеренную на выходном выводе ВЧГ. Обе функции определяются операционными параметрами разряда, поэтому их следует считать операционными контрольными индикаторами номера 1 и 2, 01 и 02. При наличии тока неконтролируемой утечки его относительная величина определится соотношением

$$\Delta I_{\text{ут}} = 100\%[I_2 - I_1]/I_1, \quad (3.15)$$

которое следует считать операционным индикатором системы 03.

Далее по закону Ома находим зависимости от мощности ВЧГ нескольких дополнительных параметров системы, которые обозначим операционными индикаторами с последующими номерами: напряжения на нагрузке ВЧГ

$$V_{\text{н}} = P/I_{(1,2)} \equiv 04, \quad (3.16)$$

(где $I_{(1,2)}$ – ток I_1 или I_2 , в зависимости от того, где установлен пояс Роговского, далее просто I) сопротивления нагрузки ВЧГ

$$R_{\text{н}} = V_{\text{н}}/I \equiv 05, \quad (3.17)$$

эквивалентного сопротивления плазмы разряда

$$R_{\text{пэ}} = R_{\text{н}} - R_{\text{н0}} \equiv 06, \quad (3.18)$$

и добротности индуктора при горении разряда

$$Q_{\text{р}} = \omega L_{\text{и0}}/(R_{\text{и0}} + R_{\text{пэ}}) \equiv 07. \quad (3.19)$$

Отметим, что в знаменателях первых двух выражений записан ток I – сумма «чистого» тока индуктора и токов утечки, потому что именно таков суммарный ток, протекающий в цепи электропитания разряда. Знание эквивалентного сопротивления плазмы позволяет определить частный КПД «генератор-индуктор»

$$\eta_{\text{ги}} = [R_{\text{и}} + R_{\text{пэ}}]/R_{\text{н}} \equiv 08. \quad (3.20)$$

Для физической интерпретации рабочего процесса изучаемого устройства важно знать не только падающую мощность ВЧГ, но и значения мощности, поглощённой плазмой ВЧИ-

разряда. Эту информацию даёт один из главных контрольных индикаторов ВЧИ-газоразрядного узла – конструктивно-операционный индикатор

$$KO1 \equiv \eta_p = P_p/P, \quad (3.21)$$

представляющий собой КПД передачи мощности от ВЧГ к разряду [90] (здесь P_p – поглощённая плазмой ВЧ-мощность, P – мощность ВЧГ). Поскольку в каждой точке измерений разряд точно согласовывался с ВЧГ, то все реактивности в линии электропитания разряда были взаимно скомпенсированы, и её параметры подчинялись закону Ома. В этих условиях выражение для КПД передачи ВЧ-мощности от ВЧГ к разряду определяется простым соотношением (3.1).

Измеренные «чистые» токи индуктора при отсутствии и горении разряда позволяют вычислить КПД передачи ВЧ-мощности в разряд η_p и абсолютную ВЧ мощность, поглощённую плазмой разряда,

$$P_p = \eta_p P. \quad (3.22)$$

Эта величина будет обозначена как KO2. Таким образом, общее число контрольных индикаторов ВЧИ-системы, включённых в рамки предложенной методики, достигло 25.

Предложенная методика интегральной диагностики предполагает получение двадцати пяти контрольных индикаторов путём измерений и расчётов. При таком их количестве они могут по-разному реагировать на различные особенности изучаемого ВЧИ-устройства, выявляя его физико-технический облик. Можно отметить, что реализация предложенной методики интегральной диагностики газоразрядного узла создаёт возможность, во-первых, наметить путь к повышению его энергоэффективности при наличии такой необходимости и, во-вторых, с достаточной полнотой подготовить базу для корректного понимания результатов диагностики локальных параметров плазмы ВЧИ-разряда.

Ниже приведены примеры практического использования предложенной методики интегральной диагностики ВЧИ-газоразрядного узла.

3.1.4 Реализации предложенной методики

Методика, предложенная выше, отличается от уже существующих тем, что на предварительном этапе диагностики измеряют активное сопротивление индуктора в свободном пространстве, исключая возникновение вихревых токов в электропроводящих деталях

конструкции, а контрольный измеритель тока индуктора, регистрирующий утечку ВЧ-мощности, устанавливаются на выходном выводе ВЧГ.

Впервые вышеописанная методика была апробирована на технологическом источнике RIM-20, принципиальная схема которого приведена на рисунке 3.2 [96, 97]. В экспериментах были получены контрольные индикаторы, чувствительные к току утечки. Их совокупность выявила технический облик изучавшегося источника ионов и наметила следующие три пути к повышению его энергоэффективности: а) уменьшение объёма металлических деталей вблизи индуктора, б) оптимизация геометрии и исполнения индуктора и в) оптимизация схемы СУ.

Намного более полно методика нашла свое применение в источнике ВЧИИП-10Ф. В ходе работ с ГРК источника были получены измерения как индуктора в свободном пространстве, так и в составе собранной конструкции. На данном этапе были получены первые 9 конструктивных индикаторов ВЧИ-газоразрядного узла K1 – K9.

При подаче напряжения на индуктор был получен конструктивный индикатор K10, который характеризует конструкцию и исполнение индуктора (материал, сечение, покрытие и т.д.) вместе с окружающими элементами конструкции, а также схмотехническое решение и исполнение СУ. Что касается контрольных индикаторов утечек ВЧ-мощности, то эти утечки ВЧ-мощности в данной модели ВЧИИП отсутствовали. Таким образом, в силу атмосферного исполнения и отсутствия потерь в гермовводах, отсутствовали индикаторы утечек O₂, O₃. Все остальные операционные и конструкционно-операционные индикаторы были получены в ходе интегральной диагностики. Детальное её описание и результаты приведены в разделе 4.

3.2 Особенности организации локальных измерений параметров плазмы посредством зондов Ленгмюра

Инструмент для проведения зондовых измерений в плазме обычно очень прост, однако в случае ВЧ-плазмы имеет ряд особенностей. Сложности зондовой диагностики возникают, во-первых, при организации регистрации зондовых характеристик, свободных от искусственных искажений, связанных с выбором размеров измерительного зонда, его зондодержателя и опорного зонда, с загрязнениями собирающей поверхности зонда, а также с ВЧ-наводками в зондовой цепи в случае работы с плазмой ВЧ-разряда. Во-вторых, весьма непроста задача

обработки и расшифровки полученных характеристик. Работа по преодолению указанных сложностей продолжалась многие десятки лет усилиями многих исследователей, и к настоящему времени многие из этих проблем удалось решить достаточно эффективно, как показано в обзоре [98]. В частности, там упомянута зондовая станция Plasma Sensors VGPS Probe System [99], обеспечивающая зондирование любой плазмы, включая высокочастотную, и выдающая в режиме реального времени полный набор традиционных зондовых параметров: ФРЭЭ, температуру T_e и концентрацию n_e электронов, зондовые потенциалы V_f и V_s , а также плотность электронного тока насыщения на зонд j_{es} . Анализ объективности этих измерений [100] показал, что точность измерений оказывается порядка $\pm 10\%$ по n_e и T_e и гораздо точнее определяют величины V_f , V_s и j_{es} .

3.2.1 Проведение зондовых измерений параметров плазмы

3.2.1.1 Использование автоматизированной зондовой станции VGPS-12

Локальные параметры плазмы измерялись с помощью классических цилиндрических зондов Ленгмюра, подключаемых к зондовой станции VGPS-12 Probe System фирмы Plasma Sensors [99]. Эта станция может использоваться как наиболее передовая система зондовой диагностики плазмы любых видов на основе последних достижений экспериментальной физики [100]. Её управляющая программа, организованная на основе программы LabView, использует метода Дрювестейна [101], согласно которому усреднённая вольт-амперная характеристика (ВАХ) зонда подвергается двойному дифференцированию. Вторая производная зондового тока пропорциональна ФРЭЭ, которая является измеряемым параметром, не требующим априорных предположений о форме. Эта особенность является важным достоинством метода Дрювейстейна.

Известно, что при уровне действующего значения ВЧ-составляющей плавающего потенциала плазмы не менее величины T_e (выраженной в электрон-вольтах) в зондовых характеристиках возникают искажения, приводящие к значительным ошибкам измерений. Для ликвидации этого эффекта в зондовую цепь включают последовательный набор фильтров-

пробок, настроенных на несущую частоту и на две-три последующие её гармоники [97, 90]. Отметим, что в случае ВЧИ-разряда при использовании ферритового сердечника индуктора повышенный коэффициент взаимоиנדукции индуктора с разрядом, в совокупности с симметризацией напряжения индуктора трансформаторным СУ действующее значение ВЧ-наводки на плавающем потенциале плазмы может оказаться существенно ниже уровня электронной температуры плазмы. При этом включение фильтров-пробок в зондовую цепь не требуется, что облегчает проведение зондовых измерений и повышает их точность. Например, в установке-прототипе [35], аналогичной устройству настоящей работы, при частоте $f = 2$ МГц измеренная наводка оказалась на порядок величины ниже электронной температуры $T_e \sim 3,5 - 4$ эВ (см. рисунок 3.7).

Алгоритм работы станции VGPS-12 построен следующим образом. В каждой точке измерений проводится предварительная регистрация зондовой характеристики, выводимой на монитор станции, и регулируется начальное напряжение и размах подаваемого на зонд пилообразного напряжения так, чтобы этот импульс с некоторым запасом фиксировал потенциал пространства V_s и обеспечивал длину ионной ветви характеристики порядка разности потенциалов пространства и плавающего потенциала $\Delta V_f = V_s - V_f$. Эта регулировка не причиняет зонду вреда, т.к. она способствует очистке от загрязнений его собирающей поверхности в дополнение к двум штатным методам очистки зонда ионной бомбардировкой и нагревом ВЧ-током с контролем его температуры. Начиная с этого момента, запускается программа, в течение двух секунд станция подаёт на зонд серию из 1000 пилообразных импульсов, регистрирует 1000 зондовых характеристик, анализирует их с удалением ошибок и усредняет и дважды дифференцирует усреднённую характеристику с последующим вычислением ФРЭЭ и интегрированием её для получения температуры T_e и концентрации n_e электронов. В течение этого же промежутка времени программа станции выдаёт на монитор зондовую характеристику, её производные, функцию вероятности распределения электронов по энергиям (ВРЭЭ) $ВРЭЭ = ФРЭЭ/\varepsilon^{1/2}$ (здесь ε - энергия электронов), а также величины T_e и n_e . Первый из них определяется переходом зондовой характеристики через ноль зондового тока, а потенциал пространства V_s находится по напряжению зонда, при котором вторая производная зондового тока обращается в нуль. Этот потенциал определяет плотность электронного тока насыщения зонда j_{es} в виде соответствующей точки на усреднённой зондовой характеристике, записанной в памяти компьютера. Общий вид программы дисплея компьютера при работе станции представлен на рисунке 3.5.

Здесь показана усреднённая ВАХ зонда в виде зависимости логарифма модуля зондового тока от разности потенциалов $V_f - V$ и две кривые – результаты двукратного

дифференцирования ВАХ. Справа дана ВРЭЭ, пропорциональная второй производной зондовой характеристики. Видно, что её размах по вертикали больше трёх порядков величины, т.е. динамический диапазон регистрации ВРЭЭ превышает 60 дБ, что является показателем высокого качества регистрации этой функции [100], определяющей всю совокупность результатов диагностики за исключением плавающего потенциала V_f . В качестве примера на рисунке 3.6 показаны графики зондовой ВАХ и её второй производной.

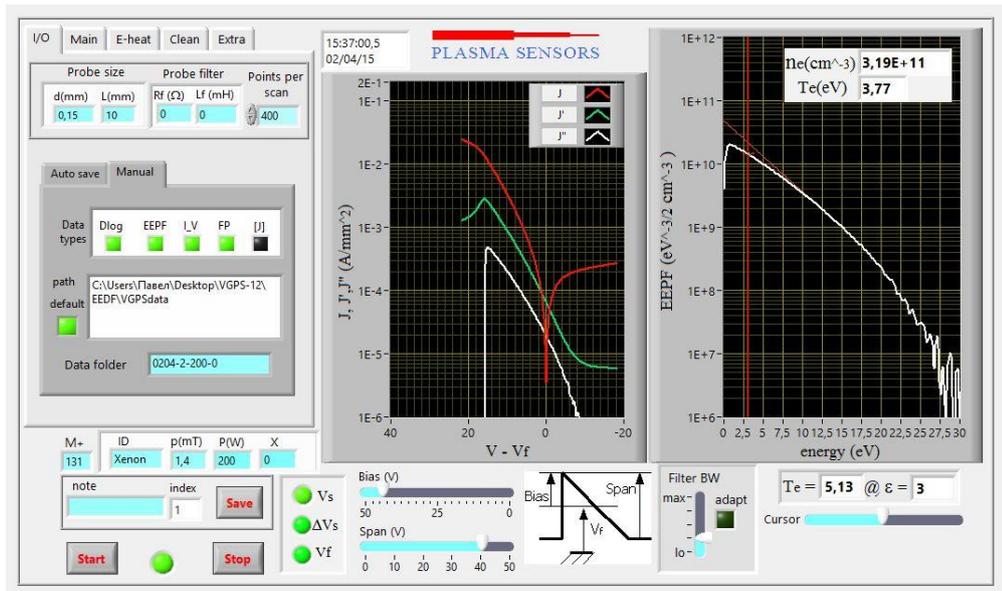


Рисунок 3.5 – Дисплей VGPS-12 для одиночного зонда с координатами $r = 0$, $z = 33$ мм для $p \approx 2$ мТорр и $P = 200$ Вт

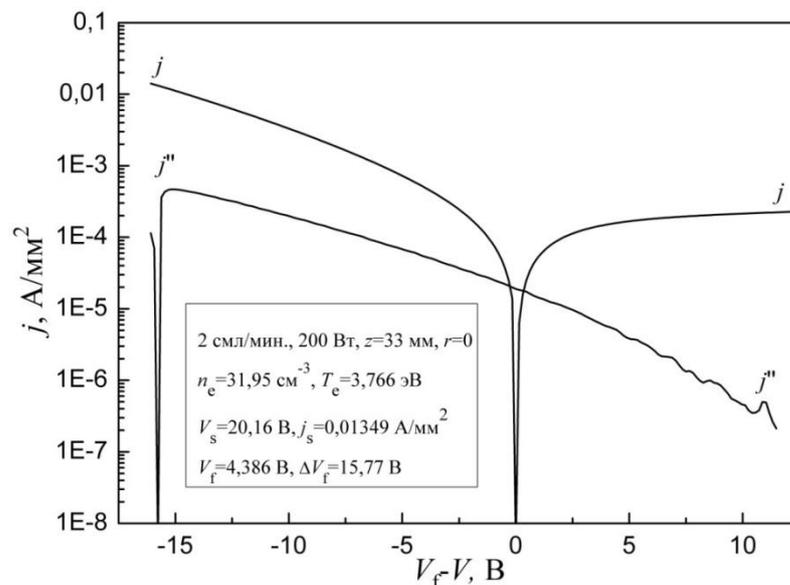


Рисунок 3.6 – Зондовая характеристика и её вторая производная, представляющая уточнённые данные рисунка 3.5

Несмотря на то, что в станции присутствует широкополосный фильтр для подавления ВЧ-наводок, в изучаемой ВЧИ-системе с плоским индуктором, ферритовым сердечником и симметричной подачей ВЧ-напряжения на индуктор ВЧ-наводка на зондовом слое объёмного заряда в формате действующего напряжения оказалось менее 1 В. Этот факт был экспериментально показан в работе [70] для ВЧИ-разряда в аргоне при давлениях $p = 1 - 1000$ мТорр, частоте 2 МГц и поглощённой плазмой ВЧ-мощности $P_p = 100$ Вт – см. рисунок 3.7, где результаты приведены для давления в диапазоне $p = 1 - 10$ мТорр.

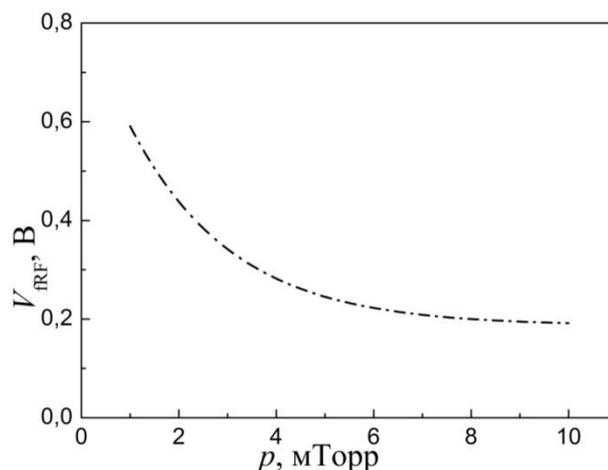


Рисунок 3.7 – Зависимость действующего значения ВЧ-плавающего потенциала в аргонной плазме от её давления при частоте 2 МГц [70]

Видно, что при рабочем давлении настоящей работы $p = 2$ мТорр и рабочей частоте 2 МГц ВЧ-напряжение на слое объёмного заряда при плавающем потенциале составило около 0,4 В. При такой наводке и $T_e \sim 4$ эВ, как указывалось выше, а также при использовании рядом с измерительными зондами опорных зондов с развитой поверхностью, устранявших большие части ВЧ-компонент плавающих потенциалов плазмы, включение ВЧ-фильтров в зондовую цепь не требуется.

3.2.1.2 Конструкция классических цилиндрических зондов Ленгмюра

Для диагностики локальных параметров ксеноновой плазмы ВЧИ-разряда при расходе ксенона $q = 2$ смл/мин и динамическом давлении $p \approx 2$ мТорр использовались цилиндрические

зонды из вольфрамовой нити диаметра 0,15 мм с длиной измерительного отрезка, равной 10 мм. Они размещались в одном из каналов двух- или четырёхканального керамического капилляра внешнего диаметра 0,88 мм. Снаружи этого капилляра находился отрезок стальной трубки внешнего диаметра 1,6 мм и длины 10 мм, который выполнял роль опорного зонда при измерениях параметров плазмы с помощью зондовой станции VGPS-12 [99]. Далее с зазором порядка нескольких миллиметров от опорного зонда находилась такая же трубка из нержавеющей стали, заземлённая в штуцере «Ultratorg 1/16″». Она служила экраном, защищавшим зондовую цепь от ВЧ-наводок. Отметим, что наружная поверхность этого экрана не имела изолирующего покрытия, поэтому он находился в гальваническом контакте с плазмой, что может вносить некоторые неточности в измерения [102], однако нанесение покрытия на данные зонды являлось бы нетривиальной задачей, а сами погрешности в данном случае были бы крайне невелики.

Чертёж и фото прямого цилиндрического зонда представлены на рисунках 3.8 и 3.9, соответственно.

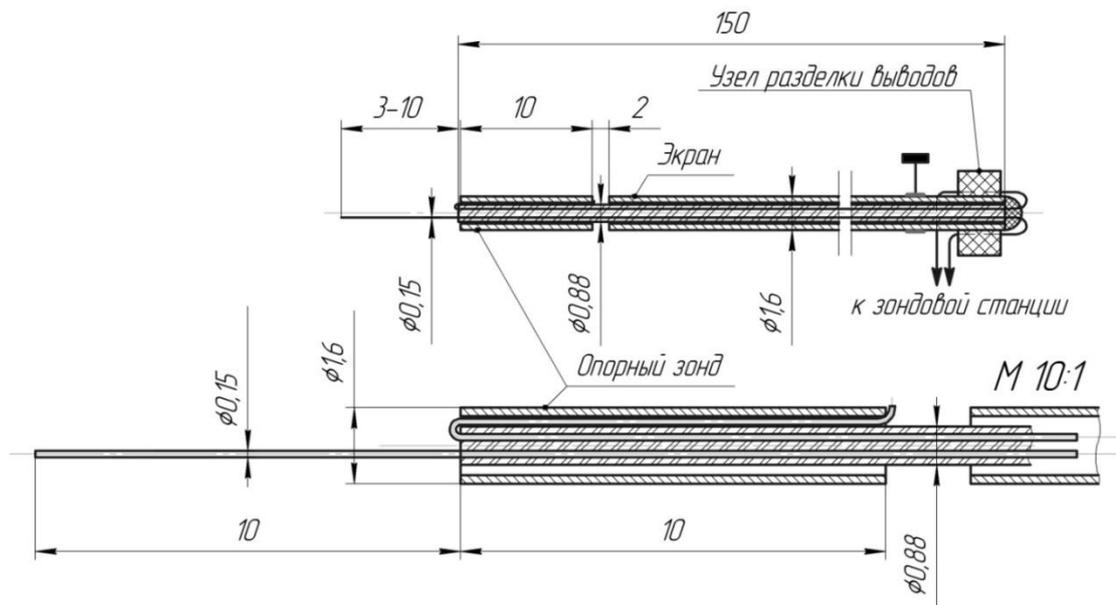


Рисунок 3.8 – Чертёж прямого зонда Ленгмюра



Рисунок 3.9 – Фото прямого зонда Ленгмюра

Его размещение в вакуумной камере на удалении 33 мм от внутренней поверхности кварцевого окна можно видеть на фотографии рисунка 3.10, сделанной сквозь это окно при снятом индукторном узле.

Напротив прямого цилиндрического зонда был установлен прямой плоский зонд диаметра 1,5 мм в торце керамического стержня диаметра 5 мм, расположенный на одной оси с прямым зондом в точке с координатами $z = 33$ мм и на радиусе $r = 30$ мм (половина хода прямого цилиндрического зонда). Ниже размещался Г-образный цилиндрический зонд, введённый в ГРК через нижнее днище вакуумной камеры, плоскость вращения которого находилась на расстоянии $z = 69$ мм от кварцевого окна.

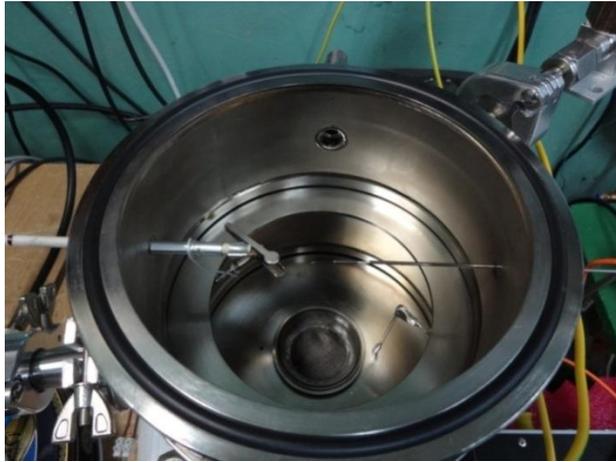


Рисунок 3.10 – Размещение зондов Ленгмюра в заземленной вакуумной камере, выполняющей роль зондового опорного электрода: прямые зонды (удаление от окна $z = 33$ мм): цилиндрический – справа, плоский – слева, Г-образный цилиндрический ($z = 69$ мм) – внизу

3.2.2 Расширение возможностей зондовой диагностики

В случае максвелловской ФРЭЭ толщину зондового слоя объёмного заряда и массу ионов можно оценить по результатам зондовых измерений. Для этого требуется близость реальной ФРЭЭ к максвелловской функции, которая обычно формируется в бесстолкновительной изотропной плазме. Эти условия обеспечивают применимость эффекта Бома, согласно которому плотность ионного тока на внешнюю поверхность зондового слоя объёмного заряда j_{ifcl} при плавающем потенциале зонда V_f определяется классической формулой Бома

$$j_{ifcl} = C_B e n_e (2kT_e / M_i)^{1/2}, \quad (3.23)$$

где C_B – коэффициент Бома для заданной геометрии зонда. Отсюда видно, что если измерены параметры такой плазмы T_e , n_e и J_{ifcl} , то специальный эксперимент с заведомо чистым плазмообразующим газом позволяет при совместном использовании формулы Бома (3.23) и уравнении Чайлда-Богуславского-Ленгмюра или «закона 3/2», определяющего связь J_{ifcl} с J_{if} , зафиксировать экспериментальную величину коэффициента Бома C_B [103]. В общем эксперименте с помощью этих уравнений, содержащих найденное значение C_B , на основе стандартной зондовой диагностики можно будет измерять толщины зондового слоя и ионную массу M_i [104-106].

В экспериментах настоящей работы использовался ксенон особой чистоты (согласно формуляру его содержание составило не менее 99,9999 %), причём вакуумная камера «малой установки» с безмасляной системой откачки готовилась к эксперименту с привлечением японского течеискателя Shimadzu MSE-2000R в поисках негерметичностей вакуумной камеры. Их устранение привело к достижению предельного статического вакуума на уровне $p \approx 10^{-6}$ Торр. Поэтому проведённые в настоящей работе опыты можно рассматривать как специальный эксперимент, позволяющий найти значение коэффициента Бома C_B для зондов использованной геометрии (в данном случае – цилиндрической) и тем обеспечить возможность измерений толщины слоя объёмного заряда и ионной массы рабочего газа по результатам зондовой диагностики.

Другая дополнительная возможность применения зондов Ленгмюра – использование имитатора плоского пристеночного зонда, обеспечивающего создание около него стационарного пристеночного слоя с характерными особенностями такой среды. Подобный слой образуется вблизи ЭЭ ИОС, и знание параметров плазмы около него весьма важно при разработке изучаемого в настоящей работе источника ионов. Такой зонд позволяет проконтролировать вид ФРЭЭ в данном слое и решить вопрос об оценке плотности ионного тока на ЭЭ ИОС.

3.2.2.1 Зондовый метод измерения толщины зондового слоя и массы ионов

Для рассмотрения возможности применения формул Бома, Больцмана и «закона 3/2» в первую очередь необходимо оценить длину свободного пробега заряженных электронов, что в

слабо ионизованной плазме, использовавшейся в настоящем эксперименте, можно сделать по формуле:

$$\lambda_e \sim (n_a Q_{ea}^{(1,1)})^{-1}. \quad (3.24)$$

Здесь n_a – концентрация атомов, а $Q_{ea}^{(1,1)}$ – диффузионное сечение электрон-атом, проинтегрированное по ФРЭЭ в первом приближении. Концентрация атомов была найдена по известному давлению и оценке температуры атомов $T_a \sim 500$ К (см. ниже), а $Q_{ea}^{(1,1)}$ была получена экстраполяцией данных Девото [52] (см. рисунок 4.5) для средней температуры электронов $T_e \sim 40000$ К. Длина свободного пробега электронов в условиях настоящего эксперимента эта длина оказалась порядка 7,6 см, что существенно превысило любые размеры зондов, включая их диаметральные размеры и толщины слоёв объёмного заряда. Таким образом, их взаимодействие с электронами плазмы было существенно бесстолкновительным при всех операционных параметрах разряда. Кроме того, при $T_a \sim 500$ К средняя тепловая скорость тяжёлых частиц составляет порядка $3 \cdot 10^4$ см/с, тогда как направленная скорость потока ксенона в камере диаметром 146 мм при расходе 2 смл/мин и давлении $2 \cdot 10^{-3}$ Торр составляет порядка 10^2 см/с, т.е. изучаемая плазма была практически изотропна.

Первым шагом в предложенном способе измерения толщины зондового слоя и массы ионов является оценка близости ФРЭЭ к максвелловской функции. Обычно это производится визуальной оценкой формы ВРЭЭ, которая для максвелловской плазмы должна быть линейна. Такая оценка является качественной. В настоящей работе ВРЭЭ в случае цилиндрических зондов оказались близки к линейности (см. рисунок 4.12).

Согласно предложению [107] близость ФРЭЭ к функции Максвелла можно оценить также и количественно. Для этого необходимо сопоставить измеренные экспериментальные величины электронного тока насыщения j_{es3} с плотностью электронного тока насыщения j_{esM} , рассчитанной для изотропной максвелловской плазмы

$$j_{esM} = (1/4)en_e(8kT_e/\pi m_e)^{1/2}, \quad (3.25)$$

при измеренных значениях плотности и температуры электронов n_e и T_e . В настоящем эксперименте в невозмущённой плазме j_{es3} оказалась примерно на 20 % ниже j_{esM} , что было расценено как примерная близость изучаемой среды к максвелловской плазме с инженерной точностью. Следовательно, в такой плазме формула Бома должна быть применима, что важно в плане функциональной связи между бомовской плотностью ионного тока j_{ifcl} на внешнюю поверхность зондового слоя для зонда под плавающим потенциалом и массой ионов M_i . Такая связь позволяет определить массу ионов на основании результатов зондовых измерений параметров плазмы при совместном использовании формул Бома, Болцмана и «закона 3/2».

Возможность контроля массы ионов M_i в изучаемом источнике ионов важна при сопоставлении экспериментальных данных по ионному пучку с расчётами ИОС ВЧИИП.

Согласно классическому эффекту Бома [100] в изотропной бесстолкновительной плазме у границы зондового слоя объёмного заряда формируется квазинейтральный переходный слой, в котором ионы ускоряются до электронных скоростей, соответствующих энергии электронов kT_e : $v_e = (2kT_e/M_i)^{1/2}$ (здесь $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T_e выражена в кельвинах, M_i – в килограммах). Ускоренные таким образом ионы поступают на собирающую поверхность зонда, формируя на этой поверхности при его плавающем потенциале зонда плотность тока, которая в случае изотропной максвелловской ФРЭЭ определяется выражением (3.25), где T_e выражена в кельвинах. При выражении T_e в электрон-вольтах эта формула приобретает вид

$$j_{ifсл} = 0,4en_e(2eT_e/M_i)^{1/2}. \quad (3.26)$$

Здесь $C_{Бц} = 0,4$ – расчетный коэффициент Бома [100] для цилиндрического зонда.

В работе [108] была рассмотрена сущность данного эффекта, переходная область у границы зондового слоя объёмного заряда была названа лимитационным слоем. Для цилиндрического зонда Ленгмюра было подтверждено значение бомовского коэффициента $C_{Бц} = 0,4$ [109], а также был найден коэффициент Бома для сферического зонда, который оказался равным $C_{Бсф} = 0,8$.

Ток ионного насыщения на плавающий зонд непосредственно не измеряется, потому что при плавающем потенциале зонда $V = V_f$, который чётко определяется зондовой характеристикой, зонд собирает равные величины ионного и электронного токов $j_{if} = j_{ef}$, где j_{if} – плотность ионного тока на собирающую поверхность цилиндрического зонда под плавающим потенциалом, обеспечивающих при $V = V_f$ отсутствие тока в зондовой цепи в момент пересечения зондовой характеристикой оси напряжения. Если зондируемая плазма бесстолкновительна, изотропна и характеризуется максвелловской ФРЭЭ, то торможение электронов в зондовом слое объёмного заряда подчиняется закону Больцмана, справедливому в бесстолкновительной максвелловской плазме:

$$n_{ef} = n_{e0} \cdot \exp(-\Delta V_f/T_e), \quad (3.27)$$

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

$$j_{ef} = j_{es} \cdot \exp(-\Delta V_f/T_e), \quad (3.28)$$

равную плотности ионного тока на зонд j_{if} .

Для задачи оценки массы ионов по результатам зондовой диагностики необходимо знать локальные величины температуры T_e и концентрации n_e электронов, а также плавающий

потенциал зонда V_f и потенциал пространства V_s вместе с соответствующей ему плотностью электронного тока насыщения j_{e0} . Методика оценки массы ионов и толщины слоя объёмного заряда [110, 111], состоит из следующих шагов:

1. Качественно и количественно анализируется измеренная ФРЭЭ на предмет её близости к распределению Максвелла [110], что было рассмотрено выше.

2. При подтверждении этой близости с помощью формулы (3.28) находят плотность электронного тока на зонд j_{ef} , равную плотности ионного тока j_{if} при $V = V_f$.

Полученное в (3.28) значение j_{if} должно быть преобразовано в плотность ионного тока на внешнюю поверхность слоя $j_{ifсл}$ через отношение a/R (a – радиус зонда, R – радиус слоя объёмного заряда вокруг цилиндрического зонда), которая определяется классической формулой Бома (3.23) с включённым в неё значением j_{if} и подлежащим экспериментальному подтверждению или коэффициентом $C_{Бц}$ для цилиндрического зонда:

$$j_{ifсл} = j_{if}(a/R) = C_{Бц} en_e (2eT_e/M_i)^{1/2}. \quad (3.29)$$

Выразим отсюда измеряемый параметр j_{if} :

$$j_{if} = (R/a)C_{Бц} en_e (2eT_e/M_i)^{1/2} = K_{Бц} en_e (2eT_e/M_i)^{1/2}. \quad (3.30)$$

Записанный здесь $K_{Бц} = (R/a)C_{Бц}$ назван в [110] составным коэффициентом Бома. Обозначая отношение R/a как x , имеем $K_{Бц} = xC_{Бц}$.

Выражение (3.30) представляет собой формулу Бома, записанную с использованием экспериментальных величин j_{if} . При необходимости подтверждения коэффициента Бома $C_{Бц}$ она содержит три неизвестные величины, x , M_i и $C_{Бц}$, а для их нахождения мы можем использовать ещё только одно соотношение в виде «закона 3/2», в который входят x и M_i . Итак, мы имеем два уравнения и три неизвестных. Для определения одного из них с целью x и M_i . Поэтому вначале для предварительного контроля величины коэффициента Бома $C_{Бц}$ проводим специальный эксперимент с ксеноном особой чистоты, в котором M_i является известной величиной. В этом эксперименте множеству точек j_{if} со всеми параметрами плазмы соответствует множество значений составного коэффициента Бома $K_{Бц} = xC_{Бц}$. «Закон 3/2» в форме уравнения Чайлда-Богуславского-Ленгмюра (обозначение индекса CBL) для цилиндрического зонда под плавающим потенциалом j_{if} записывается в виде

$$j_{if} = (4\varepsilon_0/9)(2e/M_i)^{1/2}(\Delta V_f^{3/2}/aRA_L) = (4\varepsilon_0/9)(2e/M_i)^{1/2}(\Delta V_f^{3/2}/a^2x_{CBL}A_L), \quad (3.31)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, а A_L – зависящий от x_{CBL} безразмерный параметр Ленгмюра [112]. Совместное решение уравнений (3.30) и (3.31) даёт выражение для $x_{CBL}A_L$:

$$x_{CBL}A_L = (4\varepsilon_0/9) \Delta V_f^{3/2}/K_{Бц} a^2 en_e T_e^{1/2} = 2.4564 \cdot 10^7 \Delta V_f^{3/2}/K_{Бц} a^2 en_e T_e^{1/2}. \quad (3.32)$$

Аппроксимация табулированных данных [112] применительно к функции $x_{CBL}A_L = f(x)$ для $x = 1,1 \div 2,0$ (диапазон x , соответствующий условиям настоящего эксперимента) в случае цилиндрического зонда даёт

$$x_{CBL}A_L = 2,0073x^2 - 4,3755x + 2,3905. \quad (3.33)$$

Объединив (3.32) и (3.33), получаем:

$$2,0073x_{CBL}^2 - 4,3755x_{CBL} + 2,3905 - 2,4564 \cdot 10^7 \Delta V_f^{\frac{3}{2}} / K_{БЦ} a^2 n_e T_e^{\frac{1}{2}} = 0. \quad (3.34)$$

Решение этого уравнения в виде значений $x_{CBL} = R/a$ находится для всех экспериментальных величин $K_{БЦ}$, полученных по формуле (3.30) в результате специального эксперимента с ксеноном особой чистоты, т.е. при известной массе ионов M_i . Эти данные представлены на рисунке 3.11, где крестиками (x) обозначены исходные экспериментальные значения $K_{БЦ}$, а кружками – результирующие величины $x = R/a$:

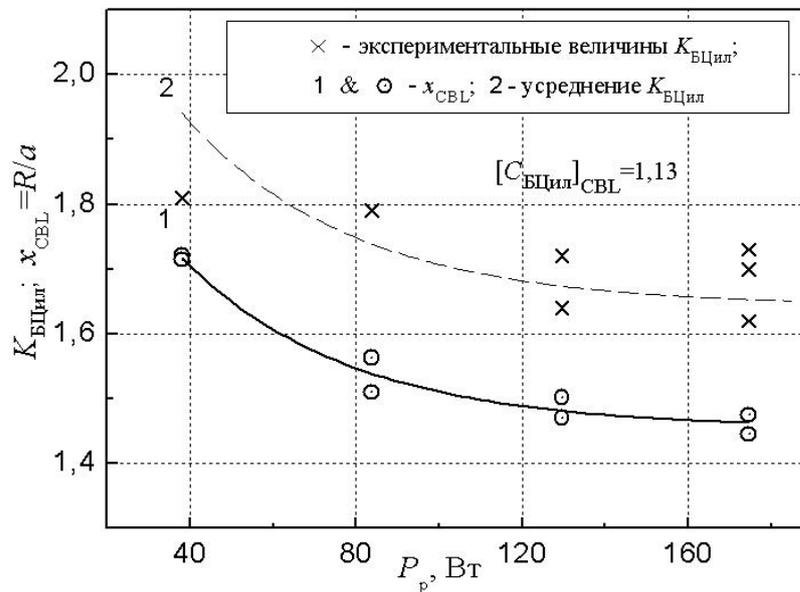


Рисунок 3.11 – Зависимость комбинированных коэффициентов Бома $K_{БЦ}$ и отношений $R/a = x_{CBL}$ от мощности ВЧ-разряда для модели зондового слоя Чайлда-Богуславского-Ленгмюра

Разбросы экспериментальных данных по x_{CBL} , соответствующих модели Чайлда-Богуславского-Ленгмюра, оказались относительно небольшими. Они чётко определили вид функции $x_{CBL}(P_p)$, которая была аппроксимирована в [110] экспоненциальной зависимостью

$$x_{CBL} = 0,6752 \exp(-P_p/40,368) + 1,454. \quad (3.35)$$

Для нахождения коэффициента Бома $[C_{БЦ}]_{CBL}$, который должен быть универсальной константой, не зависящей от операционных параметров разряда, кривую $x(P_p)$ нужно было поднять вверх подбором такого множителя $[C_{БЦ}]_{CBL}$, который обеспечил бы усреднение всего

множества экспериментальных величин $K_{\text{БЦ}}$. Результат этой операции представлен пунктирной линией на рисунке 3.11, соответствующей коэффициенту Бома $[C_{\text{БЦ}}]_{\text{CBL}}=1,13$.

3. Согласно формуле (3.28) масса ионов M_i может быть оценена выражением

$$M_i = 2C_{\text{БЦ}}^2 e^3 (x^2 n_e^2 T_e j_{if}^{-2}) = 2 \cdot 1,13^2 e^3 (x_{\text{CBL}}^2 n_e^2 T_e / j_{if}^2) = 1,05 \cdot 10^{-56} \left(\frac{x_{\text{CBL}}^2 n_e^2 T_e}{j_{if}^2} \right). \quad (3.36)$$

Предварительно полученный коэффициент Бома вошёл в общий числовой коэффициент выражения (3.36), а собранные в скобки параметры отражают природу плазмообразующего газа и их зависимость от операционных параметров разряда: здесь находятся измеренные зондом величины n_e , T_e и j_{if} , а также оценка отношения радиусов $R/a = x_{\text{CBL}}$, полученная из уравнения (3.35) для экспериментальных величин составного коэффициента Бома $K_{\text{БЦ}}$.

Однако использованное в методике [110] уравнение Чайлда-Богуславского-Ленгмюра основано на модели полного отсутствия электронов в зондовом слое объёмного заряда, что на практике осуществимо при напряжениях, отталкивающих от зондового слоя все электроны плазмы. Для эксперимента [110] эти напряжения должны были соответствовать энергиям электронов выше верхней границы измеренных ФРЭЭ. Полный набор этих функций представлен в работе [113], определившей данную границу на уровне 25 эВ. При этом радиальные распределения разностей потенциалов $\Delta V_f = V_s - V_f$, полученные в эксперименте [113, 114, 110], изменялись в диапазоне не выше 17 В – см. рисунок 4.19.

Таким образом, уравнение Чайлда-Богуславского-Ленгмюра правильно описывало бы зондовый слой при напряжениях $\Delta V \sim 30 - 50$ В и выше. Однако, как показывают данные рисунка 4.19, в наших экспериментах разность потенциалов на зондовом слое была ниже верхней границы ФРЭЭ. Это означает, что высокоэнергетичные электроны в данном эксперименте имели возможность проникнуть в зондовый слой и несколько уменьшить его толщину.

С подобной ситуацией столкнулись также авторы работы [115], изучавшие параметры аргоновой плазмы U-образным резонансным зондом, для которого корректный учёт толщины зондового слоя был очень важен. В этой связи ими были вычислены толщины зондового слоя по модели Чайлда-Богуславского-Ленгмюра. Авторами была проведена корректировка этих данных на основе ступенчато-фронтальной модели зондового слоя (step-front sheath model), обозначенной в индексах, как SF, в зависимости от отношения радиуса цилиндрического зонда a к электронному радиусу Дебая r_{De} для изучавшейся аргоновой плазмы. Часть этого расчёта для диапазона $\frac{a}{r_{De}} = 2 \div 4,4$, охваченного экспериментом [113, 110], представлена на рисунке 3.12.

Для устранения зависимости этих данных от природы плазмообразующего газа и операционных параметров разряда рисунок 3.12 был перестроен в представленный на рисунке 3.13 график $(x = R/a)_{SF}$ для ступенчато-фронтальной модели зондового слоя от $(x = R/a)_{CBL}$ для модели Чайлда-Богуславского-Ленгмюра при одинаковых величинах a/r_{De} .

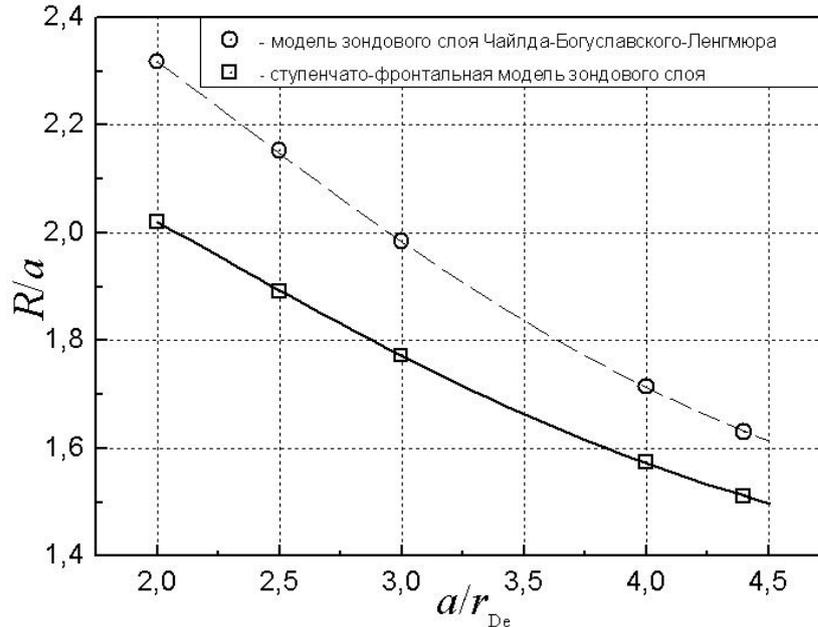


Рисунок 3.12 – Зависимость $x = R/a$ от отношения a/r_{De} для моделей зондового слоя Чайлда-Богуславского-Ленгмюра (верхняя пунктирная кривая) и ступенчато-фронтальной (нижняя сплошная кривая) в аргоновой плазме

Построенная таким образом функция стала независимой от природы плазмообразующего газа и операционных параметров разряда. Теперь она характеризует только динамику заряженных частиц в зондовом слое цилиндрической геометрии. Её линейная аппроксимация дала поправочную функцию

$$x_{SF} = 0,692x_{CBL} + 0,3816, \quad (3.37)$$

определившую снижение значений x_{SF} по сравнению с x_{CBL} , показанное на рисунке 3.12. В графической форме данная поправочная функция представлена на рисунке 3.13. С её помощью полученная в [110] зависимость $x_{CBL}(P_p)$ (кривая 1 на рисунке 3.10) была перестроена в подобную уточнённую кривую 2, представленную на рисунке 3.14 в виде сплошной линии $x_{SF}(P_p)$.

Её подъём к экспериментальным точкам $K_{Бц}$ путём подбора постоянного множителя в виде коэффициента Бома $C_{Бц}$ привёл к получению уточнённого коэффициента Бома $C_{Бц} = 1,23$, усреднившего эти точки пунктирной кривой на рисунке 3.14.

На данном этапе предложенная в работе [110] методика определения массы ионов оказалась дополнена поправочной функцией (3.37) и формулой (3.38) вместо (3.36), численный коэффициент которой увеличился примерно на 20 %:

$$M_i = 1,26 \cdot 10^{-56} \left(\frac{x_{SF}^2 n_e^2 T_e}{j_{if}^2} \right). \quad (3.38)$$

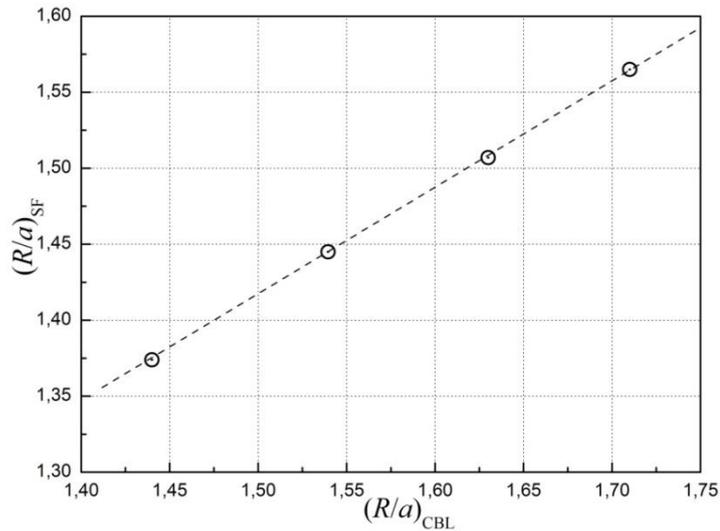


Рисунок 3.13 – Зависимость $(x = R/a)_{SF} = f[(x = R/a)_{CBL}]$, полученная вертикальным рассечением кривых рисунка 3.12

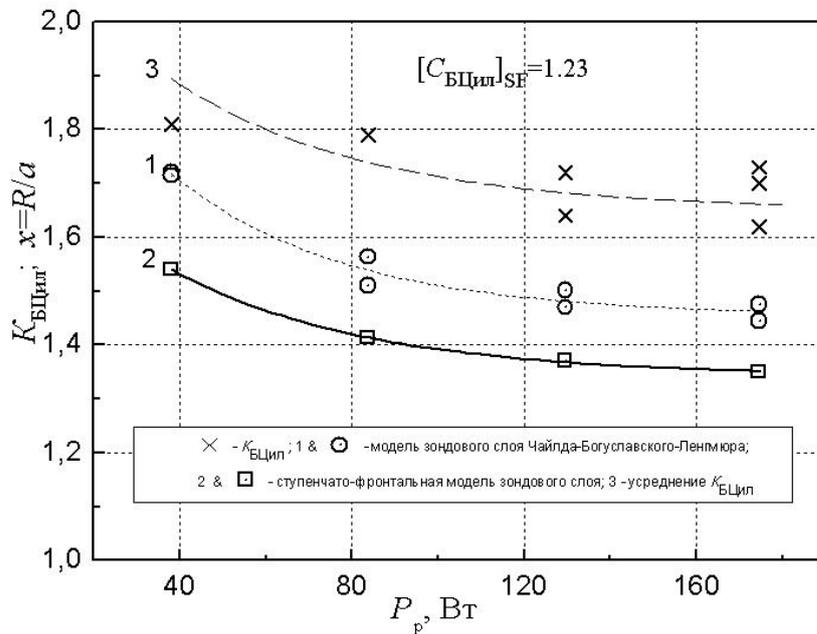


Рисунок 3.14 – Зависимость отношений $R/a = x$ и комбинированных коэффициентов Бома K_{BC} от мощности ВЧ-разряда для ступенчато-фронтальной модели зондового слоя

Таким образом, доработка методики [110] позволяет расширить возможности зондовой диагностики: окончательная методика с поправкой на ступенчато-фронтальную модель

зондового слоя позволила по результатам зондовых измерений параметров плазмы не оценить, а определить приближенную к реальности толщину зондового слоя, что x_{SF} и массу ионов M_i . Измерение толщины зондового слоя x_{SF} может оказаться важным для корректного выбора зондовой теории, используемой при интерпретации результатов зондовой диагностики.

4. Итоговая методика для определения толщины зондового слоя на цилиндрическом зонде под плавающим потенциалом и массы ионов выглядит следующим образом:

- 1) Качественно и количественно анализируется измеренная ФРЭЭ на предмет близости к распределению Максвелла.
- 2) При подтверждении этой близости с помощью формулы Больцмана находят величины плотность электронного тока на зонд под плавающим потенциалом j_{if} .
- 3) Совместным решением формулы Бома и уравнения «закона 3/2» с коэффициентом Бома $C_{Бц} = 1,23$ оценивают значения радиальных отношений x_{CBL} .
- 4) С помощью ступенчато-фронтальной модели вносят поправки в величины x_{CBL} , которые дают физически оправданные, скорректированные толщины зондового слоя в виде радиальных отношений x_{SF} и массу ионов M_i .

3.2.2.2 Имитатор плоского пристеночного зонда, его конструкция и область применения

Для корректного проектирования ИОС, отвечающей требованиям по расходимости пучка, необходимы данные по плотности ионного тока на ЭЭ. Согласно известной методике плотность ионного тока на ЭЭ ИОС можно было бы измерить с помощью набора плоских пристеночных зондов типа использованных в [70] и показанных в [116], если их встроить в газодинамическую модель данного электрода, выполненную из диэлектрика, перфорации которой обеспечили бы нужное рабочее давление в газоразрядном пространстве. Подготовка и проведение такого эксперимента потребовали бы заметных затрат времени и средств.

В настоящей работе для таких измерений было предложено использовать подвижный имитатор плоского пристеночного зонда в виде торца керамического стержня с каналом, в который с малым зазором введена проволока. Её торец, образующий измерительную собирающую поверхность плоского зонда, был зафиксирован заподлицо с торцом

керамического стержня, представлявшим собой окружающую зонд диэлектрическую плоскость. При контакте с плазмой здесь образовывался стационарный пристеночный плазменный слой с соответствующим переходным слоем в квазинейтральной плазме. Такое свойство диэлектрической плоскости было обеспечено тем, что её площадь была много больше собирающей поверхности зонда (в 12 раз в данном эксперименте). Для азимутальной равномерности диэлектрического окружения зонда желательно разместить зонд на оси стержня, а к опорному зонду с развитой поверхностью, окружающему измерительный торец стержня, можно было бы подвести гибкую проволоку в высокотемпературной плёночной изоляции.

В проведённых опытах использовался керамический стержень диаметра 5 мм с двумя каналами, диаметры которых составляли по 1,5 мм. В эти каналы были введены медные проволоки такого же диаметра, одна из которых исполняла роль плоского зонда, установленного заподлицо с торцом керамического стержня. Другая была выведена за пределы этого торца и отогнута назад, будучи прижата к ленте из алюминиевой фольги шириной 10 мм, образовавшей опорный зонд. Такая же фольга окружала остальную часть контактирующей с плазмой поверхности стержня в виде заземлённого экрана, отстоявшего от опорного зонда на 1 – 2 мм. Схема и чертёж данного имитатора пристеночного плоского зонда представлены на рисунке 3.15.

Собирающая поверхность плоского зонда в таком исполнении неравномерно окружена керамикой стержневого торца. Однако несимметричный торец данного имитатора окружён опорным зондом, который в какой-то мере ослаблял указанную неравномерность окружения зонда. Следовательно, в целом около плоского зонда данной конструкции образовывался характерный для стенки под плавающим потенциалом стационарный переходной слой, концентрация заряженных частиц в котором уменьшалась из-за снижения ионизационного равновесия в плазме.

Знание плотности ионного тока на стенку под плавающим потенциалом весьма важно для грамотного и экспериментально обоснованного расчёта формы и размеров ускорительных ячеек ИОС. При наличии в модели работающих электродов ИОС для выбора траектории перемещения имитатора плоского пристеночного зонда необходимо предварительно измерить продольное распределение параметров плазмы около ИОС, чтобы понять, на каком расстоянии от ЭЭ ИОС начинает сказываться влияние стенки, т.е. образование переходного слоя перед этим электродом. Получив такую информацию, можно задать траекторию перемещения имитатора пристеночного зонда в невозмущённой стенкой плазме, то есть на некотором расстоянии от переходного слоя, чтобы его параметры не смогли искусственно углубить влияние пристеночного эффекта на получаемые данные.

Практическое использование данного специального зонда описано ниже. Оно началось контролем вида ФРЭЭ, которая оказалась далека от максвелловской функции. Поэтому плотность ионного тока на ЭЭ ИОС оценивалась только линейными экстраполяциями ионных ветвей логарифмических и двойных логарифмических зондовых ВАХ. Эти оценки, возможно, были завышены, поскольку площадь керамической поверхности вокруг плоского зонда превосходила его собирающую поверхность немногим более одного порядка величины, чего, возможно, было недостаточно для реального воспроизведения параметров пристеночного слоя перед стенкой под плавающим потенциалом, то есть перед ЭЭ ИОС.

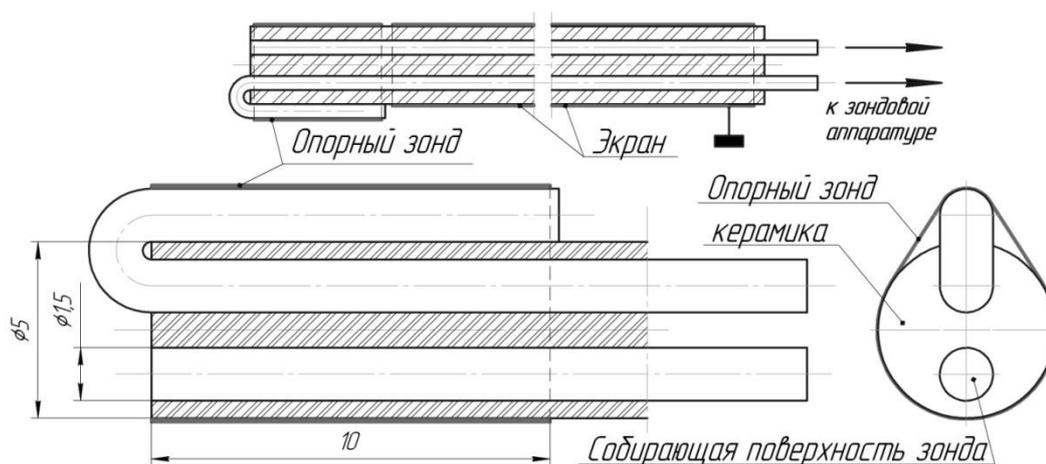


Рисунок 3.15 – Схема и чертёж имитатора пристеночного плоского зонда

3.3 Выводы раздела 3

Модифицированная интегральная диагностика ВЧИ-газоразрядного узла позволила увязать техническое состояние и физические особенности устройства. Полученный по её результатам баланс мощности указывает на основные потери по отдельным узлам, выявляет пути совершенствования конструкции блока ГРК и линии электропитания.

Была разработана методика определения толщины зондового слоя на цилиндрическом зонде под плавающим потенциалом и массы ионов ВЧИ-разряда при помощи зондов Ленгмюра.

Использование имитатора плоского пристеночного зонда позволяет проводить оценки плотности ионного тока в зоне размещения ИОС без создания дорогостоящих моделей, имитирующих ИОС. Такие измерения крайне важны при проектировании электродов ИОС и создании физико-математических моделей ускорения ионов, изложенных в разделе 5.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОГО УЗЛА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ВЧИИП-10Ф

Эффективность практического использования ВЧИ-газоразрядного узла в источнике ионов для применения его в качестве ВЧИИП, очищающей ГСО Земли от космического мусора оказывается тем выше, чем больше его энергетический КПД (с целью обеспечения максимально экономного расхода рабочего тела и максимальной эффективности его использования) и чем более равномерны радиальные распределения концентрации электронов, равной концентрации ионов $n_e(r) = n_i(r)$, радиальные распределения плотности ионного тока насыщения $j_{is}(r)$ на размещённую в плазме стенку под плавающим потенциалом, служащую ЭЭ ВЧИИП-10Ф. Текущий раздел посвящен изучению параметров плазмы в ГРК ВЧИИП-10Ф и получению данных для проектирования ИОС, основываясь на базе методологических подходов, изложенных в предыдущем разделе. Подтверждением правильности выбранной схемы установки на основе вышеизложенного анализа стали результаты диагностики газоразрядного узла модели источника.

4.1 Интегральная диагностика газоразрядного узла ВЧИИП-10Ф.

4.1.1 Предварительные измерения параметров индуктора

Для определения электротехнических параметров индуктора согласно методике [117], изложенной в предыдущем разделе, на рабочей частоте $f \approx 2$ МГц предварительно измерялась добротность по формуле (3.5). Для этой цели использовался Q -метр Tesla BM-560.

В настоящей работе индуктор представлял собой плоскую спираль с числом витков $N = 13$ из многожильного медного серебрёного провода суммарного диаметра $\sim 1,5$ мм во

фторопластовой изоляции с внешним диаметром 2,1 мм. Наружный диаметр индуктора был равен $D_{\text{инар}} = 103$ мм, внутренний – $D_{\text{ивн}} = 47$ мм. Ферритовый сердечник, изготовленный в США, содержал окислы никеля и марганца, имел относительную магнитную проницаемость до 150 и температуру Кюри 400°C . Его наружный диаметр был равен $D_{\text{фнар}} = 116$ мм, внутренний – $D_{\text{фвн}} = 33$ мм, а их отношение – $\frac{D_{\text{фвн}}}{D_{\text{фнар}}} \approx 0,28$. В прототипе изучаемой модели [70] данное отношение было равно 0,63, что превосходило этот параметр модели более чем в 2 раза. Как будет показано ниже, данный факт сказался на форме радиальных распределений концентрации электронов и плотностей тока электронного и ионного насыщения, полученных в проведённых экспериментах.

Измерения в свободном пространстве на рабочей частоте $f \approx 2$ МГц дали следующие результаты: $K1 \equiv Q_{\text{св}} = 267$, $K2 \equiv L_{\text{исв}} = 22,5$ мкГн, $K3 \equiv R_{\text{исв}} = 1,06$ Ом. Организация этих измерений показана на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Интегральная диагностика в свободном пространстве

Измерениями в составе собранной конструкции при толщине кварцевого окна $\delta = 10$ мм было получено: $K4 = 157$, $K5 = 37,9\%$; $K6 = 25,7$ мкГн, $K7 = 6,2\%$; $K8 = 1,92$ Ом; $K9 \approx 51,2\%$.

Кварцевое окно толщины $\delta = 5$ мм дало следующие результаты: $K4 = 146$, $K5 = 45,3\%$; $K6 = 23,7$ мкГн, $K7 = 5,3\%$; $K8 = 2,13$ Ом; $K9 \approx 101\%$.

Измеритель добротности, подключённый к собранной установке, показан на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2– Организация интегральной диагностики газоразрядного узла в сборе

Таким образом, предварительная интегральная диагностика ВЧИ-устройства позволила получить важную часть конструктивных контрольных индикаторов. Выяснилось, что при переходе из свободного пространства в собранную конструкцию индуктивность индуктора увеличилась на 6,2 % для $\delta = 10$ мм и на 5,3 % для $\delta = 5$ мм, тогда как его активное сопротивление возросло на 51,2 % для $\delta = 10$ мм и на 101 % (практически удвоилось) для $\delta = 5$ мм.

Данный эффект был получен в устройстве, где ферритовый сердечник индуктора устранил вихревые токи в тыльной части индуктора (в металлической крышке, показанной на рисунках 2.4 и 2.5), следовательно, он был обусловлен вихревыми токами только в прилегающей части вакуумной камеры. Характер изменения индуктивности индуктора нелинеен вдоль оси z – оси симметрии вакуумной камеры, а увеличение активного сопротивления индуктора по мере углубления вихревых токов в торцевую часть вакуумной камеры объясняется тем, что при углублении поля индуктора в стенку ГРК увеличивается относительный вклад в активное сопротивление индуктора вихревых токов, циркулирующих в нержавеющей стали ГРК.

На этом основании можно полагать, что дальнейшее повышение энергоэффективности данной модели вполне возможно, если изготовить всю ГРК или её часть вблизи индуктора из диэлектрического материала. Соответственно, переход к вакуумному исполнению приведет к уменьшению толщины диэлектрического окна δ , так как при этом возрастёт КПД «индуктор-плазма», благодаря повышению коэффициента взаимоиндукции индуктора и разряда [70, 71].

4.1.2 Измерение тока индуктора без разряда

Данное измерение проводилось на вакуумированной камере без включения подачи ксенона. На индуктор подавалась ВЧ-мощность через СУ, регулировкой которого отражённая мощность сводилась к нулю, и затем фиксировался ток индуктора без разряда I_0 с помощью пояса Роговского в цепи индуктора (см. рисунки 2.9 и 2.10).

В изучаемой же модели ВЧИИП-10Ф индуктор был размещён в атмосферных условиях, когда утечки мощности были возможны только через некачественные детали СУ, разъёмы, кабели и изоляторы. Такие потери в данной работе отсутствовали.

Результаты измерений тока индуктора ВЧИИП-10Ф без разряда I_0 для двух толщин кварцевого окна под индуктором представлены на рисунке 4.3.

Кривые 1 и 2 демонстрируют влияние толщины кварцевого окна. В случае окна толщины 5 мм электромагнитной поле индуктора глубже проникает в торцевую часть вакуумной камеры, что приводит к увеличению активного сопротивления индуктора, как было установлено в предыдущем разделе работы. Однако из рисунка 4.3 видно, что кривая 1 для $\delta = 5$ мм сместилась вверх относительно кривой 2 для $\delta = 10$ мм. Увеличение тока индуктора при $\delta = 5$ мм указывает на снижение суммарного активного сопротивления линии электропитания индуктора за счёт перераспределения активных сопротивлений цепи питания индуктора, при котором относительная доля активного сопротивления линии электропитания разряда уменьшилась. Согласно методике [90] зависимость I_0 является конструктивным контрольным индикатором К10, который характеризует конструкцию и исполнение индуктора (материал, сечение, покрытие и т.д.) вместе с окружающими элементами конструкции, а также схемотехническое решение и исполнение СУ.

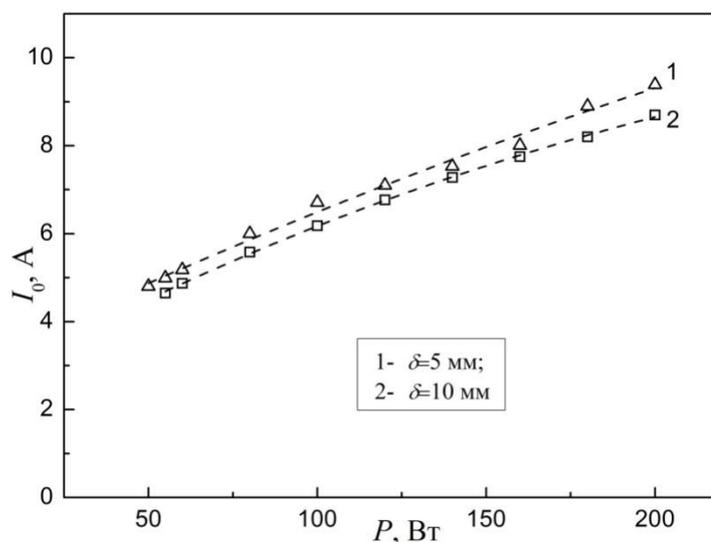


Рисунок 4.3 – Зависимость тока индуктора без разряда от мощности ВЧГ для толщин кварцевого окна 10 мм и 5 мм

4.1.3 Измерение тока индуктора при горении разряда

Эти измерения проводились при горении ВЧИ-разряда в вакуумной камере, где создавался поток ксенона с объёмным расходом $q = 2$ и 4 смл/мин. при мощности ВЧГ $P \leq 200$ Вт. При этом динамическое давление ксеноновой плазмы устанавливалось на уровнях $p \approx 2$ мТорр и 4 мТорр, соответственно.

Результаты измерений тока индуктора при разных толщинах кварцевого окна и при давлении плазмы $p = 2$ мТорр и 4 мТорр представлены на рисунке 4.4, где для сравнения приведены также данные рисунка 4.4 по току индуктора без разряда.

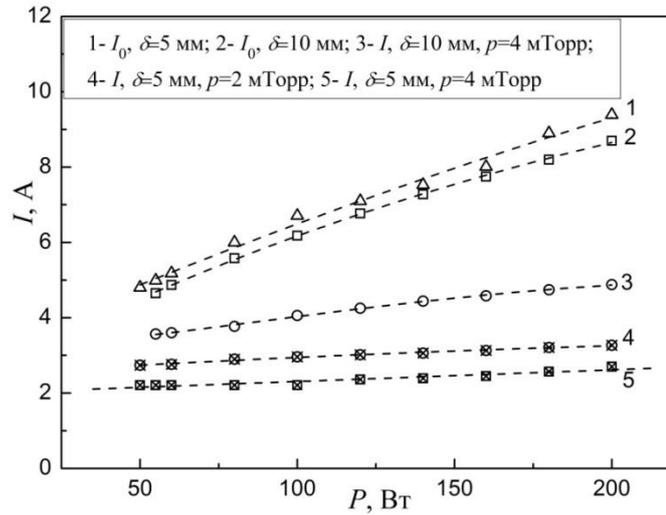


Рисунок 4.4 – Зависимость тока индуктора от падающей мощности ВЧГ

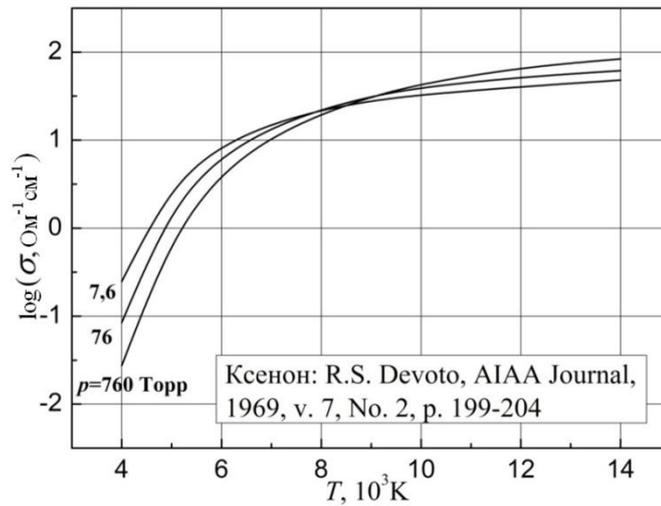


Рисунок 4.5 – Расчётные изобары проводимости ксеноновой плазмы $\sigma(T)$ [52]

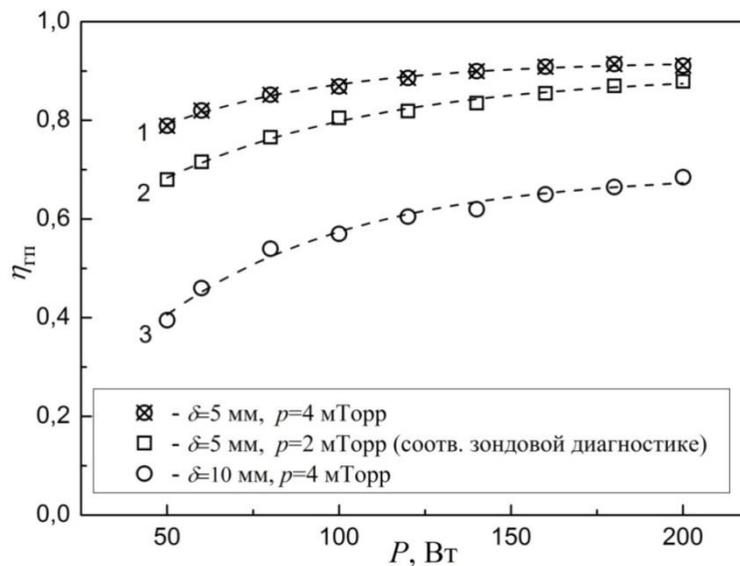


Рисунок 4.6 – Зависимость КПД «ВЧГ-плазма» от мощности ВЧГ

при двух значениях толщины кварцевого окна и для двух величин давления плазмы

Во-первых, при малой толщине кварцевого окна $\delta = 5$ мм эффективность передачи ВЧ-мощности от ВЧГ к разряду оказалась довольно высокой, особенно при давлении $p \approx 4$ мТорр (кривая 1): $\eta_p \leq 92$ %. Во-вторых, сравнение верхней кривой 1 для $\delta = 5$ мм с кривой 3 для $\delta = 10$ мм при одинаковом давлении $p \approx 4$ мТорр демонстрирует резкое влияние удаления индуктора от плазмы: смещение индуктора от плазмы всего на 5 мм привело к падению η_p почти в 2 раза. С ростом давления ток индуктора I уменьшился (на ~ 10 %), т.е. проводимость плазмы разряда тоже уменьшилась, а это означает согласно [52], что степень ионизации плазмы $\alpha = \frac{n_e}{n_a} \leq 1$ %, что соответствует левой части изобар, представленных на рисунке 4.5. Давление $p \approx 2$ мТорр было избрано в качестве рабочего операционного параметра модели ВЧИД для проведения полной её диагностики, включая представленные ниже локальные зондовые измерения параметров плазмы. Причиной послужил тот факт, что именно это давление входит в рабочий диапазон для ВЧИД: $p \approx 0,2 - 3,0$ мТорр [118]. В этой связи кривая 2 из рисунка 4.6 для $p \approx 2$ мТорр и $\delta = 5$ мм будет активно использоваться в зондовых экспериментах для привязки результатов диагностики к мощности разряда P_p . Рассмотрение этой кривой показывает, что при названных операционных параметрах эффективность передачи ВЧ-мощности в разряд соответствовала диапазону $\eta_p = 0,68 - 0,88$, при котором поглощённой плазмой ВЧ-мощность изменялась в пределах $P_p = 34 - 176$ Вт. Зависимости от мощности ВЧГ абсолютных величин P_p и мощности потерь на линии электропитания разряда, в индукторе и в вихревых токах представлены на рисунке 4.7.

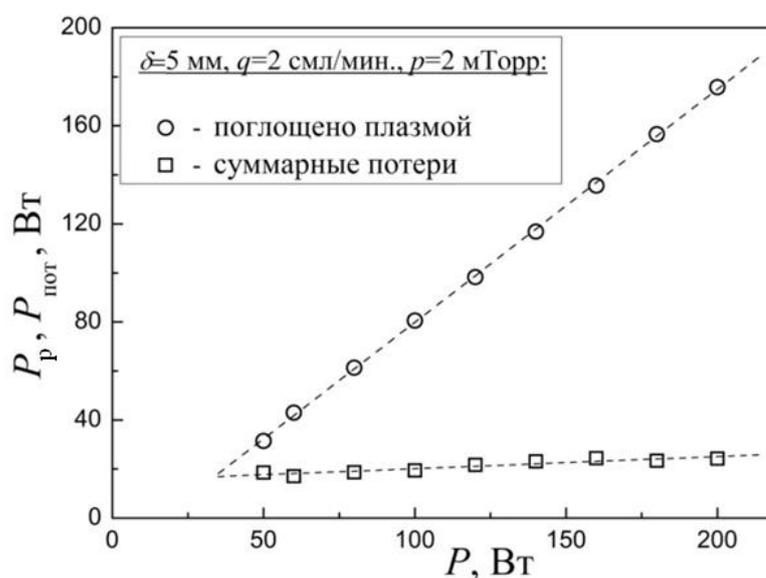


Рисунок 4.7 – Зависимость от мощности ВЧГ поглощённой плазмой ВЧ-мощности и мощности суммарных потерь при толщине кварцевого окна $\delta = 5$ мм и давлении $p \approx 2$ мТорр

Отметим, что соответствующие изучаемому устройству зависимости η_p в полном согласии с литературными данными [70, 71] имеют возрастающий характер по мощности ВЧГ, чего не удалось получить для немецкого технологического ВЧИП RIM-20 из-за его конструктивных проблем [90].

На основе полученных данных по энергоэффективности модели, можно сделать вывод, что изначально было выбрано верное направление развития технологии ВЧИД. Для того чтобы сравнить значения КПД передачи мощности от ВЧГ в плазму были проведены измерения двигателя ВЧИД-16 разработки НИИ ПМЭ МАИ и RIM-20 по сравнению с ВЧИП-10Ф (см. рисунок 4.8). Первый двигатель имеет куполообразный индуктор, вторая установка – цилиндрический, обе они испытывались в вакуумном исполнении. Падающий характер кривых свидетельствует об утечках на гермовводах, а в случае RIM-20 еще и по воде, которая охлаждает индуктор во время его работы [118]. При сопоставлении величин КПД передачи мощности в разряд данных образцов с представленной в работе моделью ВЧИП-10Ф очевидными становится преимущество и будущая перспектива применения плоской геометрии индуктора и использования ферритового сердечника при создании ВЧИД следующих поколений.

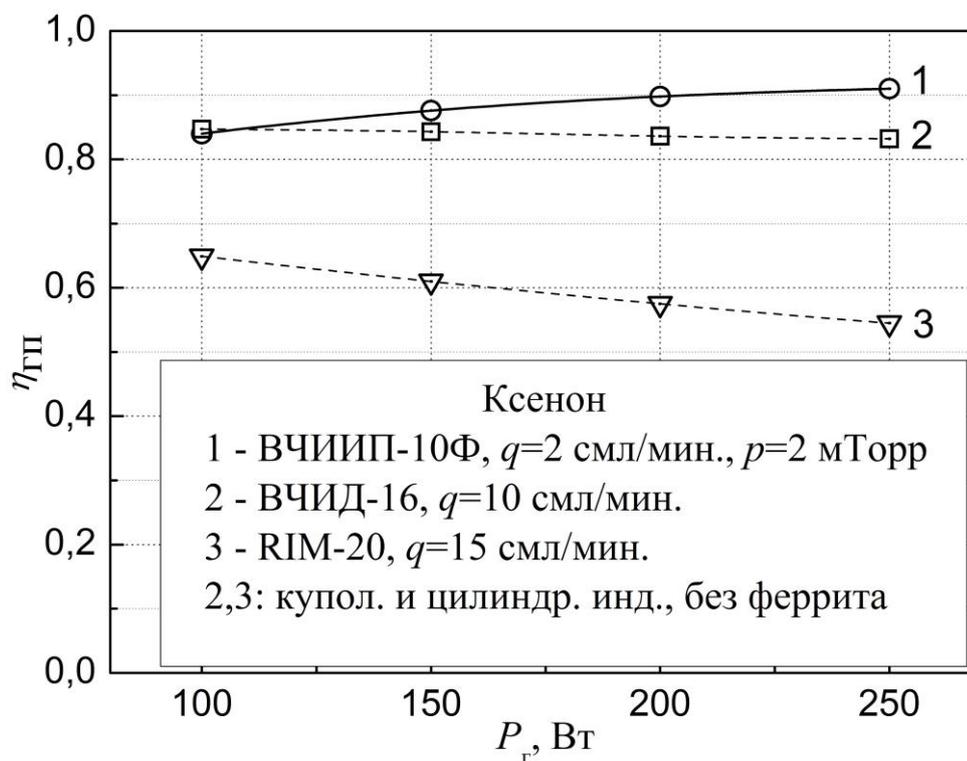


Рисунок 4.8 – КПД передачи мощности от генератора в разряд ВЧИД-16 с купообразным индуктором и RIM-20 с цилиндрической формой индуктора и ВЧИП-10Ф с плоской формой индуктора

Применение предложенной оценки конструктивных и рабочих параметров образцов ВЧ-источников позволяет кроме всего прочего систематизировать потери в каждом узле отдельно, выявить критические области и находить пути совершенствования устройств подобного типа. Так для сравнения были выбрана мощность 150 Вт и расход 2 смл/мин для модели ВЧИИП-10Ф (см. рисунок 4.6) и мощность 500 Вт и расход 16 смл/мин для RIM-20 (см. рисунок 4.7), и проведён расчёт баланса мощности при данных операционных параметрах [119 – 120].

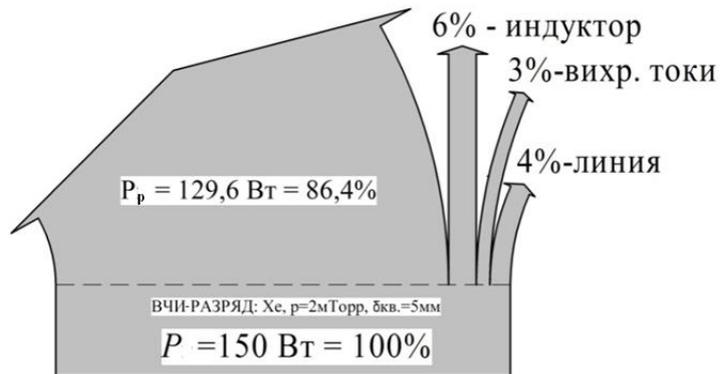


Рисунок 4.9 – Баланс мощности ВЧИИП-10Ф для 150 Вт падающей мощности при расходе 2 смл/мин

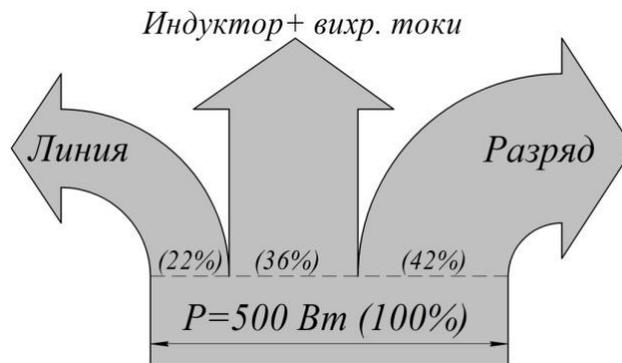


Рисунок 4.10 – Баланс мощности RIM-20 для 500 Вт падающей мощности при расходе 16 смл/мин

Однако наиболее важной характеристикой ВЧИИП-10Ф является равномерность плазменного образования в зоне работы ИОС. Подтвердить правильность выбора схемы в данном контексте поможет исследование плазмы зондами Ленгмюра, изложенное в следующем подразделе.

4.2 Результаты диагностики локальных параметров плазмы ВЧИ-разряда при рабочем давлении

4.2.1 Измерения радиально подвижными прямыми цилиндрическими зондами Ленгмюра

Исходными зависимостями диагностики локальных параметров плазмы являются классические зондовые характеристики, полученные зондами Ленгмюра, описанными выше (см. рисунки 3.10 – 3.12), которые фиксируются как табулированные результаты усреднения 1000 мгновенных характеристик типа кривой, показанной на рисунке 4.11.

Первичным результатом обработки методом Дрювестейна вольт-амперных характеристик зондов являются полученные станцией VGPS-12 ФРЭЭ. На рисунке 4.12 приведены графики этих функций для $P = 50$ Вт, 100 Вт и 200 Вт в виде ВРЭЭ, пропорциональных вторым производным электронных ветвей зондовых ВАХ.

Видно, что их отклонение от максвелловской ФРЭЭ, которая в полулогарифмической шкале должна быть линейна, не слишком значительно. При верхнем значении мощности ВЧГ видно отклонение ВРЭЭ от линейности для малых значений энергии электронов $0 < \varepsilon < \varepsilon^*$, где $\varepsilon^* = 8,3$ эВ – первый потенциал возбуждения атомов ксенона. В этой области ε электрон-атомные взаимодействия носят упругий характер, что в случае бесстолкновительной плазмы должно соответствовать максвелловской ФРЭЭ. Последняя характеристика плазмы требует специальных оценок, которые будут проведены ниже.

Отметим, что попытка построения радиальной серии ВРЭЭ(r) в полулогарифмическом масштабе не позволяет увидеть их расслоения для различных радиальных позиций зонда, тогда как переход к линейному графику ВРЭЭ(r) делает такое расслоение намного более выраженным, что демонстрирует рисунок 4.13.

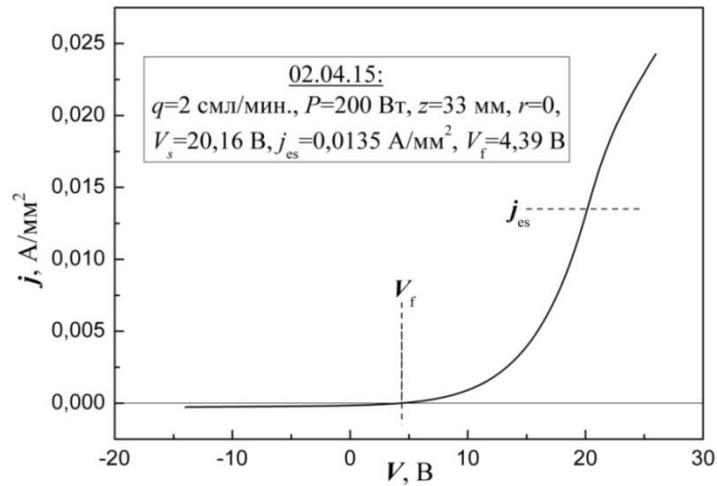


Рисунок 4.11 – Исходный вид зондовой характеристики ($q = 2$ смл/мин., $P = 200$ Вт, $z = 33$ мм, $r = 0$)

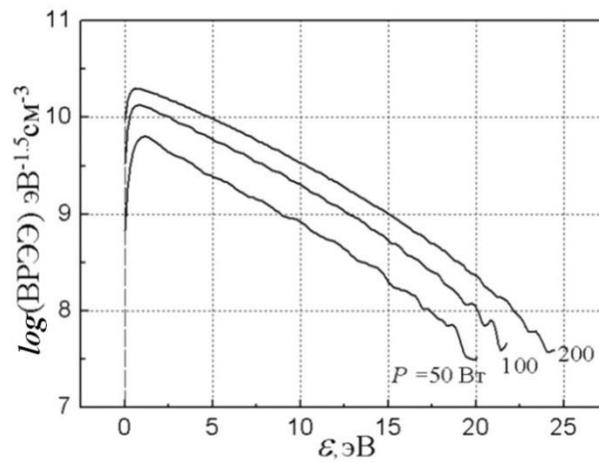


Рисунок 4.12 – ВРЭЭ для осевой позиции цилиндрического зонда ($r = 0$) и трёх значений падающей мощности ВЧГ при расходе 2 смл/мин

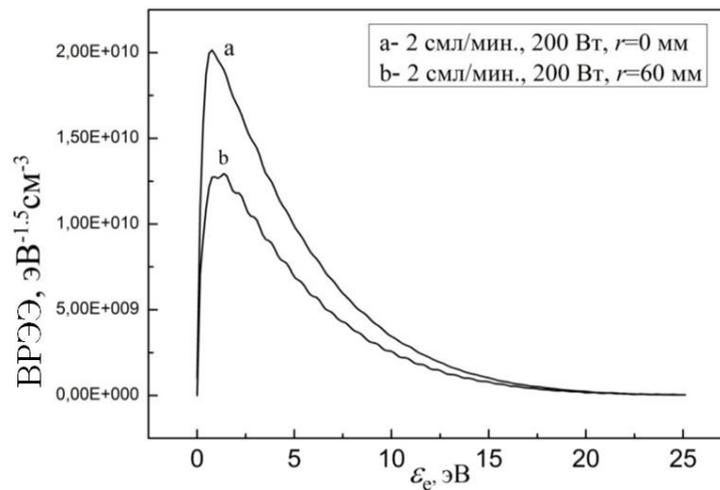


Рисунок 4.13 – ВРЭЭ для радиальных позиций зонда $r = 0$ и 60 мм (для центра и периферии изучаемой области)

Соответственно и различия интегралов от этих функций в виде концентрации электронов n_e и их температуры T_e для оси и периферии разряда оказываются вполне заметными. В частности, результаты измерений прямым одиночным зондом радиальных зависимостей n_e и T_e для $z = 33$ мм представлены на рисунках 4.14 и 4.15.

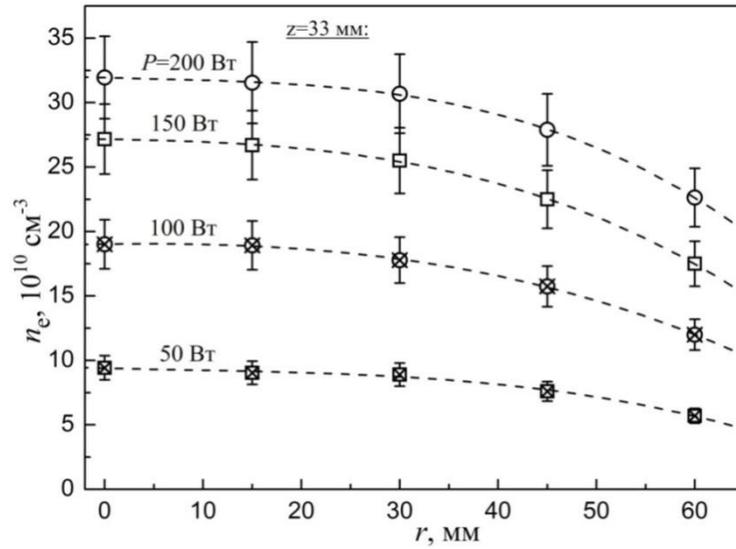


Рисунок 4.14 – Радиальные распределения концентрации электронов для $z = 33$ мм

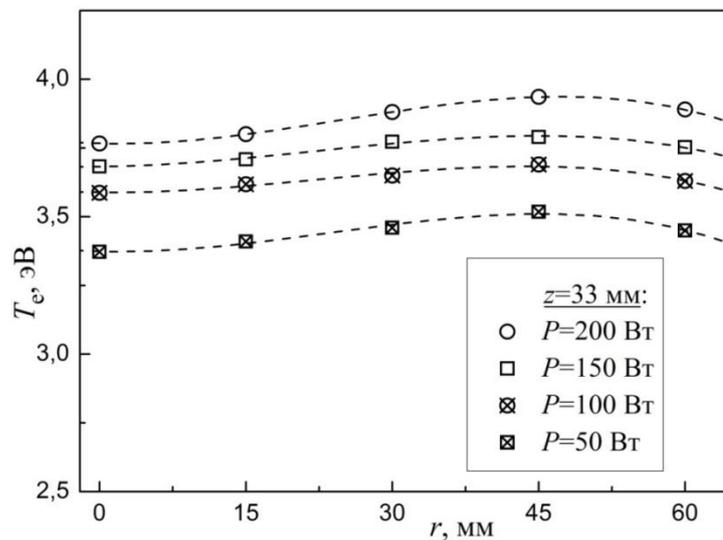


Рисунок 4.15 – Радиальные распределения температуры электронов для $z = 33$ мм

Как видно из рисунков 4.14 и 4.15 радиальные распределения основных параметров плазмы ведут себя очень консервативно по сравнению с типичными распределениями для ВЧИД [121], даже, несмотря на довольно резкое снижение параметров у металлической стенки.

Отметим, что результаты по $n_e(r)$ представлены на рисунке 4.14 с полями погрешности

$\pm 10 \%$, которую обеспечила зондовая станция VGPS-12 при сопоставлении её показаний с независимыми данными, полученными на основе измерений [99].

Имея приведённые данные, можно определить парциальное давление электронного газа в плазме согласно закону идеального газа

$$p_e = n_e k T_e, \quad (4.1)$$

где k – постоянная Больцмана. Результат этого расчёта представлен на рисунке 4.16.

Знание полного давления плазмы позволяет оценить относительное парциальное давление электронного газа:

$$p_e/p = n_e T_e / (n_e T_e + n_i T_i + n_a T_a) = n_e / [n_e + T_{i,a}/T_e (n_i + n_a)]. \quad (4.2)$$

Его величина оказывается довольно значительной – от 20 % до 72 %. Если бы изучаемая плазма была изотермичной, этот параметр представлял бы собой коэффициент ионизации

$$\beta = n_e / (2n_e + n_a). \quad (4.3)$$

Но при давлении плазмы в настоящей работе $p = 2$ мТорр температура тяжёлых частиц $T_{i,a}$ много меньше температуры электронов T_e . В свете работы [122], посвящённой измерениям температуры зондов и детальному расчёту температуры тяжёлых частиц, $T_{i,a}$ можно оценить как $T_{i,a} \approx 600$ К для $P = 200$ Вт в точке $z = 33$ мм и $r = 0$ и $T_{i,a} \approx 350$ К для $P = 50$ Вт в точке $z = 33$ мм и $r = 60$ мм. Тогда для измеренных величин n_e и T_e получаем диапазон изменения степени ионизации $\alpha = \frac{n_e}{n_a} \approx 0,2 - 0,5 \%$. Этот результат конкретизирует сделанный выше вывод об относительно невысокой степени ионизации изучаемой плазмы и о преобладании в ней электрон-атомных взаимодействий, когда при снижении давления средняя электропроводность плазмы увеличивается [52].

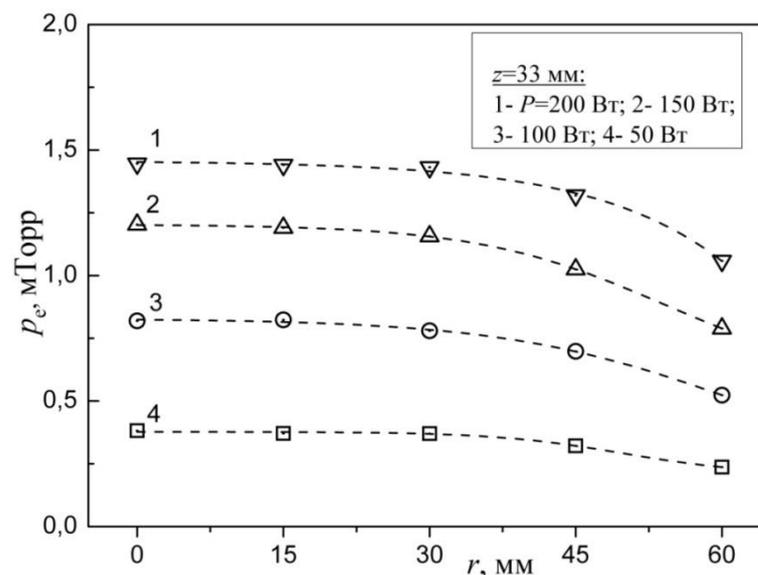


Рисунок 4.16 – Радиальная зависимость парциального давления электронов для $z = 33$ мм

Результаты зондовых измерений потенциала плазмы V_s , плотности соответствующего ему электронного тока насыщения j_{es} и разности потенциалов $\Delta V_f = V_s - V_f$ представлены на рисунках 4.17, 4.18 и 4.19.

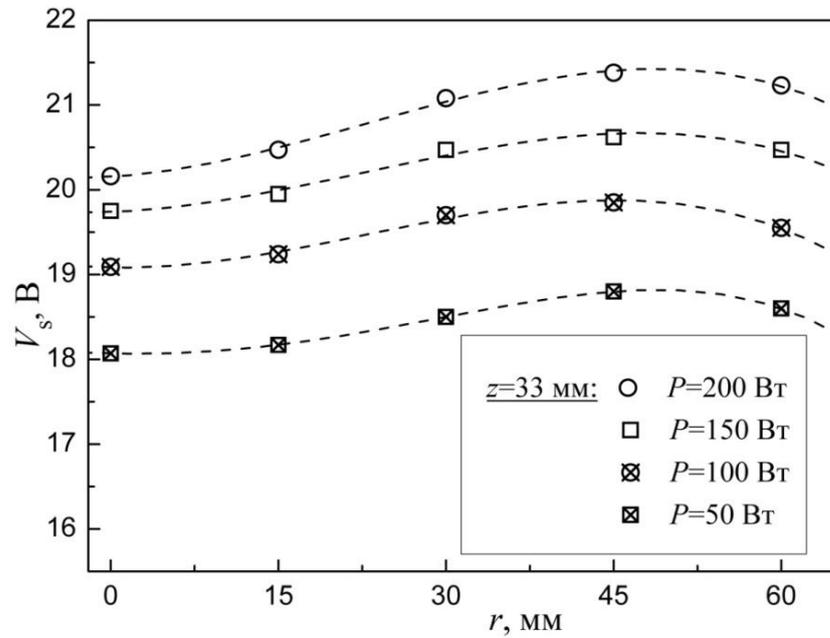


Рисунок 4.17 – Радиальные распределения потенциала пространства для $z = 33$ мм

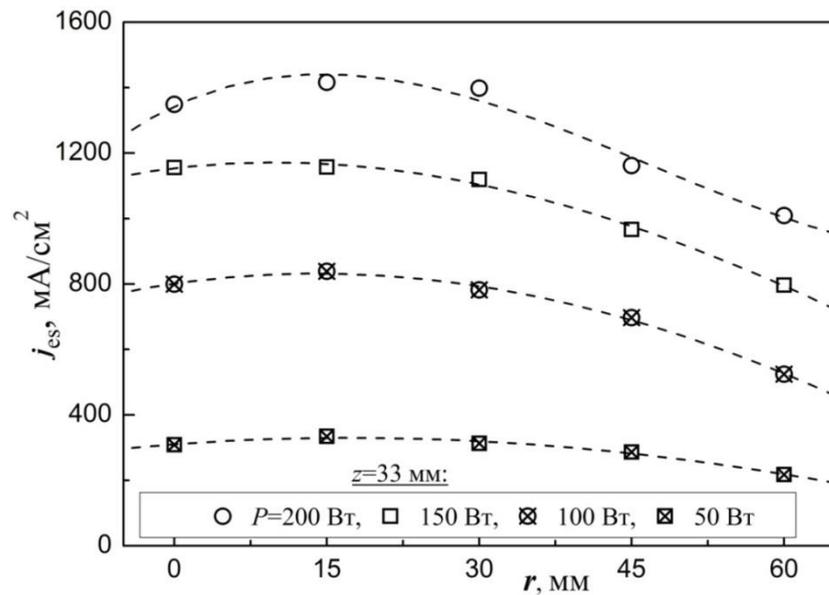


Рисунок 4.18 – Радиальные распределения электронного тока насыщения, соответствующие данным рисунка 4.16 ($z = 33$ мм)

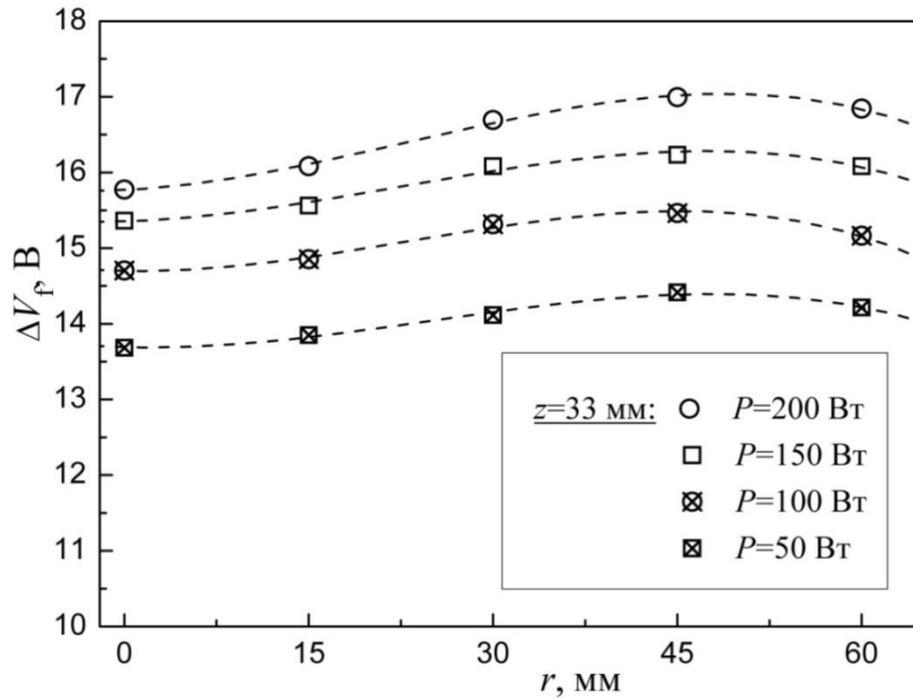


Рисунок 4.19 – Радиальные распределения разности потенциалов $\Delta V_f = V_s - V_f$ на слое объёмного заряда у цилиндрического зонда для $z = 33$ мм

4.2.2 Измерения продольно подвижным, вращательным Г-образным цилиндрическим зондом

Следующим этапом зондовой диагностики плазмы ВЧИ-разряда в модели ВЧИИП-10Ф была работа с Г-образным зондом (см. рисунок 4.20), конструкция которого позволила измерить параметры плазмы в пределах слоя газоразрядной плазмы толщины 39 мм и радиуса $r = 60$ мм, представлявшем собой плазменную «таблетку» диаметра 120 мм и толщины 39 мм, удалённую от разделительного кварцевого окна на расстояние $z = 30$ мм, то есть находившуюся непосредственно перед полкой Г для крепления ИОС (см. рисунок 2.4). Эти измерения проводились такой же, как и в случае прямого зонда, вольфрамовой нитью диаметра 0,15 мм и длины 10 мм в конструкции зонда, показанного на рисунках 3.10 – 3.12.

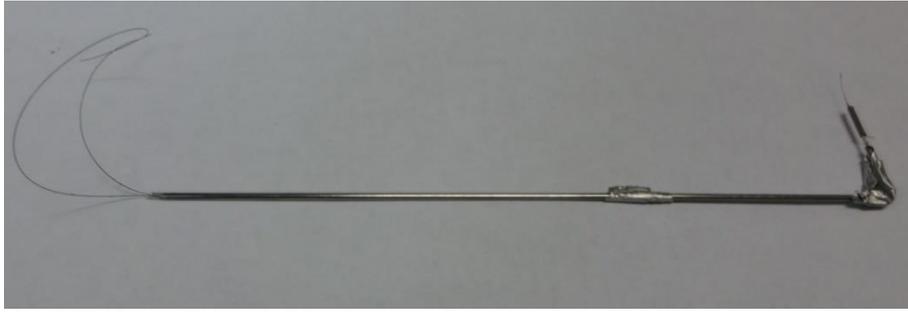


Рисунок 4.20 – Г-образный зонд Ленгмюра для измерения пространственного распределения характеристик в ГРК

На рисунке 4.21 показан Г-образный зонд, введённый в полость вакуумной камеры установки через её днище.

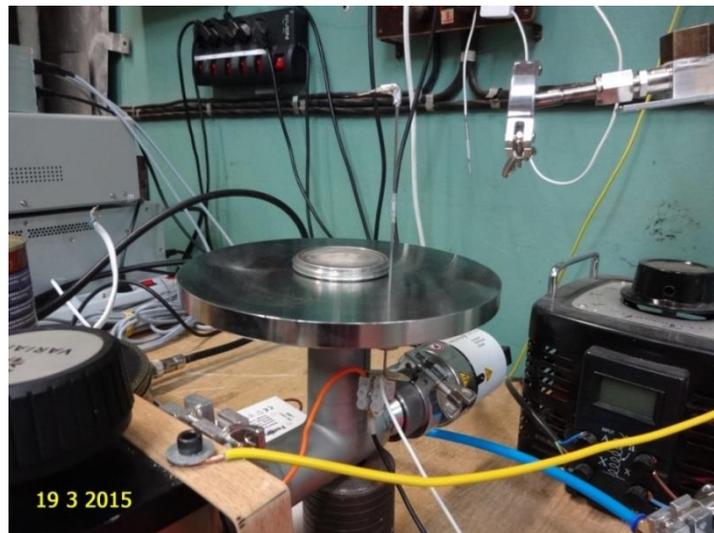


Рисунок 4.21 – Г-образный зонд Ленгмюра, установленный в днище вакуумной камеры

Его вольт-амперные характеристики регистрировались станцией VGPS-12 в трёх положениях: $r = 0$; 30; и 60 мм ($r = 30$ мм соответствовал углу поворота зонда на 60°). Оказалось, что данные этих измерений для $z = 30$ мм практически совпали с результатами для прямого зонда при $z = 33$ мм, а при удалении от индуктора на расстояние до $z = 69$ мм шагами по 13 мм показанные Г-образным зондом значения концентрации электронов медленно и плавно возрастали (в пределах погрешностей измерений) в сторону плоскости размещения ИОС. Данные результаты для крайних удалений от кварцевого окна ($z = 30$ мм и 69 мм) представлены на рисунке 4.22, 4.23.

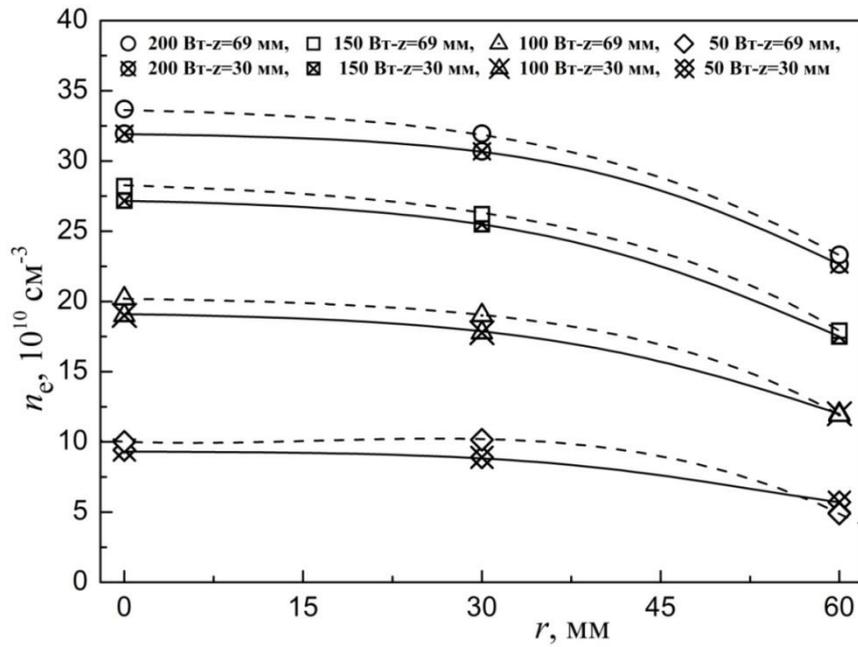


Рисунок 4.22 – Радиальные распределения n_e на удалениях от кварцевого окна $z = 30$ мм (сплошные линии) и $z = 69$ мм (пунктир) для $P = 50 - 200$ Вт

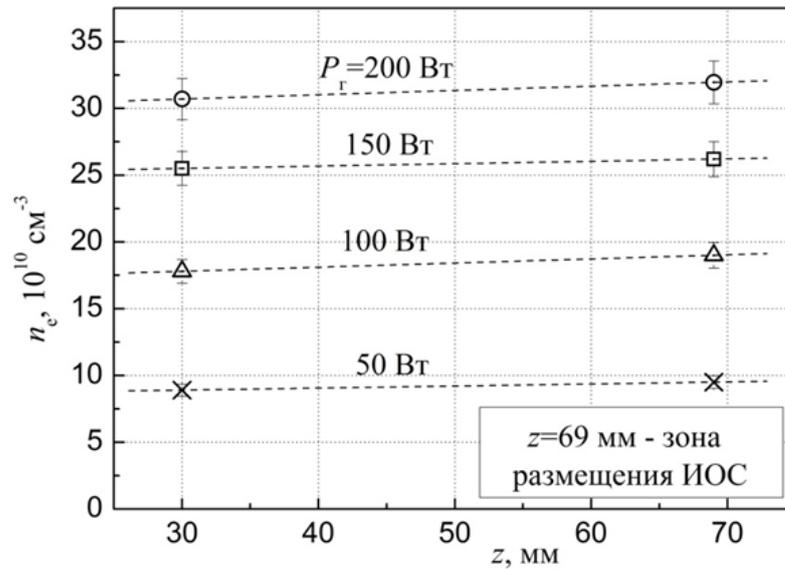


Рисунок 4.23 – Продольные распределения концентраций электронов для $r = 30$ мм в зависимости от удаления от кварцевого окна по высоте ГРК при падающих мощностях ВЧГ $P = 50 - 200$ Вт

Эти результаты свидетельствуют о высокой степени продольной равномерности плазменного образования, получаемого в ВЧИП-10Ф. Можно отметить, что подобный характер поведения концентрации ВЧИ-плазмы наблюдался в экспериментах [123], выполненных на установке с планарным индуктором без ферритового сердечника [61].

4.2.3 Анализ корректности зондовых измерений

4.2.3.1 Влияние магнитного поля индуктора на результаты локальных измерений параметров плазмы

При проведении локальных измерений параметров плазмы зондами Ленгмюра при наличии магнитного поля важно удостовериться в отсутствии существенных искажений, которые оно вносит. Можно отметить, что на рисунке 4.11 электронная ветвь зондовой характеристики не содержит признаков искажений, которые могло бы внести статическое магнитное поле. Это качественный аргумент в пользу отсутствия влияния ВЧ-магнитного поля. Для количественной оценки определим ларморовский радиус электронов: $r_L = v_e / \omega_e$, $v_e \sim 10^8$ см/с, ларморовская частота $\omega_e = eB/m_e \sim 10^8$ с⁻¹ ($B_m = 5 \cdot 10^{-4}$ Тл – максимальная величина магнитного поля, измеренная магнитными зондами в ВЧИ-плазме данной геометрии и частоты), отсюда $r_L \sim 1$ см = 10 мм, что намного меньше радиуса зонда $a = 0,075$ мм. Этот расчёт подтверждает сделанный выше качественный вывод.

4.2.3.2 Влияние рекомбинации заряженных частиц на первом зондодержателе

Общеизвестно, что при проведении зондовой диагностики плазмы особое значение придаётся размеру собирающей поверхности зонда: она должна быть такой, чтобы максимальный зондовый ток (электронный ток насыщения) был много меньше тока разряда, создавшего изучаемую плазму, с одной стороны, и достаточным для проведения полного анализа зондовых ВАХ, с другой стороны. Точнее эти условия формулировались многими

специалистами по зондовой диагностике. В работе [124] названы следующие условия корректности зондовых измерений:

- плазма неограниченна, однородна и в отсутствие зонда квазинейтральна;
- электроны и ионы имеют максвелловские распределения скоростей, характеризующиеся соответственно температурами T_e и T_i , причем $T_e \gg T_i$;
- средние длины свободного пробега электронов λ_e и ионов λ_i велики по сравнению со всеми остальными характерными размерами плазменного образования;
- каждая частица, столкнувшаяся с поверхностью зонда, поглощается и не вступает в реакцию с материалом зонда;
- потенциал пространства вне области у поверхности зонда, ограниченной слоем пространственного заряда, считается постоянным;
- толщина слоя объёмного заряда на зонде мала по сравнению с его размерами.

Приведённые условия были расширены с учетом особенностей ВЧИ-разряда и обобщены в обзоре [99], в результате чего были предложены следующие соотношения, характеризующие размеры зонда и условия проведения диагностики локальных параметров плазмы:

$$a \ln(\pi l_3/4a), b, r_{De} \ll \lambda_e \text{ и } I_p \ll I_d, I_r, I_z, \quad (4.4)$$

где l_3 – длина зонда, b – радиус зондодержателя (первого), I_p – зондовый ток, I_d – ток разряда, I_r – максимальный ток в цепи базовой поверхности (в нашем случае бомовский ток на стенку заземлённой газоразрядной камеры), $I_z = e\Gamma_e$ – ток, соответствующий скорости генерации электронов Γ_e с энергией ε в объёме размера L – характерного размера плазменного образования или длины релаксации электронов λ_ε , которая короче L .

В эти геометрические соотношения включён радиус b первого зондодержателя, который должен быть много меньше λ_e . Этот параметр явился основным предметом рассмотрения в данном подразделе работы, поскольку именно размер первого зондодержателя способен понизить концентрацию электронов и изменить другие параметры изучаемой плазмы в месте её зондирования, что существенно сказывается на качестве получаемых результатов.

В настоящей работе использовались три варианта цилиндрических зондов из вольфрамовой нити диаметром 0,15 мм трех разных длин: 3 мм, 5 мм и 10 мм. Все они были снабжены зондодержателями одного диаметра – 1,6 мм. Идея работы заключалась в изучении ВАХ зондов разной длины с одинаковым размером первого зондодержателя. Известно, что поверхность зондодержателя, расположенная рядом с областью зондирования, способствует усилению рекомбинации на ней заряженных частиц плазмы и, следовательно, снижает уровень ионизационного равновесия в изучаемой области плазмы. Цилиндрический зонд определённой

длины усредняет параметры охватываемой им плазмы, и для зондов различных длин неизменное локальное искажение параметров плазмы около зондодержателя по-разному влияет на результаты измерений [125]. В работе использован такой диапазон длин зонда, который позволил указать некоторую их границу, за пределами которой возмущения рассматриваемого вида становятся меньше общей погрешности зондовых измерений.

Результаты измерений всеми тремя зондами радиальных распределений концентраций электронов n_e для падающей мощности ВЧГ $P = 200$ Вт (поглощённая плазмой мощность при этом составляла $P_p = 176$ Вт) представлены на рисунке 4.24.

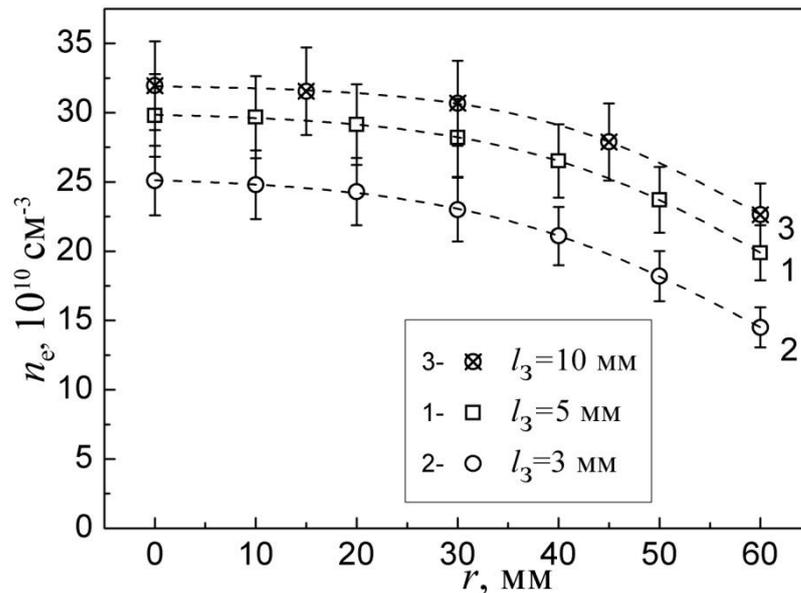


Рисунок 4.24 – Распределение концентрации электронов n_e по радиусу для $z = 33$ мм и $P = 200$ Вт для зондов различных длин

Возрастание полученных данных с увеличением длины объясняется тем, что по мере удлинения зондов роль рекомбинации заряженных частиц плазмы на зондодержателе ослабевает [126, 127]. Если данные рисунка 4.24 перестроить в зависимости $n_e(l_3)$ при различных радиальных позициях зондов, то можно видеть, что по мере удлинения зондов концентрация электронов приближаются к насыщению, что чётко указывает на снижение влияния зондодержателя.

Для взаимного сближения концентраций, полученных разными зондами в зоне перехода к насыщению, т.е. в правой части кривых $n_e(l_3)$, графики рисунка 4.25 можно привести к безразмерному виду, отложив по оси ординат отношение n_e к максимальной величине, соответствующей $l_3 = 10$ мм, а по оси абсцисс – некий безразмерный параметр, характеризующий влияние на результаты измерений рекомбинации заряженных частиц плазмы

на зондодержателе и пропорциональный длине зонда l_3 . Предложено использовать в качестве такого параметра отношение площади собирающей поверхности зонда $2\pi al_3$ к площади торцевой поверхности зондодержателя πb^2 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

$$L_3 = 2\pi al_3 / 5\pi b^2 = 0,4(a/b^2)l_3. \quad (4.5)$$

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 от зондодержателя. Подсчитаем значения L_3 в условиях проведённого эксперимента: для $l_3 = 3$ мм; 5 мм и 10 мм при $a = 0,075$ мм и $b = 0,8$ мм параметр $L_3 \approx 0,141$; 0,234 и 0,469. Согласно рисунку 4.25 верхнее значение $l_3 = 10$ мм практически соответствует насыщению кривых $n_e(l_3)$, так что при $L_3 = 0,469$ влияние зондодержателя практически незаметно. Таким образом, в условиях ВЧИ-разряда при данных условиях соотношение (4.5) позволяет оценить оптимальную величину относительной длины собирающей поверхности цилиндрического зонда, при которой первый зондодержатель не будет оказывать заметного влияния на результаты измерений.

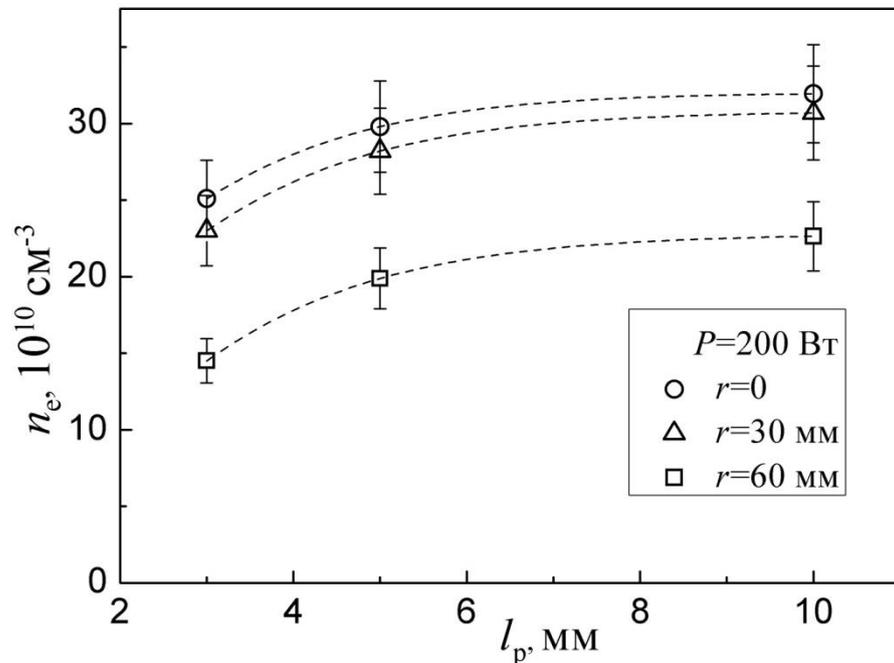


Рисунок 4.25 – Зависимость измеренной концентрации электронов от длины цилиндрического зонда при падающей мощности ВЧГ $P = 200$ Вт

Количественная характеристика этих возмущений может быть оценена с помощью зависимости нормированной концентрации электронов ксеноновой плазмы от безразмерной длины цилиндрических зондов L_3 , которая представлена на рисунке 4.26.

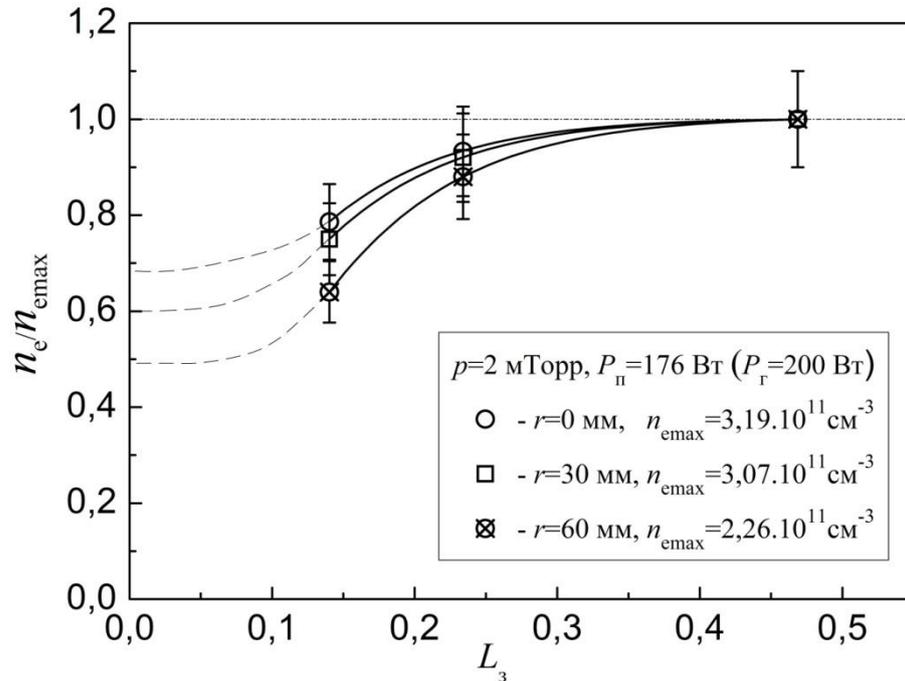


Рисунок 4.26 – Зависимость нормированной концентрации электронов от безразмерной длины цилиндрических зондов L_3 при падающей мощности ВЧГ $P = 200$ Вт

Из анализа кривых видно, что чем меньше верхнее предельное значение концентрации электронов n_e , тем круче снижаются эти функции в сторону относительного укорочения зонда. При их экстраполяции к $L_3 = 0$ они, по всей вероятности, перейдут к насыщению около зондодержателя, что иллюстрируют пунктирные линии на рисунке 4.26, причём, судя по форме измеренных кривых, уровень этого насыщения будет тем ниже, чем меньше верхнее значение n_e для заданной радиальной позиции r . Таким образом, снижение степени ионизации невозмущённой плазмы приводит к усилению возмущающего действия рекомбинации заряженных частиц плазмы на первом зондодержателе [126, 127].

На рисунке 4.26 нанесено поле погрешности измерения n_e , которое на основании обзорной работы [100] было принято равным $\pm 10\%$. Сравнивая этот размах с отклонениями измеренных n_e от предельных величин, можно задать величину такого отклонения, которое определит нужное соотношение размеров зонда согласно выражению (4.4). Например, на исследованном режиме ВЧИ-разряда, который определяется поглощённой плазмой ВЧ-мощностью $P_p = 176$ Вт при давлении ксенона $p = 2$ мТорр, можно задать степень влияния

зондодержателя, она составит порядка половины поля погрешности измерения n_e . Тогда, ориентируясь на рисунок 4.26, можно задать

$$L_3 = 0,4 \left(\frac{a}{b^2} \right) l_3 \sim 0,3. \quad (4.6)$$

Выражение (4.6) позволит задать, например, нужную для разумного пространственного разрешения длину зонда l_3 и определит остальные размеры зонда. Таким образом, имея результат измерений, представленных на рисунке 4.26, можно снизить влияние погрешностей измерений, вносимых первым зондодержателем [126, 127]. На данной основе можно оценить, например, размеры зонда из работы [98], показанного на рисунке 4.27. Видно, что по данному критерию запас точности измерений этим зондом очень велик.

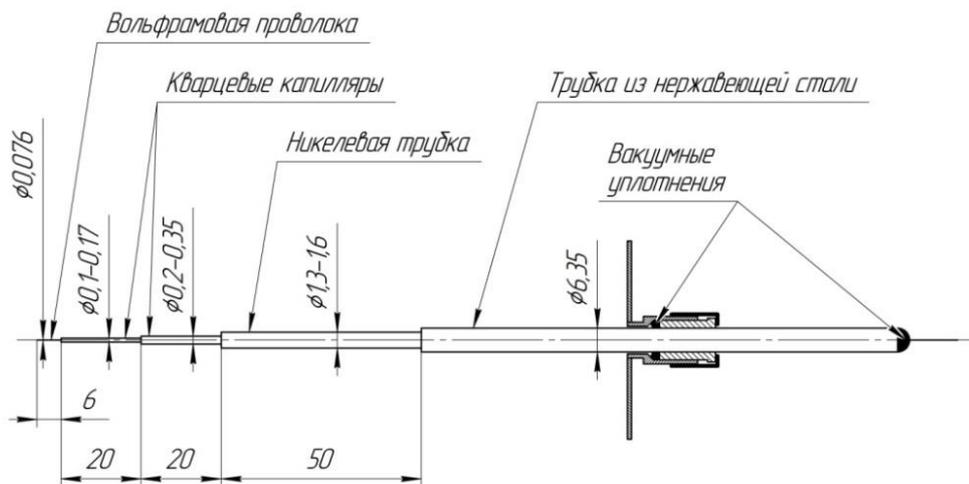


Рисунок 4.27 – Одиночный зонд из работы [98]

Представляет интерес сравнение полученных величин параметра L_3 с данными по одиночным цилиндрическим зондам, применяемым в различных коммерчески доступных зондовых станциях различных производителей. Такое сравнение дано в таблице 2.

Зонды, рекомендованные в обзоре [98], соответствуют наибольшей величине $L_3 \approx 12,6$, которая во много раз превышает все приведённые в таблице значения этого параметра. При проведении измерений в исследуемой ВЧИ-плазме наименьшее возмущение внесли бы зонды из работы [98], так как они в наименьшей мере подвержены влиянию рекомбинации заряженных частиц на первом зондодержателе. С минимальными возмущениями плазмы в настоящей работе практически совпадают характеристики станции Smart Probe [128]. Остальные две станции, Langmuir probe [129] и ESPION [130], по-видимому, возмущали бы такую плазму довольно сильно. Таким образом, применение этих зондов к ВЧИ-разряду исследуемых параметров было бы некорректным.

Эффект снижения степени ионизации ксенона и концентрации электронов мог бы возникнуть также при взаимодействии с плазмой разряда неизолированной снаружи экранирующей трубки зонда путём закорачивания участков плазмы с различающимися потенциалами пространства [131]. Однако перепад потенциала пространства вдоль траекторий перемещения прямого зонда был относительно небольшим: $\Delta V_s \leq (0,8 - 1,2)$ В (см. рисунок 4.17). Поэтому неизбежно возникающий в подобной ситуации эффект короткозамкнутого двойного макро-зонда [131] скорее всего не выходил за пределы поля погрешности измерений n_e и поэтому практически был незаметен.

Таблица 2. – Сравнение параметров одиночных цилиндрических зондов из различных работ

| Зонд. станция (производитель) | a , мм | b , мм | l_3 , мм | L_3 |
|-------------------------------------|-------------|----------|------------|----------------|
| VGPS-12 (данная работа) | 0.075 | 0.8 | 3/5/10 | 0.14/0.23/0.47 |
| VGPS (Plasma Sensors) | 0,038 | 0,085 | 6 | 12,6 |
| Smart Probe (Scientific Systems) | 0.19 | 1.25 | 10 | 0.486 |
| Langmuir probe (Impedans, Ltd.) | 0.2 | 3.25 | 10 | 0.076 |
| ESPION (Hiden Analytical) | 0.075 | 4 | 10 | 0.019 |

4.2.4 Оценка плотности ионного тока на ЭЭ ИОС имитатором плоского пристеночного зонда

Измерения имитатором плоского пристеночного зонда, описанным в предыдущем разделе, также были проведены с использованием зондовой станции VGPS-12. Вид дисплея измерительного компьютера в данном эксперименте для $r = 30$ мм при $P = 200$ Вт показан на рисунке 4.28.

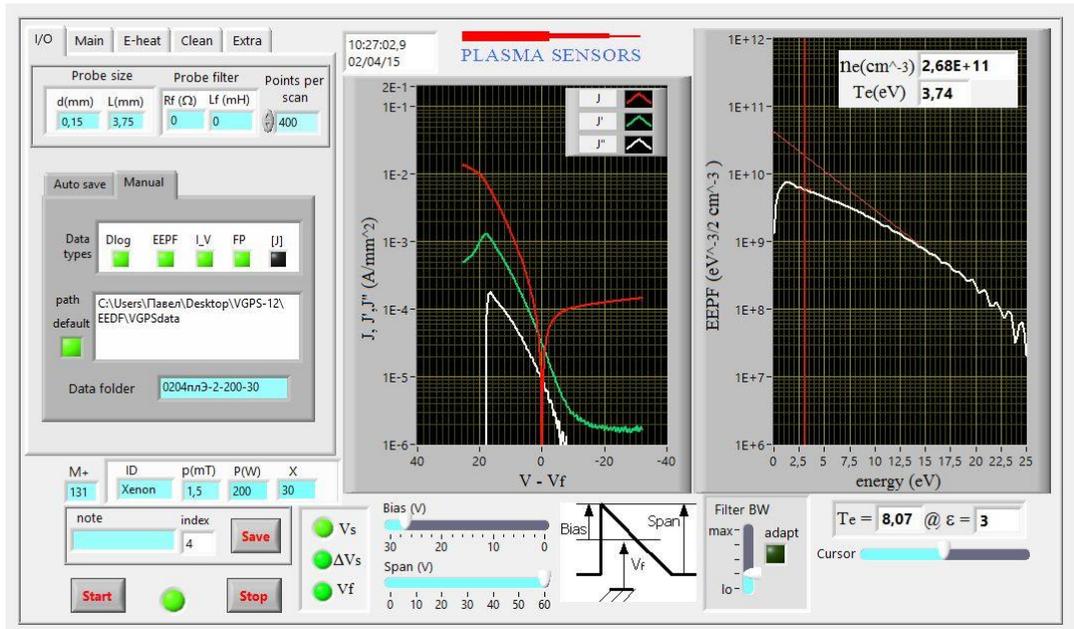


Рисунок 4.28 – Дисплей зондовой станции VGPS-12 во время измерений имитатором плоского пристеночного зонда в точке $r = 30$ мм при $P = 200$ Вт

Представленная здесь ВРЭЭ, отклонилась от линейности гораздо больше, чем в случае цилиндрического зонда в практически невозмущённой плазме (см. рисунок 3.7). Согласно изложенной выше методике анализа вида ФРЭЭ вначале оценим это отклонение качественно путём рассмотрения внешнего вида ВРЭЭ для имитатора плоского пристеночного зонда и классического цилиндрического зонда в невозмущённой зоне газоразрядного пространства при одинаковом режиме ВЧИ-разряда и в одинаковой пространственной позиции. Такое сравнение представлено на рисунке 4.29.

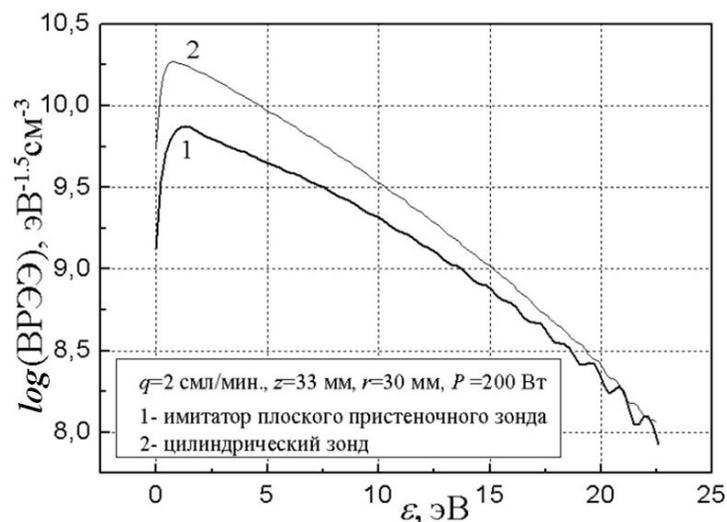


Рисунок 4.29 – ВРЭЭ в центре ВЧИ-разряда $z = 33$ мм, $r = 30$ мм при $P = 200$ Вт

Видно, что, в пристеночном пространстве ВРЭЭ намного больше удалена от прямолинейности, чем такая же функция в невозмущённой зоне. Отсюда следует, что, по всей вероятности, пристеночный слой не может считаться максвелловской средой.

Далее проведём такое сравнение в количественной форме. Для этого нужно составим отношение экспериментальных значений плотности электронного тока насыщения j_{es3} к расчетным величинам этого параметра, найденного расчётным путём по формуле (3.25) для максвелловской плазмы с использованием измеренных параметров n_e и T_e . Оказалось, что значения j_{es3} достигли только половины величин j_{esM} , т.е. их отношение составило около 0,5. Этот результат указал на существенное отклонение реальной ФРЭЭ от максвелловской функции. Такое различие сравниваемых плотностей электронного тока насыщения подтвердило отмеченное выше качественное отклонение реальной ФРЭЭ от максвелловской функции для имитатора плоского пристеночного зонда в торце керамического стержня.

Помимо проведённого сопоставления ВРЭЭ для двух видов зондов Ленгмюра можно также сравнить и стандартный набор зондовых параметров, полученный интегрированием этих функций и анализом соответствующих ВАХ этих зондов. Такое сравнение представлено на рисунках 4.30–4.33.

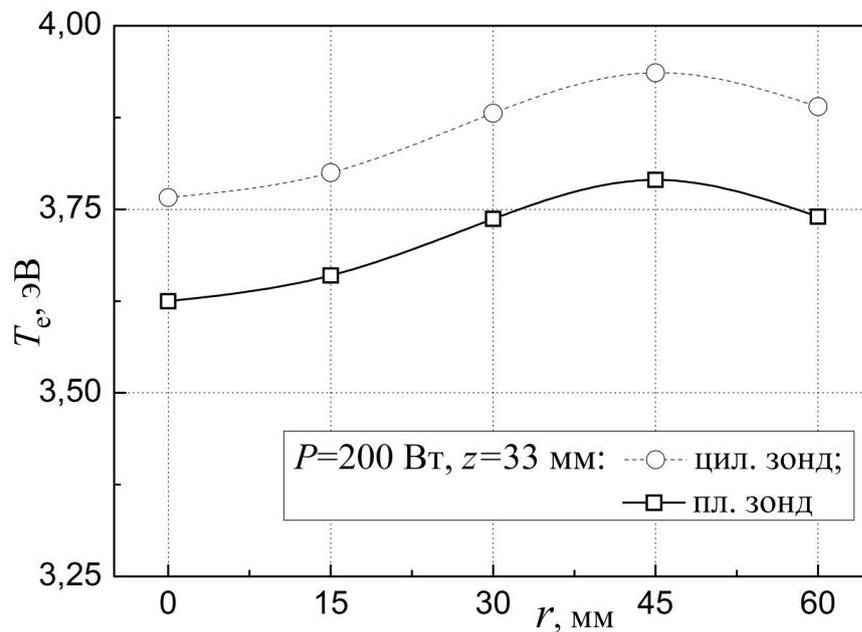
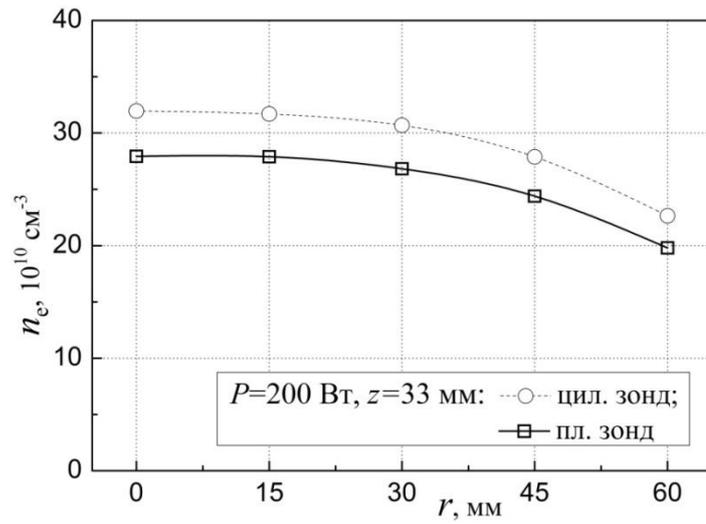
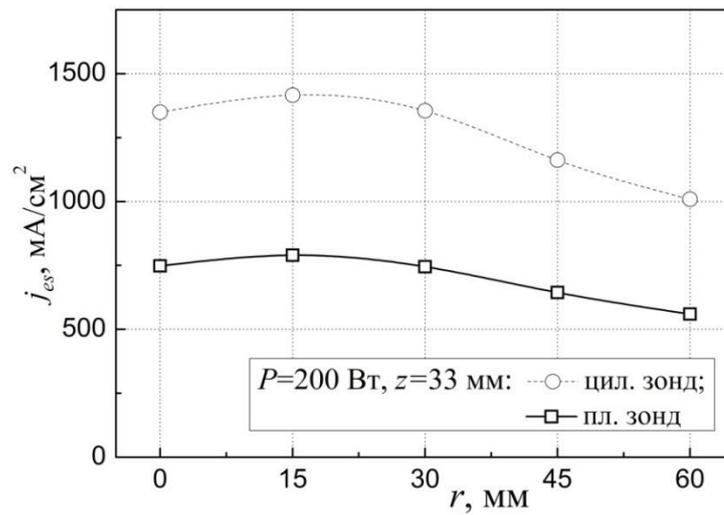
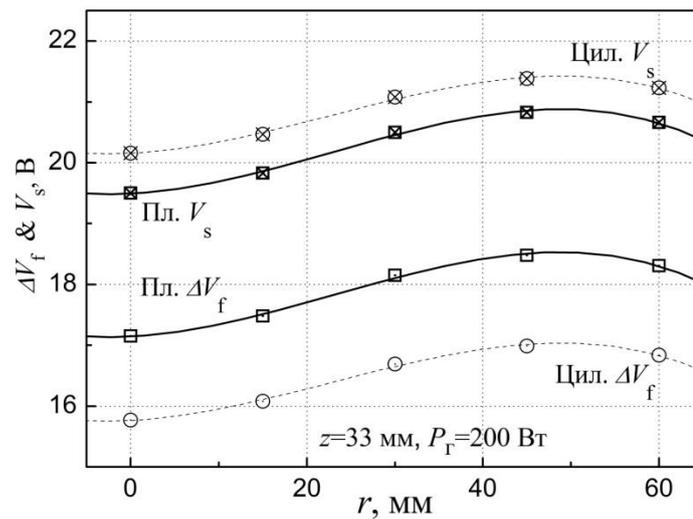


Рисунок 4.30– Радиальные распределения T_e для двух видов зондов

Рисунок 4.31 – Радиальные распределения n_e для двух видов зондовРисунок 4.32 – Радиальные распределения j_{es} для двух видов зондовРисунок 4.33 – Радиальные распределения потенциалов пространства V_s и разностей зондовых потенциалов $\Delta V_f = V_s - V_f$ для плоского и цилиндрического зондов

Стоит отметить, что на рисунке 4.33 к $\Delta V_f(r)$ добавлены $V_s(r)$, чтобы объяснить, почему при переходе к плоскому зонду возросли значения ΔV_f . В невозмущённой плазме плавающий потенциал $V_f = 4,39 \text{ В} = \text{const.}$, а в имитированной пристеночной плазме плавающий потенциал $V_f = 2,35 \text{ В} = \text{const.}$ уменьшился из-за снижения T_e в пристеночной плазме.

Таким образом, пристеночная плазма оказывается явно немаксвелловской средой, где эффект Бома неприменим, и использование формулы Бома для оценки плотности ионного тока на стенку под плавающим потенциалом оказывается некорректно. Следовательно, подобная оценка возможна лишь путём экстраполяции ионных ветвей зондовых ВАХ к плавающему потенциалу зонда V_f . Обычно такие ветви близки к линейным зависимостям, что и определяет вид применяемых экстраполяций. В настоящей работе экстраполировались ионные ветви логарифмических ВАХ, а также двойных логарифмических ВАХ имитатора плоского пристеночного зонда, как наиболее обоснованных теоретически [132].

В качестве примера экстраполяционной процедуры на рисунке 4.34 показана ионная ветвь логарифмической ВАХ плоского зонда и экстраполирующая касательная к ней для ВАХ в средней позиции радиальных перемещений зондов, т.е. при $r = 30 \text{ мм}$, и для верхнего значения падающей мощности ВЧГ $P = 200 \text{ Вт}$ (когда $P_p = 175 \text{ Вт}$). На рисунке 4.35 проведена такая же процедура с двойной логарифмической характеристикой ВАХ плоского зонда согласно методике из [132].

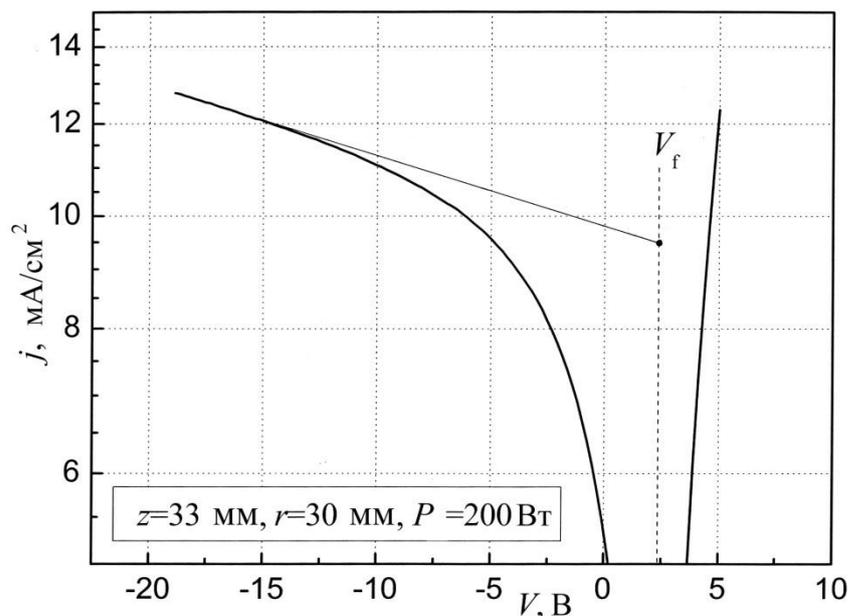


Рисунок 4.34 – Пример экстраполяции ионной ветви логарифмической ВАХ плоского зонда к плавающему потенциалу V_f

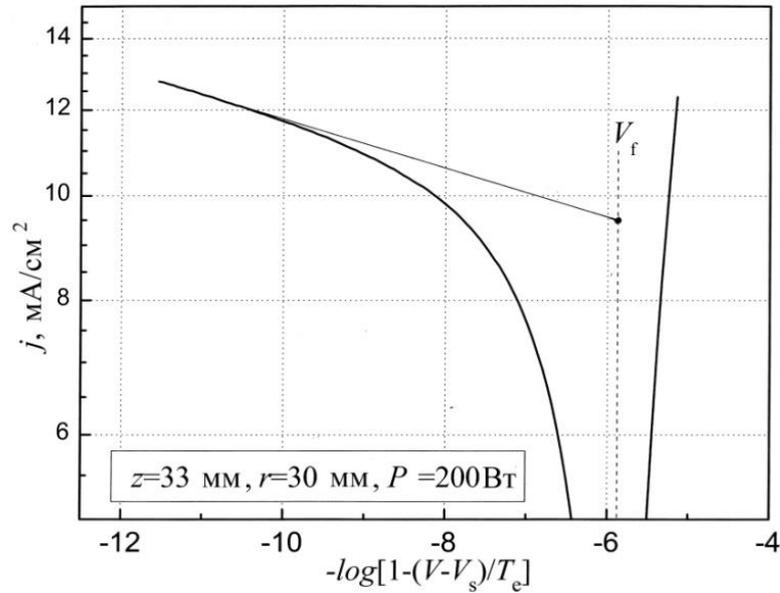


Рисунок 4.35 – Пример экстраполяции ионной ветви двойной логарифмической ВАХ плоского зонда к плавающему потенциалу V_f

Оказалось, что в обоих случаях процедуры экстраполяции показали одно и то же значение плотности ионного тока на плоский зонд $j_{if} \approx 9,5 \text{ mA/cm}^2$. Причина такого совпадения, по-видимому, заключается в относительно небольшой длине экстраполирующих прямых от ионных ветвей до плавающего потенциала. В работе [132] данная экстраполяция проводилась до потенциала пространства, где результат по логарифмической ВАХ оказался ниже экстраполяции логарифмической ВАХ более чем в 2 раза.

Для удобства сравнения приведём в числовом виде данные рисунков 4.30 – 4.32, относящиеся к зондовой позиции $r = 30 \text{ мм}$ (левая часть записи относится к пристеночной плазме, правая – к невозмущённой плазме): $T_e = 3,74/3,88 \text{ эВ}$, $n_e = (2,68/3,07) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $j_{es3} = 775/1398 \text{ mA/cm}^2$ (соответствующие $V_s = 20,5/21,1 \text{ В}$). Отсюда хорошо виден масштаб изменения параметров плазмы при переходе из невозмущенной среды к пристеночному слою. Отметим, что определённая плоским зондом плотность ионного тока $j_{if_{\text{экс}}} \approx 9,2 \text{ mA/cm}^2$ в радиальной позиции $r = 30 \text{ мм}$ оказалась почти в 2 раза ниже результата для цилиндрического зонда в невозмущённой плазме (см. рисунок 4.36). Очевидно, что это различие иллюстрирует степень влияния стационарного пристеночного слоя около керамической стенки имитатора плоского пристеночного зонда.

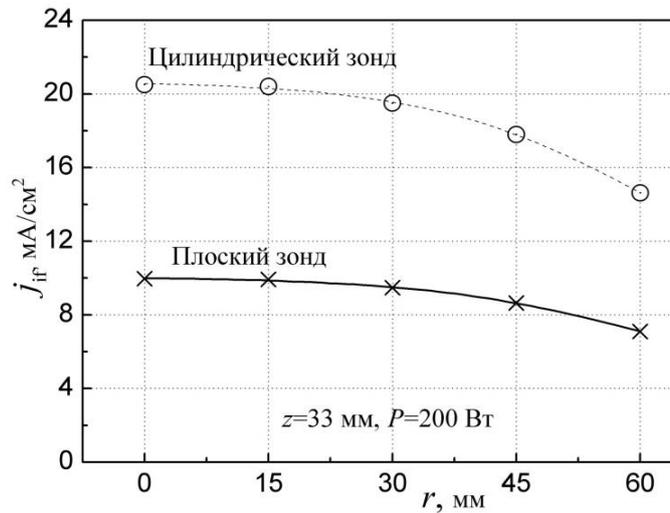


Рисунок 4.36 – Сопоставление результатов измерений плотности ионного тока насыщения плоского и цилиндрического зондов

Процедуры экстраполяции, показанные на рисунках 4.34 и 4.35, выполнялись во всех точках измерений в проведённом эксперименте. Радиальные зависимости этих результатов, соответствующие падающей ВЧ мощности ВЧГ $P = 200$ Вт и поглощённой плазмой ВЧ мощности $P_p = 175$ Вт, представлены на рисунке 4.36. Очевидно, что они в количественной форме определяют режим извлечения ионов ЭЭ ИОС изучаемой модели ГРК.

На рисунках 4.37 и 4.38 представлены итоговые экспериментальные данные по радиальным зависимостям плотности ионного тока и концентрации электронов по радиусу при разных мощностях P , соответственно.

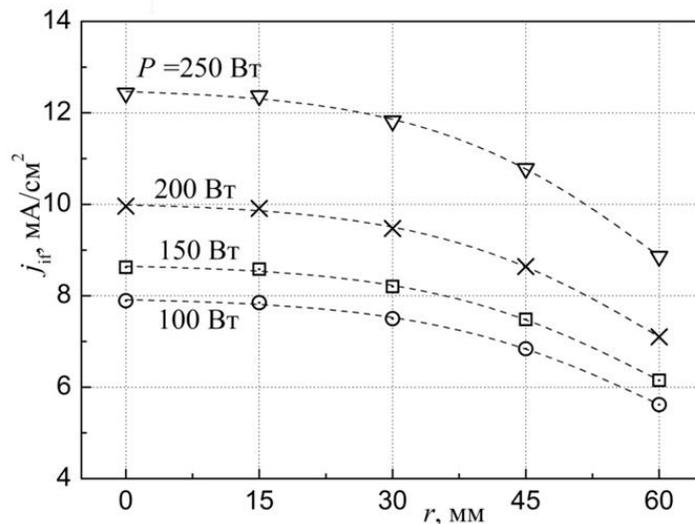


Рисунок 4.37 – Зависимости изменения плотности ионного тока по радиусу при падающих мощностях P от 100 Вт до 250 Вт

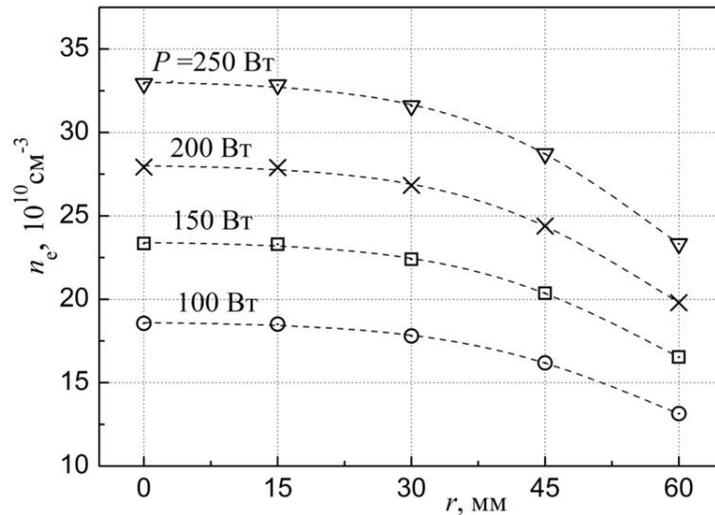


Рисунок 4.38 – Зависимости концентраций электронов по радиусу при падающих мощностях ВЧГ от 100 до 250 Вт

Знание таких распределений весьма важно для грамотного и экспериментально обоснованного расчёта формы и размеров ускорительных ячеек ИОС. Заметим, что этот результат был получен при отсутствии электродов ИОС, поскольку на данном этапе изучались физические параметры и технический облик только газоразрядного узла модели ВЧИИП-10Ф. Данные измерения проводились в среднем сечении газоразрядного пространства ГРК. В силу экспериментально установленного равномерного продольного распределения плазмы ксенона вплоть до сечения, в котором впоследствии была установлена ИОС модели ВЧИИП-10Ф (см. рисунок 4.22) их результаты непосредственно характеризуют плазму перед ЭЭ ИОС. Поэтому в дальнейшем результаты испытаний ИОС сравниваются с данными рисунка 4.37.

4.3 Выводы раздела 4

Интегральная диагностика газоразрядного узла позволила определить его энергоэффективность и выявить пути совершенствования конструкции. Было проведено сопоставление полученных характеристик с другими образцами ВЧИИП.

Проведена диагностика локальных параметров плазмы по радиусу и в объеме ГРК ВЧИИП-10Ф, выполнен анализ корректности измерений.

Апробирован способ определения толщины призондового слоя и массы ионов в ВЧИ-разряде при помощи зондов Ленгмюра.

Предложен безразмерный критерий влияния соотношения размеров первого зондодержателя и собирающей поверхности зонда Ленгмюра.

Применена предложенная в разделе 3 технология использования имитатора плоского пристеночного зонда, которая позволила оценить уровень плотности ионного тока и качество его радиального распределения в слое перед ЭЭ ИОС, а также предварительно оценить ток ионного пучка при работе ВЧИИП-10Ф.

Сравнение этих результатов с данными прототипа показало, что равномерность плазмы в ГРК данной модели можно заметно улучшить путём увеличения относительного размера центрального отверстия индуктора.

Проведённое исследование параметров ВЧИИП-10Ф показало, что конструктивная схема данного источника, положенная в основу изучавшейся модели, представляет собой перспективное устройство для ионных устройств нового поколения: как для ВЧИИП двигательного применения, так и для ВЧИД в плане упрощения их конструкции, повышенной энергоэффективности и пространственной равномерности плазмы перед зоной ускорения ионов.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННОГО ПУЧКА ВЧИИП-10Ф

5.1 Расчет и проектирование ИОС

5.1.1 Конструктивные элементы и геометрические параметры ИОС

Проектируемая ИОС состоит из трех перфорированных электродов – ЭЭ, УЭ и ЗЭ. При конструировании ИОС необходимо произвести расчет единичной ячейки, формируемой соосными отверстиями в трех электродах. Спецификой задачи создания ИОС ионного источника космического применения является требование обеспечить минимальную расходимость ионного пучка.

На рисунке 5.1 представлена принципиальная схема ИОС, где отражены основные процессы в системе.

Физические и математические модели ИОС с учетом особенностей плазменного эмиттера как источника ионов разработаны еще в прошлом веке.

В последнее десятилетие появились программные продукты, совместимые с персональными компьютерами, и которые могут служить надежным инструментом для численного моделирования тех или иных процессов в ИОС. К числу таких инструментов относится программа IGUN. В данном подразделе приведены результаты расчета траекторий ионов пучка и обоснование выбора геометрических параметров ИОС, вытекающих из требований применения в ВЧИИП.

Для рассматриваемой задачи характерны высокие значения первеанса $\Pi_i = \frac{J}{U_{ex}^{3/2}}$, где J – ток ионов в ячейке в амперах, U_{ex} – разность потенциалов между ЭЭ и УЭ в вольтах, при которых пучок первичных ионов у плазменной границы формируется при сильном влиянии объемного заряда ионов. Задачей численного моделирования является выбор геометрии элементарной ячейки ИОС, при которой обеспечивается выход ионов пучка без взаимодействия с электродами ИОС с минимальным полууглом расходимости.

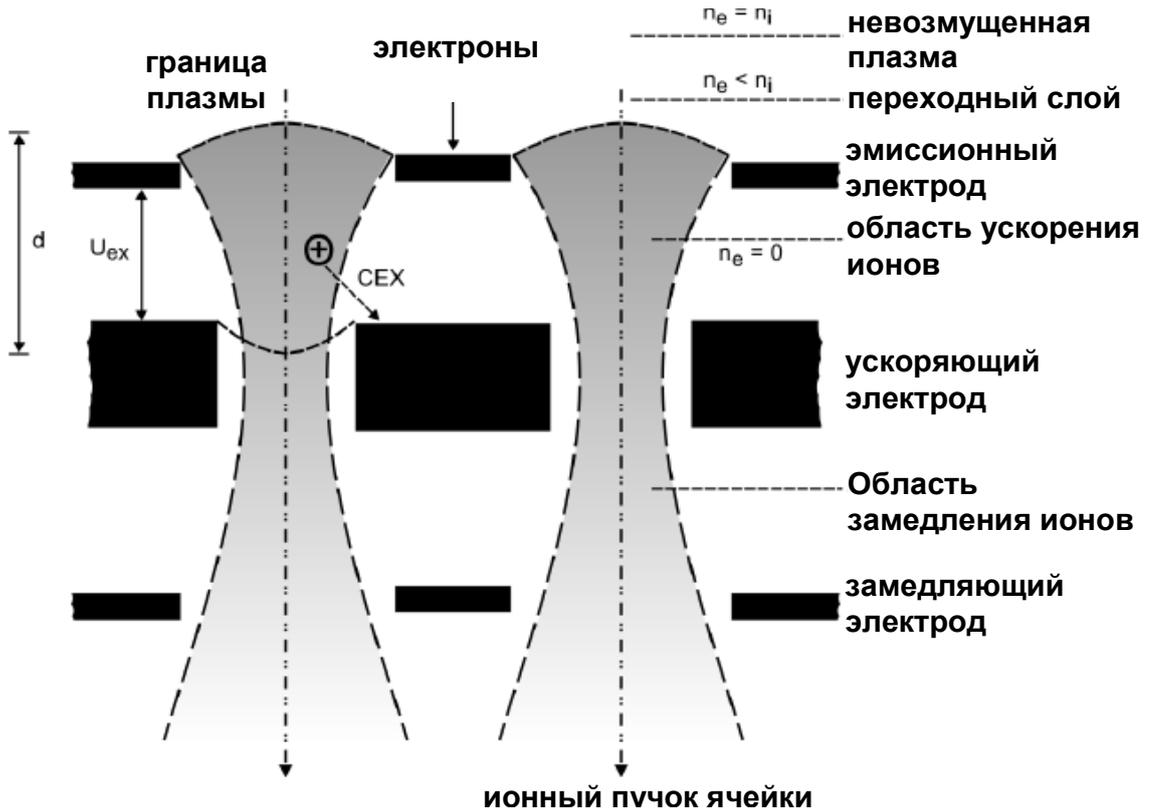


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема ИОС

Схема ИОС, поясняющая расчетную модель, приведена на рисунке 5.1. Приведены две соседние ячейки с круглыми отверстиями, формирующими «элементарные» ионные пучки. Таких элементарных ячеек в зависимости от диаметра ИОС может быть от нескольких сотен до нескольких тысяч. Газоразрядная плазма («невозмущенная» плазма) характеризуется концентрацией $n_e = n_i$ и электронной температурой T_e . Плазменный объем ограничен перфорированным ЭЭ, находящимся под положительным потенциалом U_+ . Баланс ионов и электронов на ЭЭ, находящемся под плавающим потенциалом, выполняется, когда плазма из-за более высокой подвижности электронов приобретает положительный по отношению к ЭЭ потенциал V_{Π} . Между невозмущенной плазмой и границей плазмы в отверстии ЭЭ устанавливается переходный слой толщиной в несколько дебаевских длин [133]. Когда электронный ток, равный по абсолютной величине извлекаемому ионному току, отбирается электродом, контактирующим с плазмой, и на который от внешнего источника подается потенциал U_+ , то ЭЭ остается под плавающим потенциалом V_{Π} по отношению к плазме. Его величина оценивается на основании теории двойного слоя из уравнения равенства токов ионов j_i и электронов j_e в данном случае на ЭЭ в условиях ограничения по пространственному заряду ионов:

$$I_e \approx I_i, \quad (5.1)$$

$$j_e = \frac{1}{4} en_e \bar{v}_e \exp\left(-\frac{eV_{II}}{T_e}\right), \quad (5.2)$$

где $\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8T_e}{\pi m_e}}$ – средняя тепловая скорость электронов при максвелловском распределении электронов по энергиям.

В результате из (5.1) и (5.2) следует условие баланса токов – приравняем (5.2) к формуле Бома (3.25), откуда

$$V_{II} \approx -\frac{T_e}{e} \ln\left(0,86 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot m_e}{m_i}}\right). \quad (5.3)$$

Для ксенона $\frac{m_i}{m_e} \approx 24 \cdot 10^4$ и

$$V_{II} \approx 5,8 \cdot \frac{T_e}{e}. \quad (5.4)$$

Условия баланса ионов и электронов на ЭЭ нарушается, если внешний источник питания подключен непосредственно к ЭЭ. В этом случае ток электронов на ЭЭ $I_{ЭЭ}^e$ превышает ток ионов $I_{ЭЭ}^i$ на величину тока I_{II} ионов пучка.

Если принять геометрическую прозрачность ЭЭ (отношение площади отверстий к площади ЭЭ) σ_F , то потенциал плазмы примет вид:

$$V_i^* = -\frac{T_e}{e} \ln\left[\frac{0,86}{1-\sigma_F} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot m_e}{M_i}}\right]. \quad (5.5)$$

В реальных конструкциях ИОС $\sigma_F \approx 0,45-0,55$. Приняв, для определенности $\sigma_F = 0,5$, получим $V_i^* \approx 5 \frac{T_e}{e} < V_{II}$. Отличие значений V_{II} , рассчитанных по (5.3) и (5.5) невелико.

В трех-электродной ИОС, реализующей схему «ускорение-замедление», УЭ находится под отрицательным потенциалом U_- . Между ЭЭ и УЭ извлекаемый пучок ионов формирует объемный заряд ионов, ограничивающий плотность тока эмиссии с границы плазменного эмиттера.

На выходе пучка устанавливается ЗЭ, который заземлен. За ЗЭ происходит компенсация пространственного заряда ионов электронами, поступающими в объем пучка либо со специально установленного источника электронов (нейтрализатора), либо за счет эмиссии электронов со стенок вакуумной камеры. В любом случае в этой области образуется стационарная плазма, потенциал которой V_{II} положителен по отношению к ЗЭ (пучок ионов является потенциальной ловушкой для электронов), а пространственный заряд ионов полностью скомпенсирован электронами.

Впервые проблему выбора формы электродов для получения слабо расходящегося пучка заряженных частиц (электронов) в условиях действия объемного заряда рассмотрел Пирс. Поскольку в электростатической системе траектории заряженных частиц не зависят от их удельного заряда, форма, найденная Пирсом для электронов применима и к ионам. Найденную Пирсом форму электродов в литературе называют «пушкой Пирса». Пирс нашел точные аналитические решения для двухэлектродных элементарных ячеек ИОС с твердым эмиттером щелевой и осесимметричной геометрии, в которых может быть получен ламинарный не расходящийся ионный пучок. Пирс рассматривал предельный случай, когда электрическое поле на поверхности эмиттера равно нулю (ток насыщения). В этом случае связь между параметрами электростатической системы и пучка – ускоряющим потенциалом U_{ex} , расстоянием между эмиттером и УЭ l , плотностью тока пучка ионов j_i и родом газа (удельным зарядом иона e/M_i) – описывается уравнением Чайлдса-Ленгмюра-Шоттки:

$$j_i = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{M_i}} \frac{U_{ex}^{3/2}}{l^2}. \quad (5.6)$$

При математическом анализе физической проблемы формирования пучка был получен важный практический результат: показано, что критерием подобия ИОС является параметр, названный первеансом:

$$\Pi = \frac{I_i}{U^{3/2}}, \quad (5.7)$$

где I_i – ток ионов в отверстии ЭЭ.

В идеальном случае пирсовской геометрии при круглом отверстии диаметра d_0 для величины Π получаем выражение:

$$\Pi = \frac{\pi}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{M_i}} \frac{d_0^2}{l^2}. \quad (5.8)$$

Из этой формулы видно, что для заданного рабочего газа первеанс является критерием геометрического подобия электростатической ускорительной системы. В двух геометрически подобных системах на разных газах первеансы отличаются на корень квадратный из отношения масс ионов.

В практических конструкциях ИОС с плазменным эмиттером извлекаемый ионный ток меньше рассчитываемого по уравнению (5.7) по двум причинам:

- 1) из-за необходимости фокусировки пучка в отверстии УЭ (см. рисунок 5.1) плазменный эмиттер в отверстии ЭЭ является вогнутым;
- 2) из-за эффекта отверстия в УЭ эквипотенциаль, соответствующая потенциалу УЭ, располагается в глубине отверстия в нем, что приводит к увеличению «эффективного»

межэлектродного расстояния $l_{эф} > l$ (см. рисунок 5.1); это и обуславливает снижение плотности тока и, как следствие, снижение первеанса.

Величина $l_{эф}$ не поддается аналитическому расчету. В случае плазменного, а не твердого эмиттера, расчет траекторий ионов усложняется, так как конфигурация границы плазмы не может быть задана, а определяется из решения самосогласованной задачи электростатического поля с подвижной границей. Для этого случая строгих аналитических решений не найдено.

На практике проблема расчета ИОС с плазменным эмиттером ставится таким образом: исследуется ячейка с геометрией ЭЭ с каким-то приближением соответствующая пушке Пирса («квазипирсовская геометрия»), и определяется значение первеанса, при котором достигается необходимая геометрия пучка ионов (в данном случае с минимальной расходимостью). При заданных потенциалах на электродах по полученному значению первеанса рассчитывается плотность ионного тока и концентрация плазмы, обеспечивающая данную плотность ионного тока.

5.1.2 Поиск решений по нахождению минимального угла расходимости ионного пучка

В данной работе была реализована следующая логика расчетного исследования. За основу брались расчеты, произведенные ранее в [134] для легких газов (водорода и дейтерия) применительно к проблеме создания системы формирования ионного пучка в инжекторах быстрых атомов для нагрева плазмы в токамаках. Эти исследования проводились для щелевой ИОС, то есть для плоской геометрии. Полученные в работе расчетные результаты были экспериментально подтверждены.

При анализе экспериментальных результатов (оптимизации режимов по углу расходимости пучка) для выбранных геометрических размеров и рода газа удобно пользоваться выражением: $\Pi_i^* = \frac{j_i}{U_{ex}^{3/2}}$ с размерностью $A/m^2B^{3/2}$, как это приведено на рисунке 5.3.

На рисунке 5.2 приведена трех электродная расчетная ячейка щелевой ИОС источника ионов водорода [134], к которой относятся экспериментальные данные рисунка 5.3.

Расчеты и эксперименты производились для плоской ячейки следующей геометрии: $t_1 = 1$ мм, $d_1 = 3,3$ мм и $\delta_2 = 1,2$ мм. Зависимость полуугла расходимости пучка ионов θ_{\perp} в градусах от параметра Π_i^* приведена на рисунке 5.3.

Из рисунка 5.3 видно, что при соответствующем выборе параметров разряда (плотности ионного тока) можно получить полуугол расходимости пучка на уровне единиц градусов. Полученные результаты для легких газов могут быть перенесены на любой рабочий газ, ускоряющее напряжение и геометрию ячейки при выполнении принципов подобия.

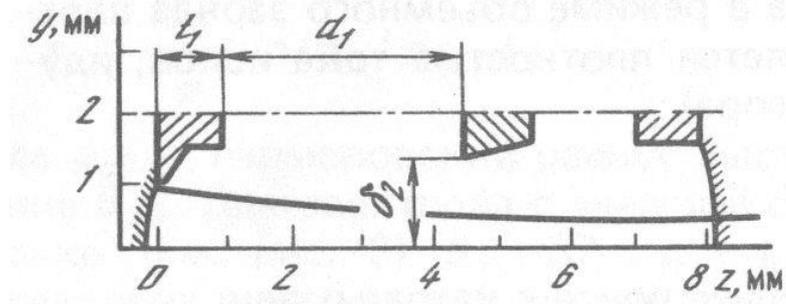


Рисунок 5.2 – Расчетная ячейка ИОС [134]

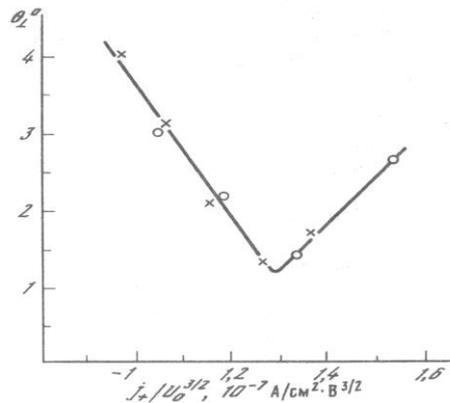


Рисунок 5.3 – Зависимость угла поперечной расходимости пучка от плотности ионного тока и разности потенциалов [134]

5.1.3 Предварительный расчет ИОС

Применительно к проблеме ИОС ВЧИИП необходимо получить зависимость полуугла расходимости пучка от первеанса для различных геометрических параметров и обосновать выбор оптимального конструктивного решения.

В щелевой ИОС отверстия имеют вид щелей, у которых длина в 5 и более раз превышает ширину. Особенность щелевой ИОС заключается в том, что 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. В ВЧ-разряде температура ионов имеет порядок величины около $500 \text{ K} \approx 0.05 \text{ эВ}$, а энергия ионов на выходе, принятая в [135], – 4000 эВ .

Отсюда тангенс полуугла расходимости пучка вдоль щели: $tg\alpha = \sqrt{\frac{0.05}{4000}} \approx 0.01$, откуда $\alpha < 0.01 \text{ рад}$. Возможно, что на расходимость струи вдоль щели могут влиять колебания потенциала разряда, и реальная расходимость струи будет выше, но, как показывают исследования щелевой ИОС, расходимость струи вдоль щели будет существенно ниже, чем в поперечном направлении.

В расчетах рассматривались варианты ширины щели в диапазоне 2 – 4 мм, расстояний между ЭЭ и УЭ 1.7 мм и 3 мм при неизменной толщине и форме электродов: толщина ЭЭ – 1 мм, толщина УЭ – 1 мм, толщина ЗЭ – 0.5 мм; расстояние между ЗЭ и УЭ 1.5 – 3 мм. Потенциал ЭЭ – 4500 В, УЭ – -500 В, ЗЭ – 0 В. В расчетах варьировался приведенный первеанс за счет изменения плотности ионного тока и соответствующего изменения концентрации плазмы. Задание граничного условия по потенциалу плазмы в разряде описано в [135].

Результаты расчета приведены на рисунках 5.4 – 5.13. На рисунках 5.4 и 5.5 представлены конфигурация ионного пучка и зависимость полуугла расходимости пучка ионов от приведенного первеанса при ширине щели в 2 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ в 1.7 мм. Минимальная расходимость ионного пучка соответствует концентрации плазмы $2.1 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$, и плотности ионного тока в 68 А/м^2 .

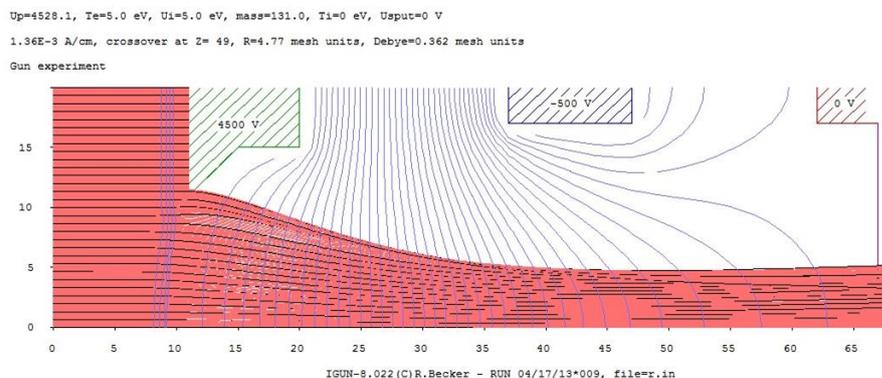


Рисунок 5.4 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 2 мм, расстоянии между ЭЭ и УЭ 1.7 мм



Рисунок 5.5– Зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка расчета рисунка 5.4

На рисунках 5.6 и 5.7 приведены конфигурация ионного пучка и зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса при ширине щели в 2 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ в 2 мм. Минимальная расходимость соответствует концентрации плазмы $1.9 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и плотности ионного тока в 61.5 A/m^2 .

$U_p=4528.1$, $T_e=5.0 \text{ eV}$, $U_i=5.0 \text{ eV}$, $mass=131.0$, $T_i=0 \text{ eV}$, $U_{sput}=0 \text{ V}$
 $1.23E-3 \text{ A/cm}$, crossover at $Z= 52$, $R=4.82 \text{ mesh units}$, $Debye=0.381 \text{ mesh units}$
 Gun experiment

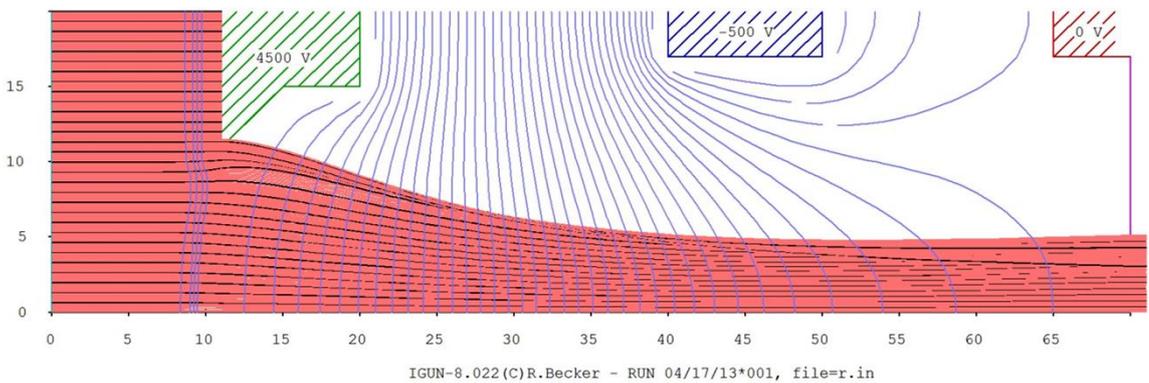


Рисунок 5.6 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 2 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ 2 мм



Рисунок 5.7 – Зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка расчета рисунка 5.6

На рисунках 5.8 и 5.9 приведены конфигурация ионного пучка и зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса при ширине щели 3 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ в 1.7 мм. Минимальная расходимость соответствует концентрации плазмы $1.84 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ и плотности ионного тока в 45.7 А/м^2 .

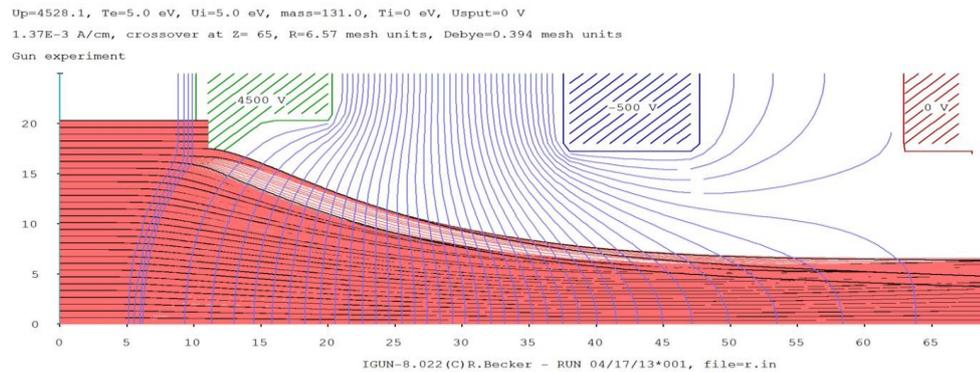


Рисунок 5.8 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 3 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ 1.7 мм

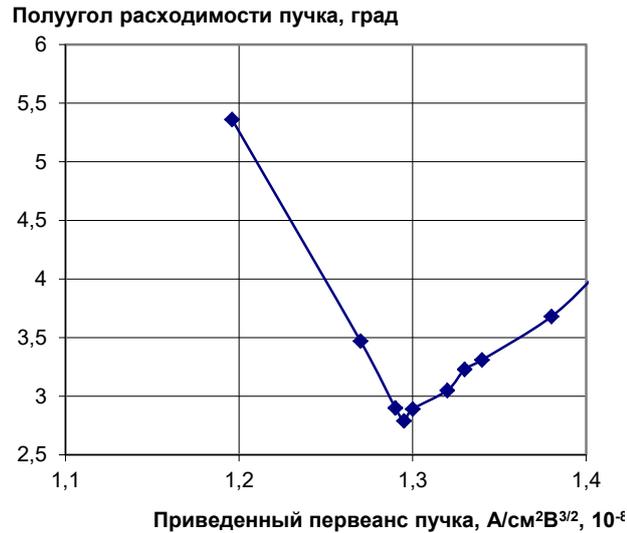


Рисунок 5.9 – Зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка расчета рисунка 5.8

На рисунках 5.10 и 5.11 приведены конфигурация ионного пучка и зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка при ширине щели 3 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ 2 мм. Минимальная расходимость соответствует концентрации плазмы $1.63 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ и плотности ионного тока пучка 39 А/м^2 .

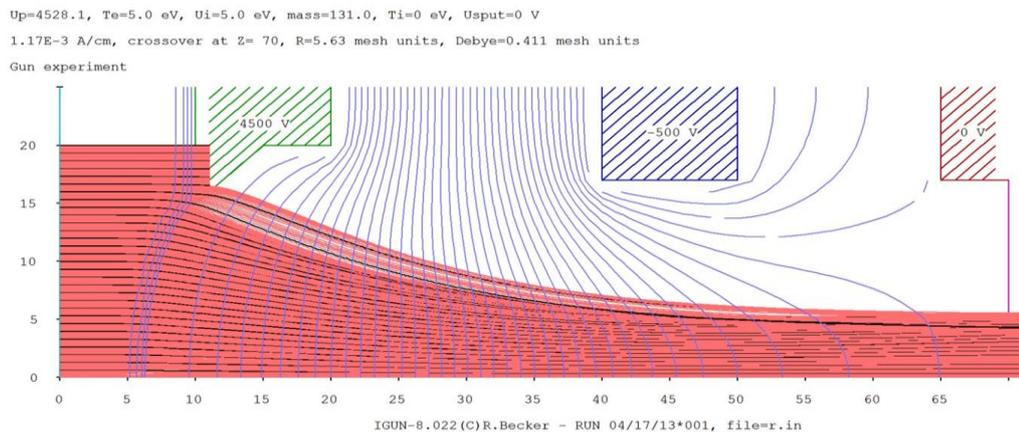


Рисунок 5.10 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 3 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ 2 мм

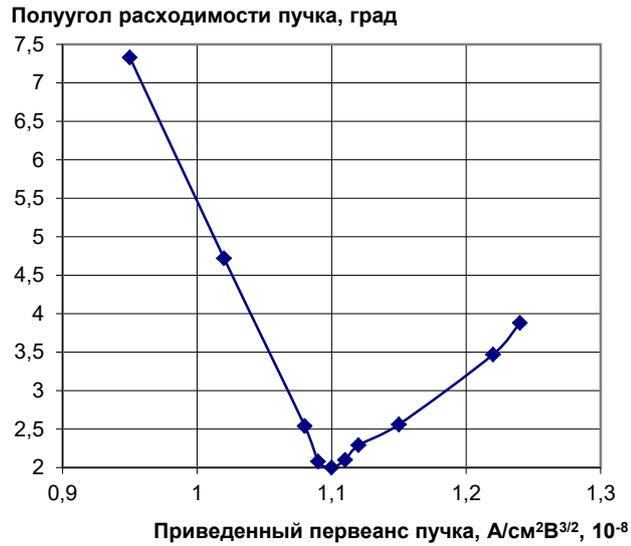


Рисунок 5.11 - Зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка расчета рисунка 5.10

На рисунках 5.12 и 5.13 приведены конфигурация пучка и зависимость полуугла расходимости от приведенного первеанса при ширине щели в 2 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ равном 3.5 мм. Минимальная расходимость соответствует концентрации плазмы равной $1.63 \times 10^{17} m^{-3}$, плотности ионного тока в $39 A/m^2$.

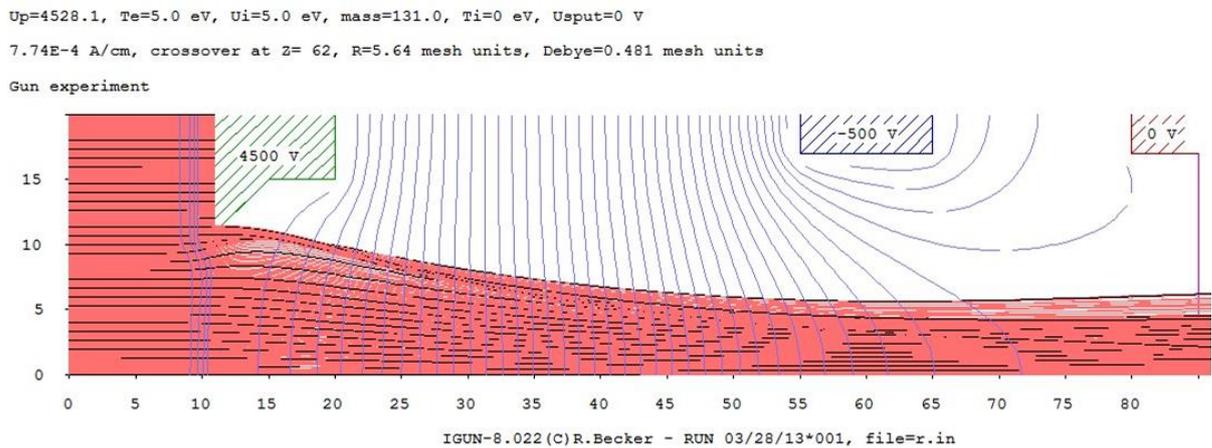


Рисунок 5.12 – Конфигурация пучка при ширине щели 2 мм и расстоянии между ЭЭ и УЭ 3.5

мм

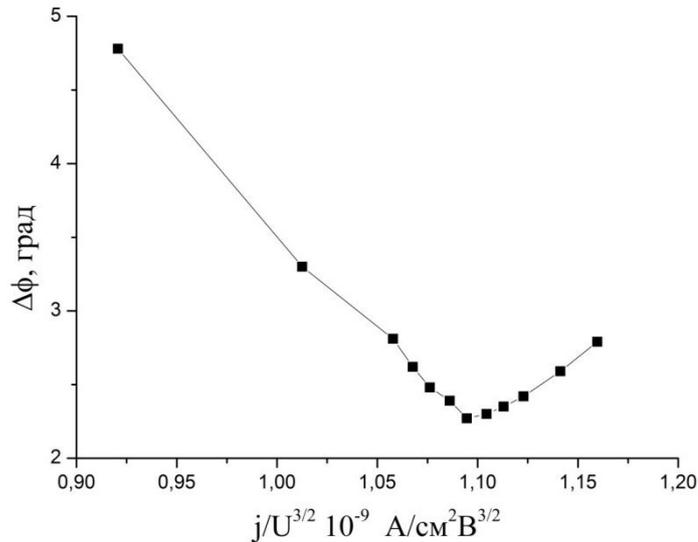


Рисунок 5.13 – Зависимость полуугла расходимости от приведенного первеанса расчета рисунка 5.12

Из приведенных графиков видно, что в целевой ИОС можно иметь полуугол расходимости на уровне 2 – 2.5 %. Проведенные расчеты позволяют выявить необходимые для конструирования ИОС параметрические зависимости.

На рисунке 5.14 приведена конфигурация ионного пучка при ширине щели 2.5 мм, расстоянии между ЭЭ и УЭ – 1.7 мм, толщина ЭЭ – 1 мм, толщина УЭ – 1 мм, толщина ЗЭ – 0.5 мм; расстояние между ЗЭ и УЭ – 1.5 мм. Потенциалы: ЭЭ – 4500 В, УЭ – -500 В, ЗЭ – 0 В. На рисунке 5.15 приведена зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса при данных геометрических параметрах.

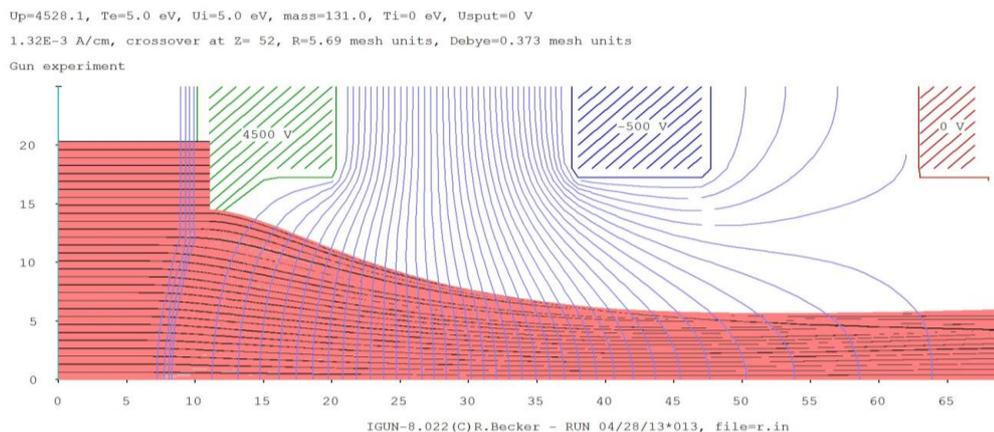


Рисунок 5.14 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 2.5 мм, расстоянии между ЭЭ и УЭ – 1,7 мм

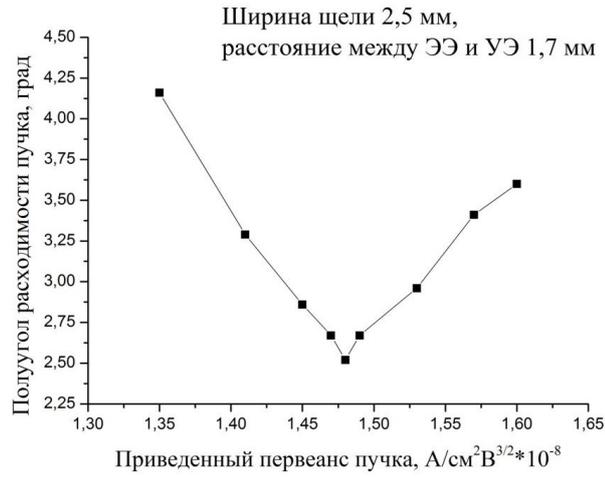


Рисунок 5.15 – Зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка рисунка 5.14

На рисунке 5.16 приведена зависимость плотности ионного тока от ширины щели h при межэлектродном расстоянии 1.7 мм, 2 мм и 3.3 мм.

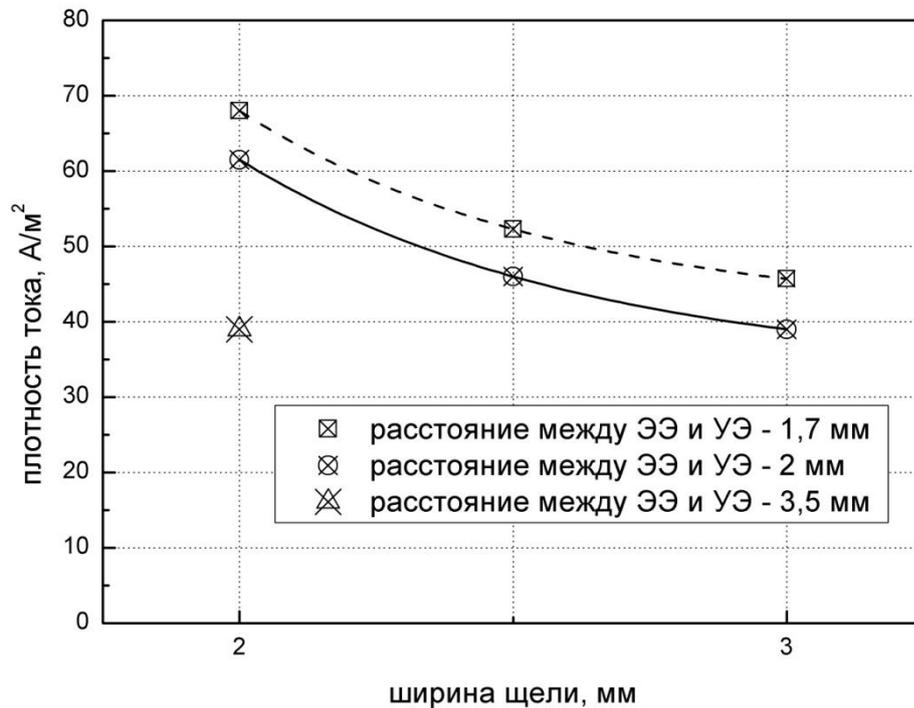


Рисунок 5.16 – Зависимость плотности ионного тока от ширины щели при межэлектродном расстоянии 1.7 мм, 2 мм и 3.5 мм

Указанные межэлектродные расстояния соответствуют напряженности электрического поля в зазоре 3 кВ/мм; 2.5 кВ/мм; и 1.42 кВ/мм. С увеличением межэлектродного зазора плотность ионного тока снижается, а запас по пробойной прочности вакуумного промежутка

увеличивается. Для металлических электродов (молибден или титан-ниобиевый сплав) величина 3 кВ/мм при зазоре 1.7 мм приемлема [136]. Для графитовых электродов эту величину необходимо подтвердить экспериментально. С увеличением ширины щели h плотность ионного тока, соответствующая минимальной расходимости пучка, снижается.

Полный ионный ток пучка при заданном диаметре ГРК ВЧИИП зависит от геометрической прозрачности ЭЭ: $\sigma_F = \frac{h}{\Delta}$, где Δ – ширина полок (перемычек между щелевыми отверстиями).

Варианты чертежей ЭЭ приведены на рисунках 5.17 – 5.19 (вид со стороны ГРК).

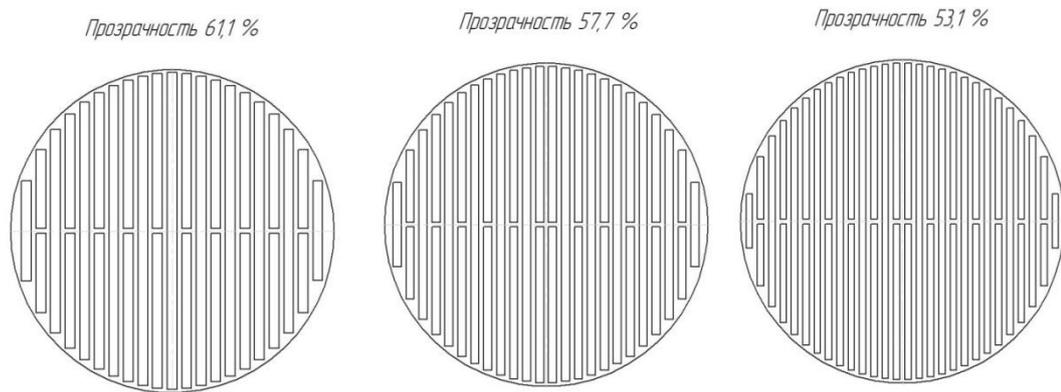


Рисунок 5.17 – Вариант ЭЭ с шириной полки 1.5 мм и шириной щели 3 мм; 2.5 мм и 2 мм (слева направо)

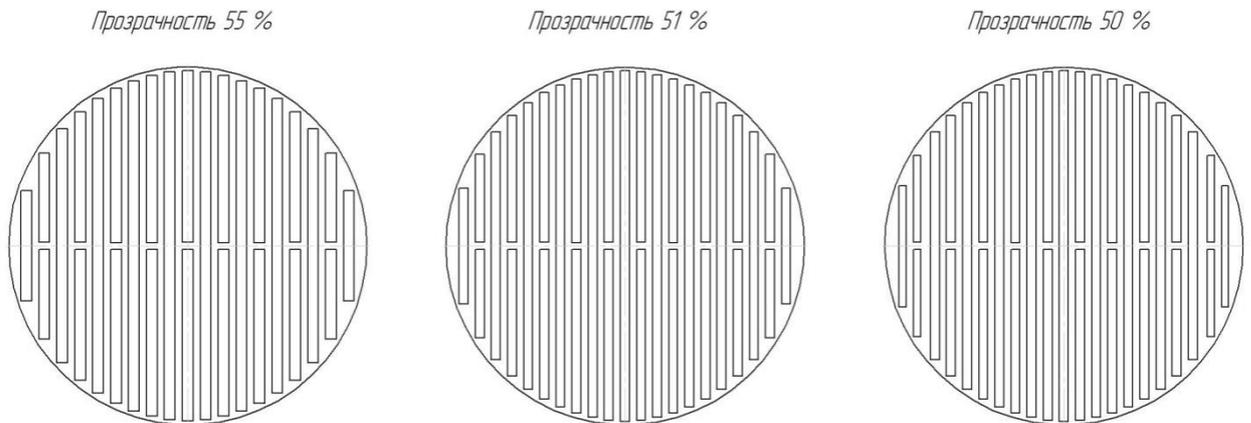


Рисунок 5.18 – Вариант ЭЭ с шириной полки 2 мм и шириной щели 3 мм; 2.5 мм и 2 мм (слева направо)

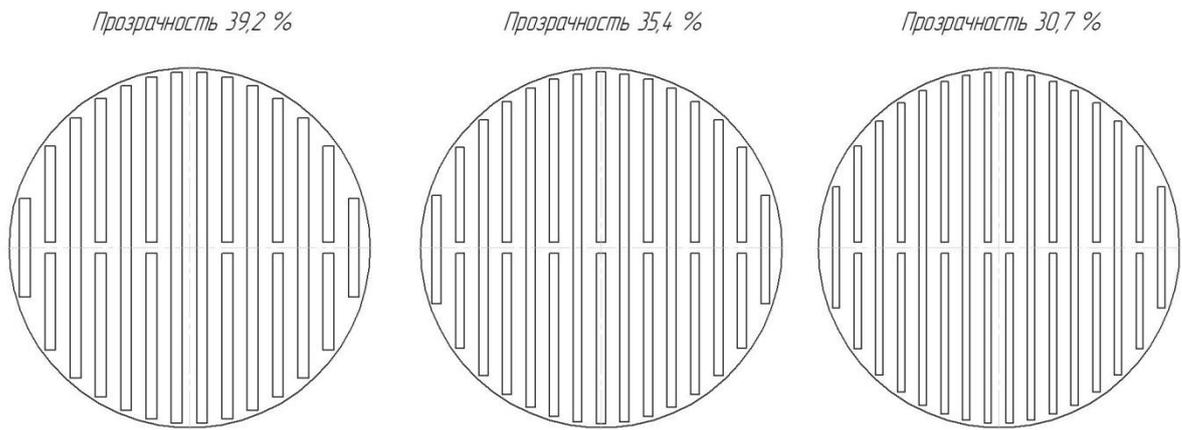


Рисунок 5.19 – Вариант ЭЭ с шириной полки 4 мм и шириной щели 2 мм; 2.5 мм и 3 мм (слева направо)

По предварительной оценке технологическим пределом является изготовление ЭЭ с шириной полки 1.5 мм. Зависимость геометрической прозрачности ЭЭ от ширины щели при этом приведена на рисунке 5.20.

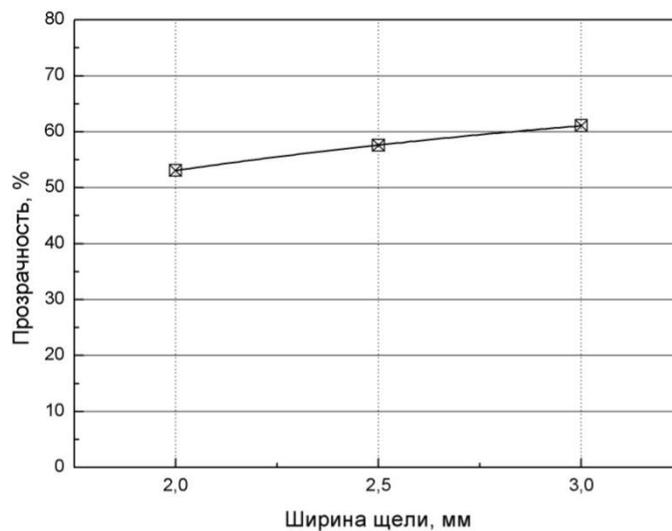


Рисунок 5.20 – Зависимость геометрической прозрачности от ширины щели при ширине полки 1.5 мм

При определении диаметра ЭЭ ВЧИИП необходимо руководствоваться величиной средней по поверхности ЭЭ приведенной плотности ионного тока $\bar{j} = \sigma_F j_i$. Зависимость этого параметра от h и Δ приведена на рисунке 5.21.

Рассматривалась возможность упрощения технологических сложностей изготовления ЭЭ с сечением отверстия сложной формы «квазипирсовской геометрии», как это изображено на рисунках 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, путем использования более простой формы в виде фаски.

Результаты расчета конфигурации пучка для этого варианта ЭЭ при ширине щели 2,5 мм, расстоянии между ЭЭ и УЭ – 1,7 мм толщине ЭЭ – 1 мм, толщине УЭ – 1 мм, толщине ЗЭ – 0.5 мм; расстоянии между ЗЭ и УЭ – 1.5 мм, потенциале ЭЭ – 4500 В, УЭ – -500 В приведены на рисунке 5.22, а зависимость полуугла расходимости от приведенного первеанса – на рисунке 5.23.

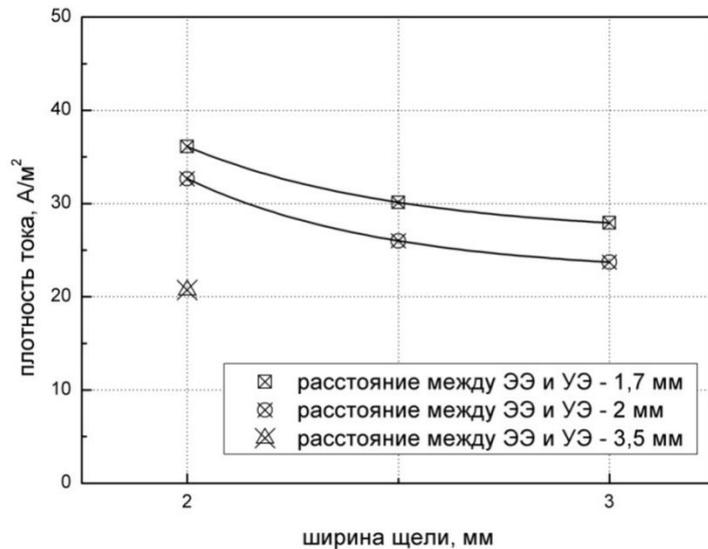


Рисунок 5.21 – Зависимость плотности ионного тока от ширины щели при межэлектродном расстоянии 1.7 мм, 2 мм и 3.5 мм

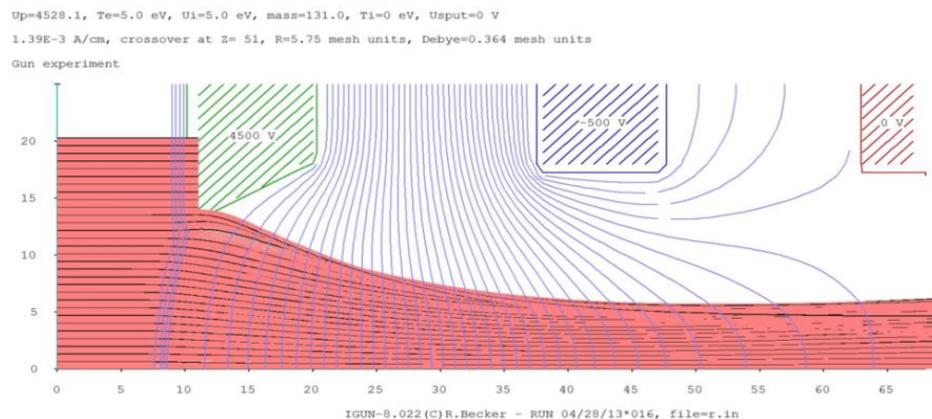


Рисунок 5.22 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 2.5 мм, расстоянии между ЭЭ и УЭ – 1.7 мм, форма щели – «фаска»

Из сравнения рисунка 5.23 с рисунками 5.4, 5.7, 5.9, 5.11 видно, что рассмотренное упрощение формы ЭЭ приводит к увеличению полуугла расходимости пучка примерно на 0.7° .

Для предварительного анализа на основании полученных расчетных результатов принимаем конструкцию ЭЭ в соответствии с рисунком 5.17, где ширина щели 2,5 мм, а полка

1,5 мм. Форма же электрода, с точки зрения технологических возможностей, подобная тем, что представлены выше, на данный момент была неосуществима. Поэтому был предложен компромиссный вариант (см. рисунок 5.24).

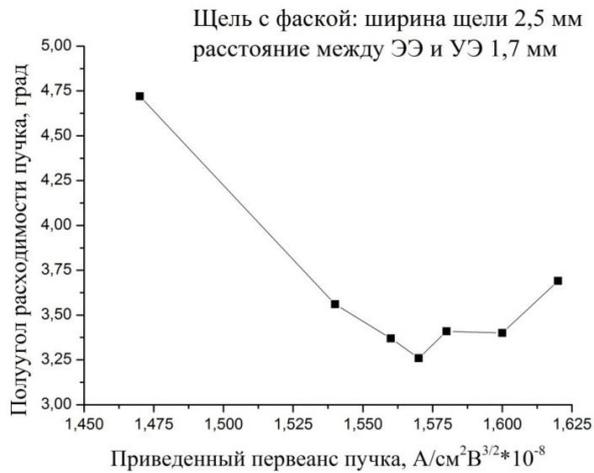


Рисунок 5.23 – Зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка рисунка 5.22

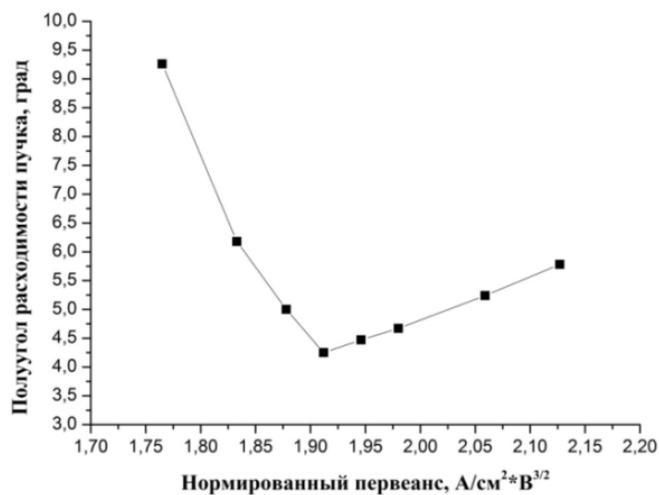
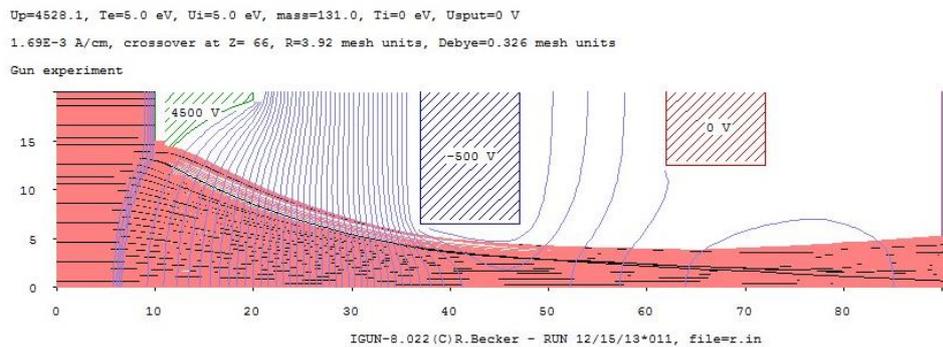


Рисунок 5.24 – Конфигурация ионного пучка при ширине щели 2.5 мм, расстоянии между ЭЭ и УЭ – 1.7 мм, форма щели – «фреза», а также зависимость полуугла расходимости пучка от приведенного первеанса пучка

5.1.4 Создание электродов для ВЧИИП-10Ф

В качестве материала для изготовления электродов ИОС был выбран углерод из-за того, что коэффициенты термического расширения и ионного распыления у этого материала минимальны. Расстояние между электродами было выбрано наименьшим. ЭЭ нагревается больше всего от плазмы, поэтому коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) материала, из которого он изготовлен, важен. В качестве материала ускоряющего электрода используется углерод, коэффициент распыления которого в диапазоне энергии ионов 200 – 400 эВ примерно в три раза ниже, чем у титана и более чем в 6 раз ниже, чем у молибдена (рисунки 5.25, 5.26 и 5.27 из работы [137]).

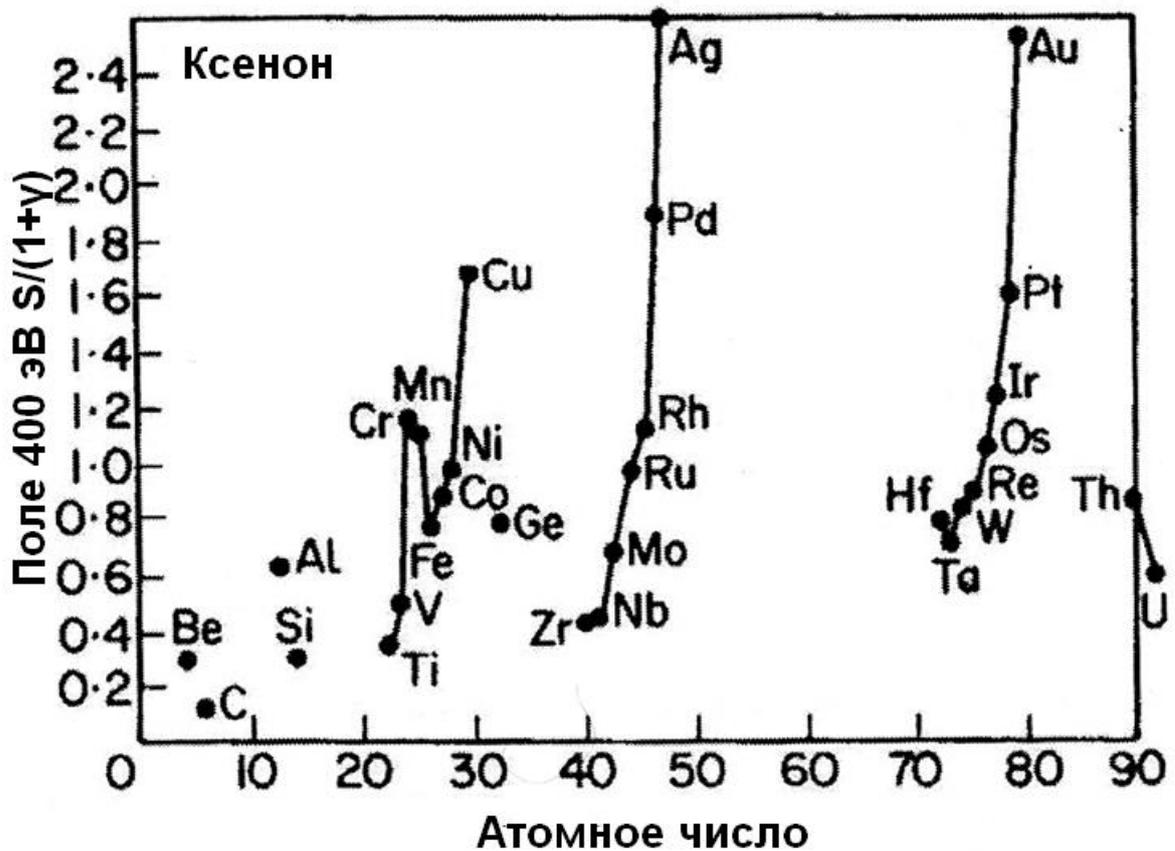


Рисунок 5.25 – Зависимость коэффициента распыления ионами ксенона с энергией 400 эВ в зависимости от атомной массы материала

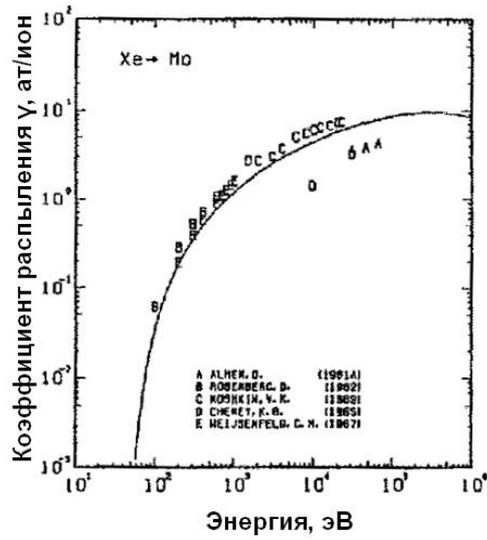


Рисунок 5.26 – Коэффициент распыления молибдена ионами ксенона

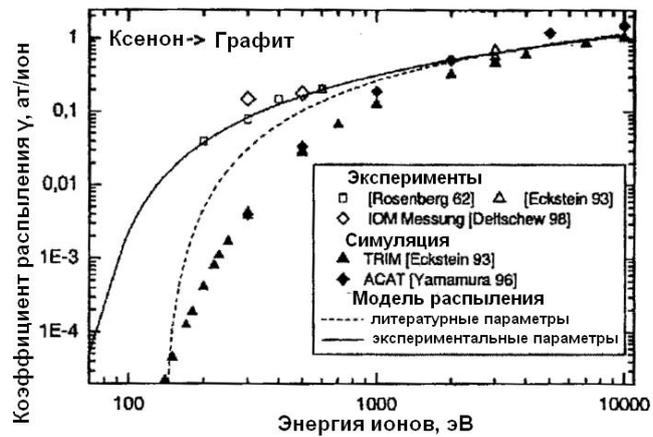


Рисунок 5.27 – Коэффициент распыления углерода ионами ксенона

Согласно выбранным схемам по рисункам 5.17 и 5.24 были реализованы электроды из углерода (см. рисунки 5.28 и 5.29).

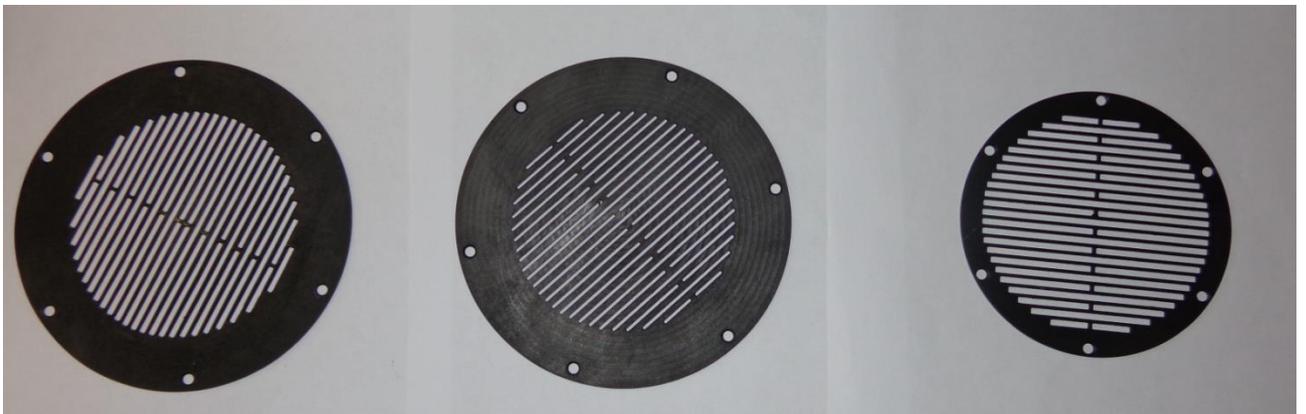


Рисунок 5.28 – Три электрода ИОС ВЧИИП-10Ф – ЭЭ, УЭ и ЗЭ, выполненные из графита



Рисунок 5.29 – ЭЭ ИОС

В качестве материала для электродов были выбраны ковар и углерод марки МПГ-7 (как сплав обладающий наименьшим КЛТР). Был проведен расчет скорости распыления ионами материала УЭ. При токе пучка $I_i = 250$ мА, диаметре ИОС $d = 100$ мм, прозрачности УЭ $\sigma = 0,27$, учитывая, что на распыление уходит лишь 1 % от тока ионов, оцениваем ток ионов на распыление формулой:

$$j_i = \frac{4I_i}{\pi d^2 \sigma} \cdot 10^{-2} \quad (5.9)$$

Далее находим скорость распыления электрода из углерода (коэффициент распыления $\gamma = 0,15$ Атом/ион для ксенона с энергией 400 эВ) и ковара (коэффициент распыления $\gamma = 0,9$ Атом/ион для ксенона с энергией 400 эВ) по формуле:

$$V_p = \frac{j_i \gamma M_i}{e N_A \rho}, \quad (5.10)$$

где M_i – молярная масса, N_A – число Авогадро, ρ – плотность. Величины скорости распыления составили $2,722 \cdot 10^{-4}$ мм/час для ковара и $4,568 \cdot 10^{-5}$ мм/час для углерода, соответственно. Таким образом, предельный ресурс УЭ толщиной 1 мм составит 3673 часа при исполнении из ковара и 21891 час при углеродном исполнении. После определения ресурса было оценено расчетное количество ОКМ, которые сможет увести СКА за свой ресурс (см. рисунок 5.31). Однозначное преимущество по ресурсу остается за углеродом, который и был выбран для исполнения электродов.

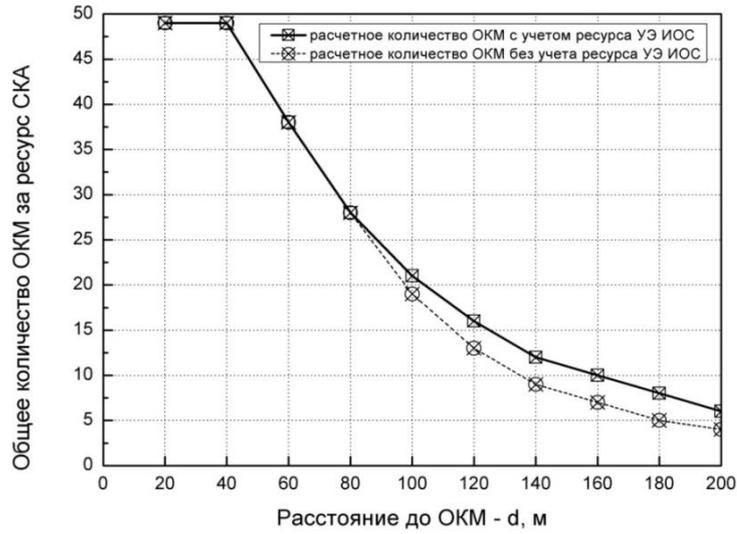


Рисунок 5.32 – Зависимость общего количества ОКМ за ресурс СКА от расстояния до ОКМ

5.2 Результаты экспериментов с ионным пучком

5.2.1 Испытания ВЧИИП-10Ф в составе «большой установки»

На рисунках 5.32 – 5.34 представлена ИОС в собранном виде, которая устанавливалась на ВЧИИП-10Ф. ВЧИИП в составе «большой установки» изображен на рисунках 5.35 – 5.34.

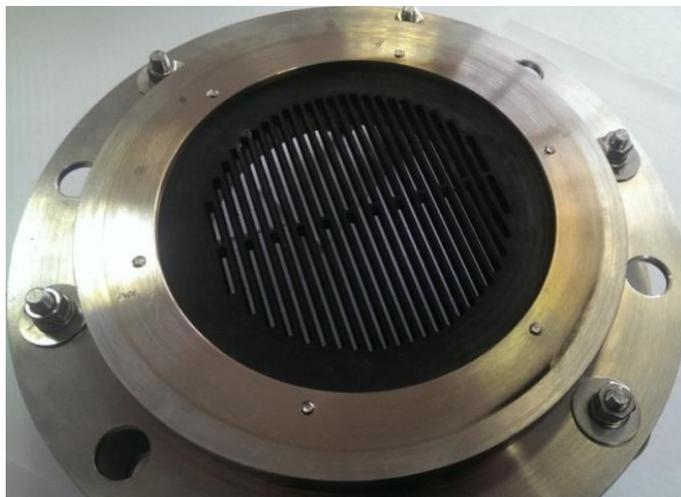


Рисунок 5.30 – Трехэлектродная ИОС ВЧИИП-10Ф



Рисунок 5.31 – ИОС, установленная на ВЧИИП-10Ф

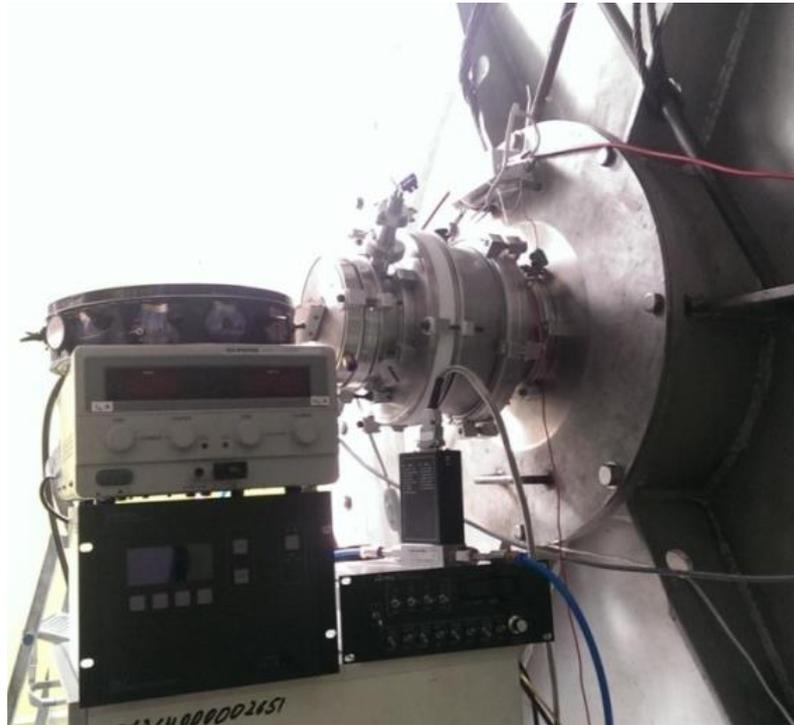


Рисунок 5.32 – ВЧИИП-10Ф в составе «большой установки» на стенде У2В-2

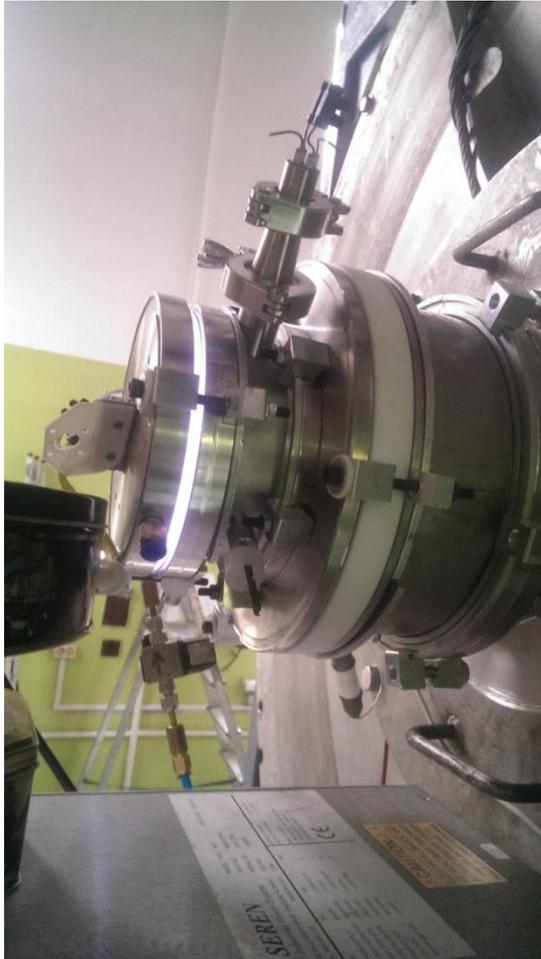


Рисунок 5.33 – Работающая ВЧИИП-10Ф, вид снаружи вакуумной камеры стенда У2В-2

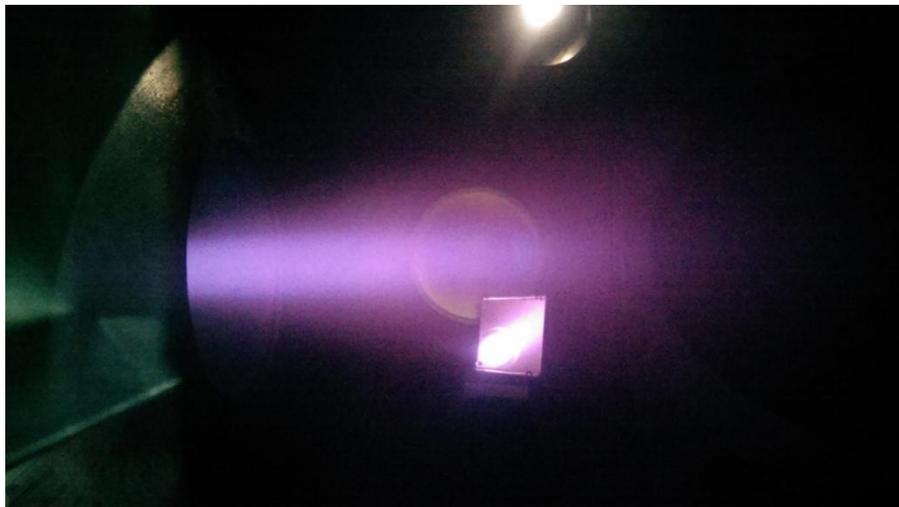


Рисунок 5.34 – Вид пучка ВЧИИП-1Ф из смотрового окна

В ходе работ было принято решение увеличить зазор между ЭЭ и УЭ из-за плохого качества материала электродов, их расслоения при нагреве и электрических пробоях. Было произведен расчет в программе IGUN для случая, когда на ЭЭ подано напряжение +2000 В. Расстояние между ЭЭ и УЭ составляло 2,2 мм, а между УЭ и ЗЭ – 3 мм. В этом случае были

получены значения полуугла расходимости ионного пучка при различных вариантах потенциала УЭ (см. таблицу 3). Расчеты представлены на рисунках 5.35 – 5.39.

Таблица 3. – Вариации полуугла расходимости ионного пучка в зависимости от потенциала УЭ

| Потенциал УЭ, В | Полуугол расходимости |
|-----------------|-----------------------|
| -500 | 3,34 ⁰ |
| -400 | 3,85 ⁰ |
| -300 | 3,5 ⁰ |
| -200 | 3,07 ⁰ |
| -20 | 3,27 ⁰ |

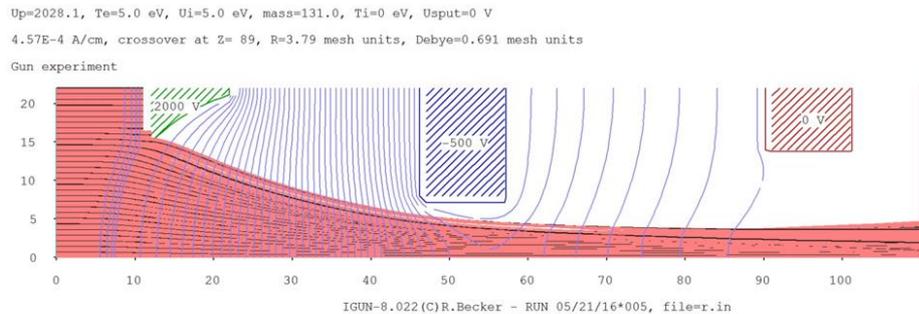


Рисунок 5.35 – Расчет в IGUN при потенциале УЭ -500В

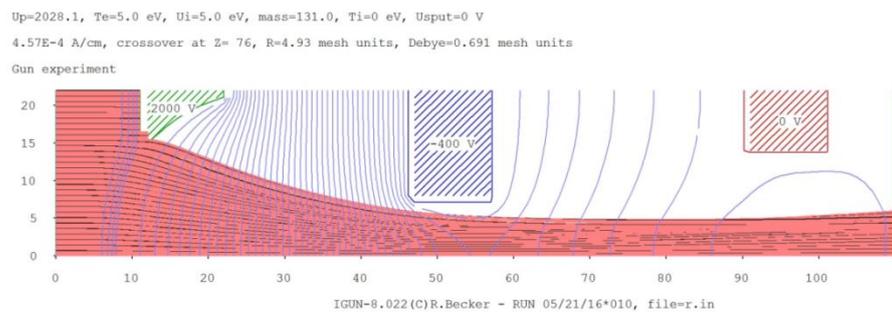


Рисунок 5.36 – Расчет в IGUN при потенциале УЭ -400В

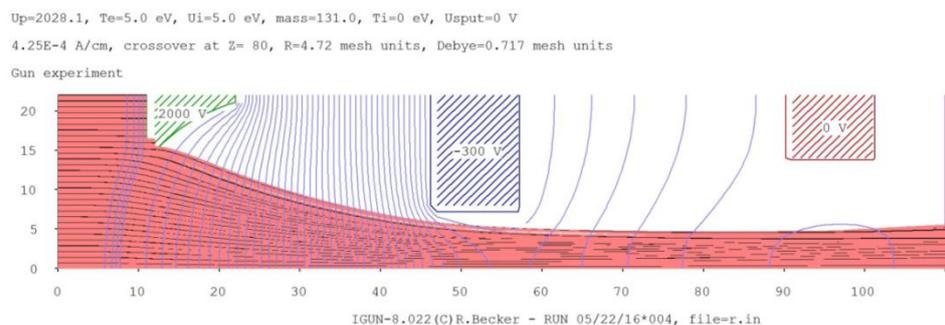


Рисунок 5.37 – Расчет в IGUN при потенциале УЭ -300В

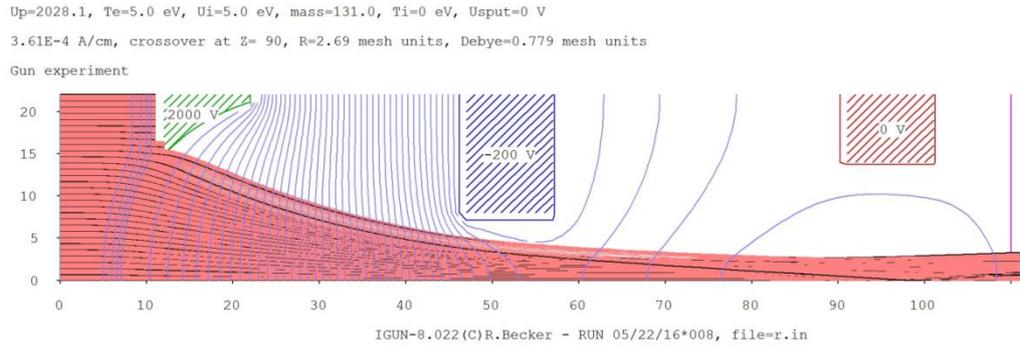


Рисунок 5.38 – Расчет в IGUN при потенциале УЭ -200В

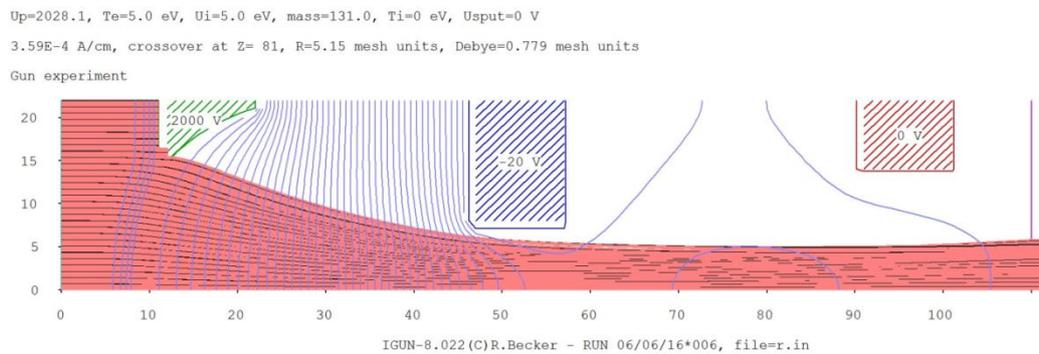


Рисунок 5.39 – Расчет в IGUN при потенциале УЭ -20В

После приработки электродов ИОС возникла возможность сокращения межэлектродного зазора между ЭЭ и УЭ, однако расчет на рисунке 5.40 показал нецелесообразность данной операции. Расчет был произведен для расстояния между ЭЭ и УЭ 1,5 мм, угол составил 6° . При сокращении межэлектродного расстояния до 1 мм было выявлено дальнейшее увеличение расходимости пучка ионов.

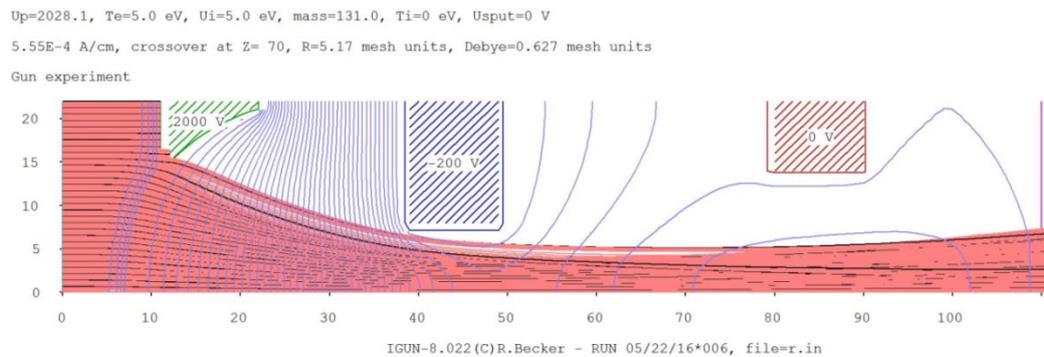


Рисунок 5.40 – Расчёт элементарной ячейки ИОС при расстоянии между ЭЭ и УЭ 1,5 мм

5.2.2 Экспериментальная отработка характеристик лабораторной модели ВЧИИП-10Ф

Был произведён эксперимент, определивший точность оценки ионного тока на ЭЭ при помощи имитатора плоского пристеночного зонда. В результате эксперимента, изложенного в подразделе 4.2.4, был получен график 4.36, интегрирование зависимостей которого линейно дало среднее значение $8,8 \text{ мА/см}^2$ при давлении в ГРК 2 мТорр $P = 200 \text{ Вт}$ и поглощённой плазмой ВЧ-мощности $P_p = 175 \text{ Вт}$. При создании в ГРК схожего давления и при мощности ВЧГ 200 Вт ток на ЭЭ составил 281 мА, что соответствует плотности ионного тока $6,43 \text{ мА/см}^2$. Таким образом, расхождение с оценкой имитатора составило около 30 %. Следует также упомянуть, что соотношение площадей собирающей поверхности плоского зонда имитатора и окружающей его керамической поверхности составило немногим более порядка величины, а для более точного моделирования эффекта стенки была необходима разница до двух порядков величины. Стоит также отметить необходимость создания зонда с более равномерным окружением слоя диэлектрика, что в данной работе не было достигнуто (см. рисунок 3.15). Поэтому оценка имитатором плотности ионного тока вполне могла быть заметным образом завышена. С другой стороны, результат полученной плотности ионного тока при мощности генератора $P = 200 \text{ Вт}$ был несколько занижен. Такое понижение было обусловлено снижением поглощенной плазмой мощности из-за возникновения проводящего слоя на диэлектрическом кварцевом окне со стороны ГРК (см. рисунок 2.4) после нескольких месяцев работы ВЧИИП-10Ф. Возникновение такого проводящего слоя со стороны ГРК вызвало снижение КПД передачи мощности в разряд, как показали измерения, на величину порядка 10 %.

При данном исполнении электродов из графита МПГ-7 ток перехвата на УЭ не удалось снизить до нуля и он составлял значение от 1 до 5 % тока ЭЭ при выставленном зазоре (см. рисунок 5.41). Применение такого пиролитического углерода в качестве материала электродов должно было бы улучшить достигнутые результаты.

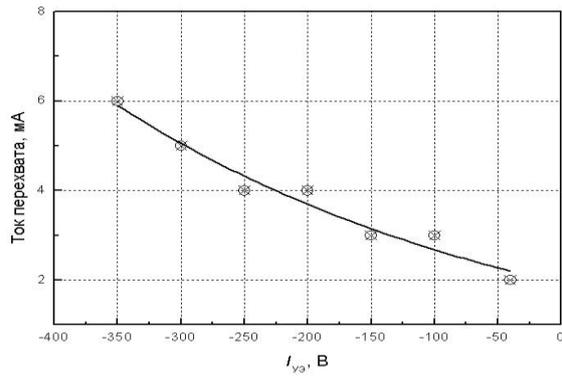


Рисунок 5.41 – Зависимость тока перехвата на УЭ от напряжения на УЭ

Двигательные характеристики источника изображены на рисунке 5.42. Массовый КПД достигает 95 % при токе пучка 250 мА, а цена ионов лежит в диапазоне 775 – 1000 Вт/А.

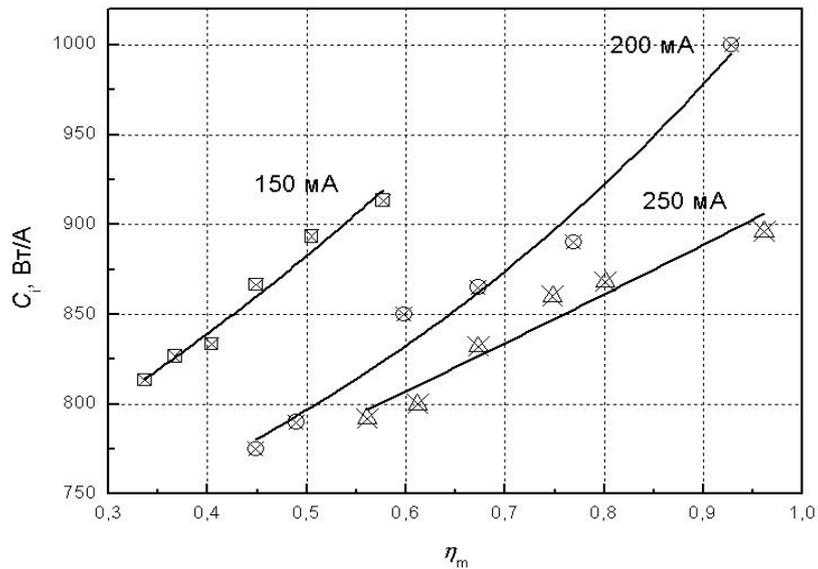


Рисунок 5.42 – Зависимость цены ионов от массового КПД при токах пучка 150 мА, 200 мА и 250 мА

5.2.3 Измерение полуугла расходимости пучка ионов

Первым этапом эксперимента по измерению расходимости пучка было измерение полуугла расходимости ионов на основании ионного распыления титанового экрана, установленного перпендикулярно пучку на расстоянии 68 см. Взаимодействие ионного пучка с экраном иллюстрирует рисунок 5.43. Результат ионного распыления титанового листа

представлен на фото рисунков 5.44 и 5.45. Данный эксперимент соответствовал следующим параметрам системы: расход ксенона – 2 смл/мин, мощность ВЧГ – 100 Вт, напряжение на ЭЭ составляет +2000В, а на УЭ – -200В. В результате этого эксперимента угол раскрытия ионного пучка поперёк щелей составил около $2,5^{\circ}$, а вдоль щелей данный угол оказался практически нулевым. Отличие проведённого эксперимента от расчётных данных составило менее 23 %. След от пучка имел овальную форму (см. рисунок 5.45), что подтвердило описанную выше теорию.

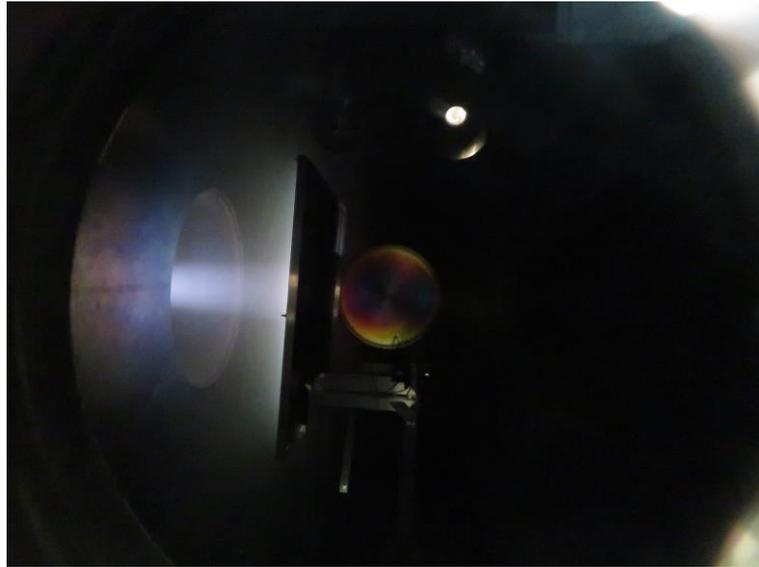


Рисунок 5.43 – ВЧИИП-10Ф работающий на титановую мишень, вид из смотрового окна



Рисунок 5.44 – Внешний вид титановой мишени после нескольких часов воздействия на неё ионным пучком ВЧИИП-10Ф



Рисунок 5.45 – Укрупнённое изображение следа ионного распыления на титановой мишени системой ВЧИИП-10Ф со щелевыми электродами

После проведенного эксперимента с титановой мишенью был проведен второй, уточняющий эксперимент при помощи контактного профилометра KLA D-600 методом ступеньки с точностью 5 нм. На стекло, армированное с обратной стороны защитной пленкой, были установлены стальные лезвия с заостренными краями. Рисунок 5.46 показывает расположение лезвий на поверхности стекла.

После обработки ионным пучком (см. рисунок 5.47) возник перепад высот между обработанным и необработанным участком поверхности, закрытым металлической маской. По разнице высот были определены размеры и относительная величина ионного воздействия на мишень. Длина трека составила 4 мм, нагрузка на стилус – 2 мг. Номера масок показаны на рисунке 5.47.

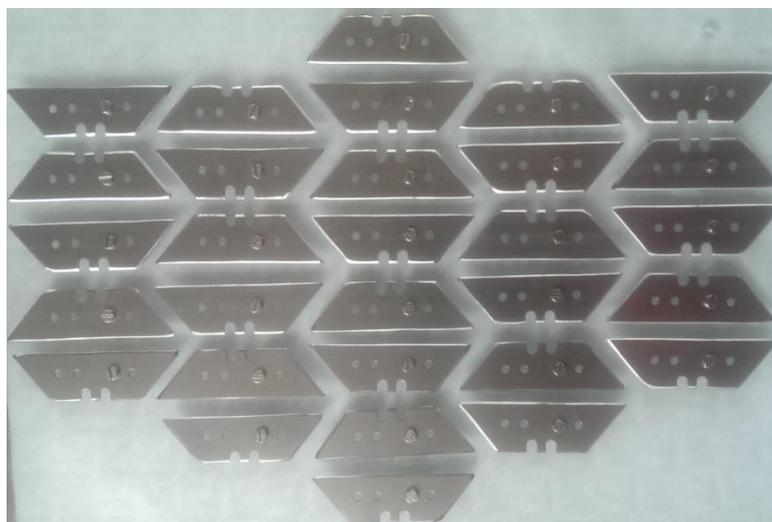


Рисунок 5.46 – Стекло с набором лезвий для эксперимента с профилометром

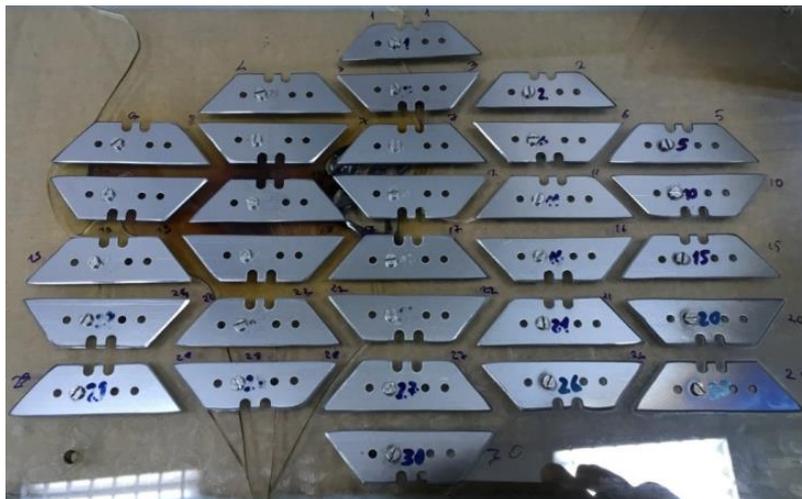


Рисунок 5.47 – Результат воздействия ионного пучка на набор масок

Для каждой маски измерения производились в точках, показанных на рисунке 5.48. Ориентация соответствует ориентации маски на стеклянном листе. В каждой точке производилось по три – четыре измерения высоты ступеньки, для которых вычислялось среднее значение. В некоторых точках качество ступеньки не позволяло произвести измерения с достаточной точностью. Плохое качество ступеньки, в некоторых случаях связано со сдвигом маски в процессе ионной обработки, или недостаточным прилеганием к поверхности, в других случаях, возможно, – с проплавлением стекла вблизи маски.

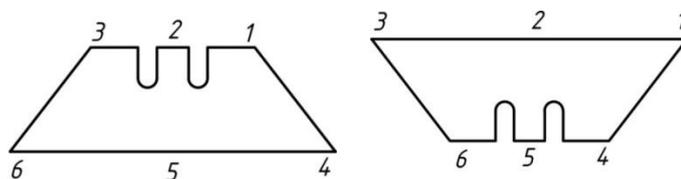


Рисунок 5.48 – Точки измерений профилометром на масках

В результате измерений была получена двухмерная (см. рисунок 5.49) и трехмерная картина отпечатка ионного пучка (см. рисунок 5.50), на которой отчетливо видна вытянутая форма ионного воздействия, а расходимость 90 % ионного пучка составила $\sim 2,95^\circ$ в поперечном для щелей направлении и около нуля в продольном (для измерения расходимости в продольном направлении необходимы значительные размеры вакуумной камеры и высокая точность юстировки).

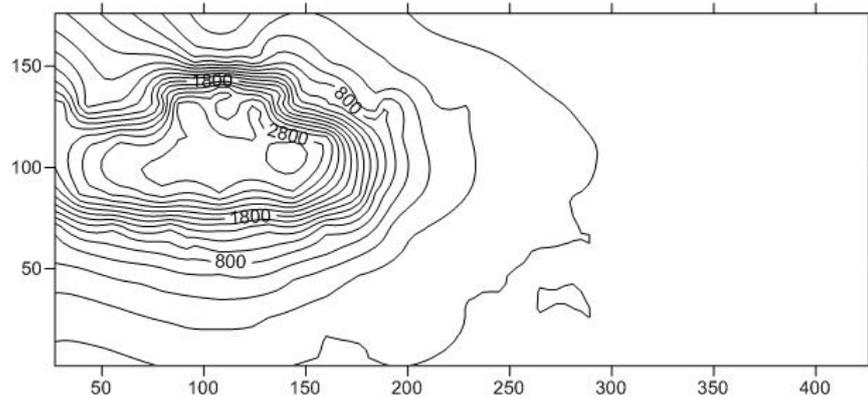


Рисунок 5.49 – Двухмерная картина воздействия ионного пучка, полученная при помощи эрозии стекла, измеренной профилометром KLA D-600

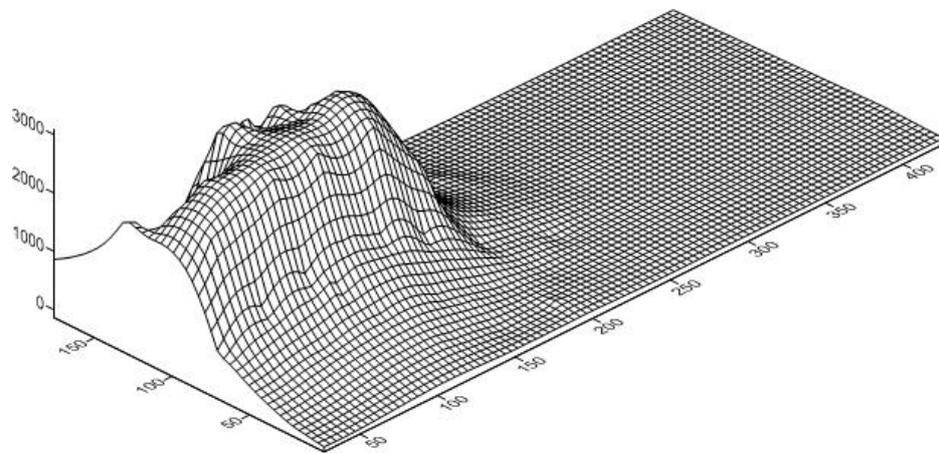


Рисунок 5.50 – Пространственная картина воздействия ионного пучка, полученная при помощи эрозии стекла, измеренной профилометром KLA D-600

Столь малая расходимость пучка при использовании ВЧИИП в качестве ВЧИД позволит повысить эффективность использования двигателя, а также, например, улучшить связь с аппаратом, так как вносимых ионным пучком потерь будет существенно меньше в пространственном отношении.

5.3 Выводы раздела 5

Данный раздел работы посвящен созданию и испытанию ИОС ВЧИИП-10Ф. Итогом работы стало получение полуугла расходимости ионного пучка модели ВЧИИП-

10Ф. Расходимость пучка, полученная в двух разных экспериментах составила подобную величину, порядка 3 градусов поперек щелевой оптики и существенно меньше вдоль. Подобный результат был получен и теоретическим путем на основе расчета в программном комплексе IGUN [138].

Была произведена верификация экспериментальным путем оценки ионного тока, полученной при помощи имитатора плоского пристеночного зонда. Погрешность оценки составила менее 30 %.

Получены двигательные характеристики ВЧИИП-10Ф, намечены пути совершенствования в будущих ВЧИИП и перспективы использования в качестве ВЧИД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были решены основные задачи и пути реализации ВЧ-ионных устройств, которые позволили создать перспективную лабораторную модель ВЧИИП-10Ф для увода ОКМ с ГСО Земли.

Характеристики ВЧИИП перекрыли начальные требования к подобным ионным источникам. В ходе исследования были намечены пути для дальнейшего совершенствования их конструкции и использования новых перспективных материалов. Существо выполненного исследования и разработки новых методов диагностики газоразрядной плазмы будут полезны при создании ВЧИД нового поколения.

Найденные подходы и методы исследования позволили всецело охарактеризовать физико-технический облик ВЧИИП-10Ф, выявить его конструктивные особенности и преимущества по сравнению с существующими образцами ВЧИД.

Применение щелевой графитовой оптики вместе с плоским индуктором и ферритовым сердечником позволило обеспечить повышенную равномерность ВЧИ-разряда в ГРК с металлическими стенками и относительно малую расходимость ионного пучка, что важно для решения орбитальных задач.

Полученные значения полуугла расходимости клиновидного пучка ионов составляют 2,5 – 3 градуса по одной из плоскостей и существенно меньшие величины – по другой, тогда как в лучших образцах ВЧИД эти углы составляют около 13 градусов по обеим плоскостям. Такое различие явилось следствием применения как плоского индуктора с ферритовым сердечником вместо цилиндрического или куполообразного, так и щелевой оптики вместо перфорированной, с круглыми отверстиями. Последнее объясняется тем, что полуугол расходимости ионного пучка в случае щелевой оптики имеет жёсткую связь с нормированным первеансом и, следовательно, с радиальной равномерностью плотности ионного тока к ИОС.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ЭРДУ – электроракетная двигательная установка
КА – космический аппарат
ГСО – геостационарная орбита
РН – ракета-носитель
ЭРД – электроракетный двигатель
ИД – ионный двигатель
СПД – стационарный плазменный двигатель
САС – срок активного существования
СВЧ – сверхвысокочастотный
ИДПТ – ионный двигатель постоянного тока
ВЧИД – высокочастотный ионный двигатель
ГРК – газоразрядная камера
КМ – космический мусор
ОКМ – объект космического мусора
СКА – сервисный космический аппарат
ВЧИ – высокочастотный индукционный
ВЧИИП – высокочастотный источник ионного пучка
ИОС – ионно-оптическая система
ЭЭ – эмиссионный электрод
ФРЭЭ – функция распределения электронов по энергиям
ИИП – источник ионного пучка
КПД – коэффициент полезного действия
ФМВЧИИП – ВЧИИП с ферромагнитным сердечником индуктора
УЭ – ускоряющий электрод
ЗЭ – замедляющий электрод
СУ – согласующее устройство
ВЧГ – высокочастотный генератор
ВРЭЭ – вероятность распределения электронов по энергиям
ВАХ – вольт-амперная характеристика

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Choueiri, E. Y. A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906–1956) / E.Y. Choueiri // *Journal of Propulsion and Power* – 2004. – Vol. 20. – № 2. – P. 193-203.
2. Циолковский, К.Э. Изслѣдование мировыхъ пространствъ реактивными приборами / К.Э. Циолковский// *Научное обозрѣние* – 1903. – №5. – 31 с.
3. Циолковский, К.Э. Изслѣдование мировыхъ пространствъ реактивными приборами (дополненіе къ I и II части труда того-же названія): монографія. – Калуга: Типографія С.А. Семенова, 1914. – 20 с.
4. Циолковский, К.Э. Труды по ракетной технике: монографія / К.Э. Циолковский; под ред. М.К. Тихонравова – М.: Оборонгиз, 1947. – 368 с.
5. Яковлев, А.В. Довыведение космических аппаратов на геостационарную орбиту с помощью электрореактивных двигателей / А.В. Яковлев, А.А. Внуков, Т.Н. Баландина // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2016, № 2. – DOI: [10.18698/2308-6033-2016-2-1466](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-2-1466). URL: <http://engjournal.ru/articles/1466/1466.pdf>.
6. Boeing 702 fleet. URL: <http://www.apcon.aero/news/boeing702.pdf>.
7. Boeing Satellites. URL: <http://www.boeing.com/space/boeing-satellite-family/index.page>.
8. Choueiri, E.Y. Efficient Electric Plasma Engines Are Propelling The Next Generation Of Space Probes To The Outer Solar System / E.Y. Choueiri // *Scientific American* – 2009, February – P. 58–65.
9. Rayman, M.D. Dawn: A Mission in Development for Exploration of Main Belt Asteroids Vesta And Ceres / M.D. Rayman, T.C. Fraschetti, C.A. Raymonda, C.T. Russell // *Acta Astronautica* – 2006. – Vol. 58. – P. 605-616.
10. Rayman, M.D. Mission Design for Deep Space 1: A Low-Thrust Technology Validation Mission / M.D. Rayman, P.A. Chadbourne, J.S. Culwell, S.N. Williams // *Acta Astronautica* – 1999. – Vol. 45. – Issues 4-9. – P. 381-388.
11. Kugelberg, J. Accommodating Electric Propulsion on SMART-1 / J. Kugelberg, P. Bodin, S. Persson, P. Rathsmann // *Acta Astronautica*. – 2004. – Vol. 55. – Issue 2. – P. 121-130.
12. Report Concerning Further Developments Goddard, R.H. URL: <http://siarchives.si.edu/history/exhibits/stories/march-1920-report-concerning-further-developments-space-travel>.
13. Kaufman, H.R. Performance Correlation for Electron-Bombardment Ion Sources. National Aeronautics and Space Administration Technical Note – 1965. – D-3041. – P. 1-32.

14. Kerslake, W.R. SERT II: Mission, Thruster Performance, and In-Flight Thrust Measurements / W.R. Kerslake, R.G. Goldman, W.C. Nieberdin // *J. Spacecraft* – 1971. – Vol. 8. – № 3. – P. 213-224.
15. Rayman, M.D. Results From The Deep Space 1 Technology Validation Mission / M.D. Rayman, P. Varghese, D.H. Lehman, L.L. Livesay // *Acta Astronautica* – 2000. – Vol. 47. – № 2-9. – P. 475-487.
16. Kuninaka, H. Powered Flight of Electron Cyclotron Resonance Ion Engines on Hayabusa Explorer / H. Kuninaka, K. Nishiyama, I. Funaki, T. Yamada, Y. Shimizu, J. Kawaguchi // *Journal of Propulsion and Power* – 2007. – Vol. 23. – № 3. – P. 544-551.
17. Polk, J.E. Validation of the NSTAR Ion Propulsion System on the Deep Space One Mission: Overview and Initial Results / J.E. Polk, R.Y. Kakuda, J.R. Anderson, J.R. Brophy, V.K. Rawlin, M.J. Patterson, J. Sovey, J. Hamley // AIAA-99-2274, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. – 20-24 June, 1999. – Los Angeles, CA, USA. URL: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1999-2274>.
18. Drinkwater, M.R. The GOCE Gravity Mission: ESA's First Core Earth Explorer / M.R. Drinkwater, R. Haagmans, D. Muzi, A. Popescu, R. Floberghagen, M. Kern, M. Fehringer // *Proceedings of the 3rd International GOCE User Workshop, 6-8 November 2006, ESA Special Publication, SP-627.* – 2007. – P. 1-8. URL: https://www.researchgate.net/profile/Rune_Floberghagen/publication/237628788_THE_GOCE_GRAVITY_MISSION_ESA'S_FIRST_CORE_EARTH_EXPLORER/links/00b7d5275473595230000000.pdf.
19. Kuninaka, H. Development and Demonstration of a Cathodeless Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster / H. Kuninaka, S. Satori // *Journal of Propulsion and Power* – 1998. – Vol. 14. – № 6. – P. 1022–1026.
20. Kuninaka, H. Life Test of Microwave Discharge, Ion Thrusters for MUSES-C in Engineering Model Phase / H. Kuninaka, I. Funaki, K. Toki // AIAA-99-2439, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit – 20-24 June, 1999. – Los Angeles, CA, USA. – 5 p.
21. Kuninaka, H. Results of 18000 Hours Endurance Test of Microwave Discharge Ion Thruster Engineering Model / H. Kuninaka, I. Funaki, K. Nishiyama, Y. Shimizu, K. Toki // AIAA-00-3276, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit – 24-28 July, 2000. – Las Vegas, NV, USA.
22. Козубский, К.Н. История космических стационарных плазменных двигателей и их применение в России, США и Европе. Новые вызовы для стационарных плазменных двигателей. К 40-летию первых космических испытаний стационарных плазменных двигателей / К.Н. Козубский, А.И. Корякин, В.М. Мурашко // *Электронный журнал «Труды МАИ»* – 2012. – № 60. – 12 с. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/0e7/istoriya-kosmicheskikh-statsionarnykh->

[plazmennykh-dvigatelye-i-ikh-primeneniye-v-rossii -ssha-i-evrope.-novye-vyzovy-dlya-statsionarnykh-plazmennykh-dvigatelye..pdf.](#)

23. Loeb, H.W. Recent Tests of the RIT 10-Engine at Giessen University / H.W. Loeb, H-G. Bischoff, J. Freisinger, K. Groh, W. Pinks, P. Schafer, R. Schmiele // 76-1037, 12th International Electric Propulsion Conference. – 14-17 November, 1976. – Key Biscayne, FL, USA.

24. Кожевников, В.В. Автоматизированная система диагностики параметров выходного пучка радиочастотного ионного двигателя / В.В. Кожевников, А.А. Смирнов, П.Е. Смирнов, И.А. Черный // Электронный журнал «Труды МАИ» – 2014. – № 75. – 24 с. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/d7d/d7dbc5d61a0fddf658ad62d88b5d513a.pdf>.

25. Организация объединенных наций. Доклад Комитета по использованию космического пространства в мирных целях, Генеральная Ассамблея. Официальные отчеты. 62 сессия. Дополнение № 20 (A/62/20).

26. ГОСТ Р 52925—2008. Изделия космической техники. Общие требования по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 5 с.

27. Разработка возможных сценариев увода объектов космического мусора из области ГСО на орбиту захоронения с использованием сервисного КА, в т.ч. с ЭРДУ. Предварительный проектно–баллистический анализ и предложения по уводу крупногабаритных фрагментов космического мусора из окрестности ГСО с использованием сервисного КА с ЭРДУ. Анализ способов стыковки этого КА с фрагментами мусора. Этап 1. Разработка возможных сценариев увода объектов космического мусора из области ГСО на орбиту захоронения с использованием сервисного КА, в т.ч. с ЭРДУ: научно–технический отчет по НИР «Дебри–ПМЭ» (промежуточ.) / Науч.–исслед. ин–т прикладной механики и электродинамики; рук. Попов Г.А. – М., 2011. – 94 с. – Исполн.: Г.А. Попов, В.Г. Петухов, В.М. Кульков, Е.М. Петров, А.А. Белик, М.С. Константинов, Г.Г. Федотов, В.В. Свотина, Ю.Г. Егоров – Библиогр. с. 91 – 94.

28. Разработка проектно–технического облика сервисного КА в части бортовой маршевой компенсирующей ЭРДУ и средств бесконтактного воздействия на фрагменты космического мусора: научно–технический отчет по НИР «Программа–ПМЭ» / Науч.–исслед. ин–т прикладной механики и электродинамики; рук. Попов Г.А. – М., 2013. – 57 с. – Исполн.: Попов Г.А., Обухов В.А., Кульков В.М., Петухов В.Г., Белик А.А., Константинов М.С., Свотина В.В., Ельников Р.В., Егоров Ю.Г. – Библиогр. с. 55 – 57. – Инв. № 8–32/13–1.

29. System For Adjusting The Position And Attitude Of Orbiting Bodies Using Guide Satellites: WO 2011110701 A1 / C. Bombardelli, Alcerez Jesus Pelaez; Заяв. 11.03.2010; Опубл. 15.09.2011.

30. Löb, H.W. Ein elektrostatisches Raketentriebwerk mit Hochfrequenzionenquelle / H.W. Löb // Astronautica Acta – 1962. – Vol. VIII. – Fasc 1. – P. 49.

31. Groh, K.H., Loebt H.W. State-Of-The-Art of Radio-Frequency Ion Thrusters / K.H. Groh, H.W. Loebt // Journal of Propulsion and Power. – 1991. – Vol. 7. – №. 4. – P. 573-579.
32. Killinger, R. ARTEMIS Orbit Raising In-flight Experience With Ion Propulsion / R. Killinger, R. Kukies, M. Surauer, A. Tomasetto, L. van Holtz // Acta Astronautica – 2003. – Vol. 53. – Issues 4-10. – P. 607-621.
33. Groh, H.K. RIT 15: A Medium Thrust-Range Radio Frequency Ion Thruster / H.K. Groh, H. Leiter, W.H. Loeb // SP-398, 2nd European Spacecraft Propulsion Conference. Proceedings. – P. 377-382. - 27-29 May, 1997. – Noordwijk, the Netherlands.
34. Bassner, H. Development steps of the RF-ion thrusters RIT / H. Bassner, R. Killinger, H. Leiter, J. Müller // IEPC-01-105, 27th International Electric Propulsion Conference. Proceedings – Pasadena, CA, USA. – 14-19 October, 2001. – 10 p.
35. AIRBUS Electric Propulsion Thruster Family URL:<http://www.space-propulsion.com/brochures/electric-propulsion/electric-propulsion-thrusters.pdf>
36. Leiter, H.J. The RIT 15 Ion Engines-A Survey of the Present State of Radio Frequency Ion Thruster Technology and its Future Potentiality / H.J. Leiter, H.W. Loeb, K.H. Schartner // Spacecraft Propulsion. – 2000. – Vol. 465. – P. 423.
37. Auweter-Kurtz, M. IAA Commission III SG 2–Nuclear Space Power and Propulsion / M. Auweter-Kurtz, C. Bruno, D. Fearn, H. Kurtz, T.J. Lawrence, R.X. Lenard // International Academy of Astronautics TR. – 2008. URL: <http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/Mars/nuclearpropulsion.pdf>.
38. Bassner, H. The Development of the ESA-XX Ion Thruster / H. Bassner, R. Bond, V. Thompson, K. Groh // IEPC–97–016, 25th International Electric Propulsion Conference. 24-28 August, 1997. – Cleveland, OH, USA. – P. 120-127.
39. Fahrenbach, P. Performance of the Primary RF-Ion Thruster ESA-XX / P. Fahrenbach, K.H. Groh, H.W. Loeb // IEPC-1995-092, 24th International Electric Propulsion Conference. – 19-23 September, 1995. - Moscow, Russia. – P. 608-617.
40. Leiter, H.J. RIT15S and RIT 15 LP - The Development of High Performance Mission Optimized Ion Thrusters / H.J. Leiter, H.W. Loeb, K.H. Schartner // AIAA-99–2444, 35th AIAA/ASME/SAE/ASE Joint Propulsion Conference and Exhibit. – 20-24 June, 1999. – Los Angeles, CA, USA.
41. Patterson, M.J. Performance and Optimization of a "Derated" Ion Thruster for Auxiliary Propulsion / M.J. Patterson, J.E. Foster // AIAA-91–2350, 27th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference – 24-27 June, 1991. - Sacramento, CA, USA.
42. Groh, K.H State of the Art Radiofrequency Ion Sources For Space Propulsion / K.H. Groh, H.W. Loeb // Review of Scientific Instruments – 1994. – № 65. – P. 1741-1744.

43. 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 – 2013. – Vol. 39. – №. 009. – P. 2077-2088.
44. Hittorf, W.H. Über die elektricitatsleitung der gase / W.H. Hittorf // Annalen der Physik – 1884. – Vol. 21 – P. 90.
45. Бабат, Г.И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы / Г.И. Бабат // Вестник электропромышленности. – 1942. – №. 2. – С. 1-12.
46. Дресвин, С.В. Физика и техника низкотемпературной плазмы / С.В. Дресвин, А.В. Донской, В.М. Гольдфарб, В.С. Клубникин.– М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.
47. Котов, Д.А. Процесс плазменного травления при создании структуры МЭМС-переключателя / Д.А. Котов, А.А. Ясюнас / 9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучения с твердым телом» 20-22 сентября 2011 Минск, Беларусь – Секция 1 – С.49-50.
48. Lenz, B. Plasma Diagnostic Contributions to Advanced RIT Engines / B. Lenz, R.J. Walther, H.W. Loeb // AIAA International Electric Propulsion Conference. – 14-17 November, 1976. – Key Biscayne, FL, USA. – С. 1012.
49. Abgaryan, V.K. High-Frequency Ion Sources of Inert and Chemically Active Gases / V.K. Abgaryan, H.W. Loeb, V.A. Obukhov, I.I. Shkarban // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2012. – Vol. 6. – №. 4. – P. 693-698.
50. Ровинский, Р. Е. Определение температуры в стационарном высокочастотном индукционном разряде / Р.Е. Ровинский, В.А. Груздев, А.П. Соболев // Теплофизика высоких температур. – 1967. – Т. 5. – №. 4. – С. 557-561.
51. Родигин, Н.М. Индукционный нагрев стальных изделий токами нормальной частоты/ Н.М. Родигин – М.: Metallurgizdat, 1950. – 248 с.
52. Devoto, R.S. Transport Coefficients of Partially Ionized Krypton and Xenon / R.S. Devoto // AIAA Journal. – 1969. – Vol. 7. – №. 2. – P. 199-204.
53. Godyak, V. Hot Plasma Effects in Gas Discharge Plasma / V. Godyak // Physics of Plasmas – 2005. – Vol. 12. – № 5. – 055501.
54. Устройство для плазмохимической обработки пластин: Авт. Свид. СССР № 762634 кл. Н01L 21/00/ Лебедев Э.А., Фёдоров Н.Н., Косс К.Л., Толстых Б.Л. – 1979.
55. Inductive RF Plasma Reactor with Overhead Coil and Conductive Laminated RF Window Beneath the Overhead Coil: US Pat. No. US6132551 A, Int. Cl. C23C 16/48/ Horioka K., Okano H.; заявл. 20.09.1997; опубл. 17.10.2000.
56. High-Frequency Ion Source: US Pat. No. US6378290 B1, Int. Cl. H05H 1/00/ Killinger R., Mueller H., Bassner H., Kukies R.; заявл. 10.10.2000; опубл. 30.04.2002.

57. Method and Apparatus for Producing Low Pressure Planar Plasma Using a Coil with Its Axis Parallel to the Surface of a Coupling Window: US Pat. No US4948458 A/ Ogle J.S.; заявл. 14.09.1989; опубл. 14.09.1990.
58. Planar Inductors: US Pat. US4494100 A / Stengel R.E., Pompano Beach, Nejdil C.W.; заявл. 12.07.1982; опубл. 15.01.1985.
59. Method for Igniting Low Pressure Inductively Coupled Plasma: US Pat. No. US56339519 A Int. Cl. H05H 1/24/ Patrick R., Schoeborn P., Franklin M., Bose F; заявл. 14.09.1989; опубл. 14.09.1990.
60. Plasma Processing Apparatus: US Pat. No. US5938883 Int. Cl. H05H 1/00/ Ishii N., Hata J., заявл. 04.10.1994; опубл. 25.06.1996.
61. Godyak, V.A. Experimental Setup and Electrical Characteristics of an Inductively Coupled Plasma / V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85. – №. 2. – P. 703-712.
62. Godyak, V.A. Effective Electron Collision Frequency and Electrical Conductivity of Radio Frequency Plasmas / V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85. – P. 3081-3083.
63. Кралькина, Е.А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе / Е.А. Кралькина // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – №. 5. – С. 519-540.
64. Electromagnetic Apparatus: US Pat. No. US2030957 / Claude A., Bethenod J., заявл. 29.12.1933; опубл. 18.02.1936.
65. Meziani, T. Design of a Magnetic-Pole Enhanced Inductively Coupled Plasma Source / T. Meziani, P. Colpo, F. Rossi // Plasma Sources Science and Technology. – 2001. – Vol. 10. – №. 2. – P. 276-283.
66. Colpo, P. Inductively Coupled Plasmas: Optimizing the Inductive-Coupling Efficiency for Large-Area Source Design / P. Colpo, T. Meziani, F. Rossi // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2005. – Vol. 23. – №. 2. – P. 270-277.
67. Godyak, V. A. Inductive Plasma Sources Enhanced With Ferromagnetic Cores / V.A. Godyak // Proc. 15th Int. Conf. on Gas Discharge and their Applications – 2004. – Vol. 2. – P. 621.
68. Piejak, R.B. A Simple Analysis of an Inductive RF Discharge / R.B. Piejak, V.A. Godyak, B.M. Alexandrovich // Plasma Sources Science and Technology. – 1992. – Vol. 1. – P. 179-186.
69. Kralkina, E.A. RF Power Absorption by Plasma of a Low-Pressure Inductive Discharge / E.A. Kralkina, A.A. Rukhadze, V.B. Pavlov, K.V. Vavilin, P.A. Nekliudova, A.K. Petrov, A.F. Alexandrov // Plasma Sources Science and Technology – 2016. – Vol. 25. – 015016.

70. Godyak, V.A. Electrical and Plasma Parameters of ICP with High Coupling Efficiency / V.A. Godyak // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2011. – Vol. 20. – 025004.
71. Godyak, V. Ferromagnetic Enhanced Inductive Plasma Sources/ V. Godyak // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2013. – Vol. 46. – 283001.
72. Lee, K. Characterization of a Side-Type Ferrite Inductively Coupled Plasma Source For Large-Scale Processing / K. Lee, Y. Lee, S. Jo, Ch.-W. Chung, V. Godyak // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2008. – Vol. 17. – 015014.
73. Aanesland, A. PEGASES-Plasma Propulsion with Electronegative Gases / A. Aanesland, G. Leray, P. Chabert // *AIAA–2008–5185, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. – 21-23 July, 2008. - Hartford, CT, USA. – p. 6.
74. Aanesland, A. Electric Propulsion Using Ion-Ion Plasmas / A. Aanesland, A. Meige, P. Chabert // *2nd Int. Workshop on Non-Equilibrium Processes in Plasmas and Environmental Science Journal of Physics: Conference Series 162* – 2009. – 012009. [URL:http://iopscience.iop.org/1742-6596/162/1/012009](http://iopscience.iop.org/1742-6596/162/1/012009).
75. Aanesland, A. Inductively Coupled Electronegative Plasmas Applied to Space Propulsion /A. Aanesland, L. Popelier, P. Chabert // *Proc. of 20th ESCAMPIG*. – 2010. – topic 9. URL: <http://escampig2010.phy.bg.ac.rs/papers/TL8.pdf>.
76. Samukawa, S. Pulse-Time Modulated Plasma Discharge for Highly Selective, Highly Anisotropic and Charge-Free Etching / S. Samukawa, T. Mieno // *Plasma Sources Science and Technology* – 1996. – №5. – P. 132-138.
77. Economou, D.J. Fundamentals and Applications of Ion–Ion Plasmas / D.J. Economou // *Applied Surface Science*. – 2007. – №253. – P. 6672-6680.
78. Walton, S.G. On the Extraction of Positive and Negative Ions from Electron-Beam-Generated Plasmas / S.G. Walton, D. Leonhardt, R.F. Fernsler, R.A. Meger // *Applied Physics Letters* – 2003. – Vol.83. – №4. – P.626-628.
79. Grisham, L.R. Perspective on the Role of Negative Ions and Ion–Ion Plasmas in Heavy Ion Fusion Science, Magnetic Fusion Energy, and Related Fields / L.R. Grisham, J.W. Kwan // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* – 2009. – № 606. – P. 83-88.
80. Aanesland, A. Electron Energy Distribution Function and Plasma Parameters Across Magnetic Filters / A. Aanesland, J. Bredin, P. Chabert, and V. Godyak // *Applied Physics Letters* – 2012. – №100. – 044102.
81. Aanesland, A. Development and Test of the Negative and Positive Ion Thruster PEGASES / A. Aanesland, D. Rafalskyi, T. Lafleur, P. Grondein, P. Chabert // *AIAA–2014–3424, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Propulsion and Energy Forum*. – 28-30 July, 2014. – Cleveland, OH, USA.

82. Aanesland, A. The PEGASES Gridded Ion–Ion Thruster Performance and Predictions / A. Aanesland, D. Rafalskyi, J. Bredin, P. Grondein, N. Oudini, P. Chabert, D. Levko, L. Garrigues, G. Hagelaar // *IEEE Transactions On Plasma Science* – 2015. – Vol. 43. – № 1. – P. 321-326.
83. Bombardelli, C. Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal / C. Bombardelli, J. Peláez // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* – 2011. – Vol. 34. – № 3. – P. 916-920.
84. Chabert, P. *Physics of Radio-Frequency Plasmas* / P. Chabert, N. Braithwaite – Cambridge: University Press. – 2011. – 383 p.
85. Thomson, J.J. The Electrodeless Discharge through Gases// *Phil. Mag.* – 1927. – Vol. 4. – № 25. – P. 1128-1141.
86. Jackson, J.D. *Classical Electrodynamics*/ J.D. Jackson – New York City: John Wiley & Sons, 1962. – 642 p.
87. Проведение теоретических и экспериментальных исследований физико–технических проблем и разработка предложений по созданию бортовых средств бесконтактного воздействия на крупные фрагменты космического мусора для их удаления с рабочих орбит. Этап 1. «Исследование физико-технических проблем и разработка предложений по созданию бортовых средств бесконтактного воздействия на крупные фрагменты космического мусора для их удаления с рабочих орбит»: НТО о СЧ НИР «Магистраль» [Устойчивость–КМ–ПМЭ - Этап №1 календарного плана договора от 19 сентября 2014 года № (149-1006-2014)-1006/187-2014 п.п. 3.3.1 ТЗ]/ Науч.–исслед. ин–т прикладной механики и электродинамики; рук. Попов Г.А. - М., 2011. – 94 с. – Исполн.: Г.А. Попов, В.А. Обухов, В.В. Свотина, Е.М. Петров, А.Б. Надирадзе, И.В. Усовик, В.А. Рябый, В.Г. Петухов, П.Е. Машеров – Библиогр. С. 85 – 88.
88. Исследование характеристик и оптимизация конструкции модели ВЧ ИД мощностью до 2 кВт, оснащённой ионно-оптической системой из углерод-композитных материалов НИР «Двигатель – НИИ ПМЭ МАИ». Государственный контракт от 05.05.2012 № 251-0214/12 п. 2.3.8.1 ТЗ, раздел 8 «Двигатель – ЭРД и РД МТ», этап 8.7/ Науч.–исслед. институт прикладной механики и электродинамики; рук. Попов Г.А. - М., 2013. – 69 с. – Исполн.: В.А. Обухов, В.А. Рябый, В.В. Балашов, В.В. Свотина, П.Е. Машеров – Библиогр. С. 32 – 57.
89. Inductive Plasma Source With High Coupling Efficiency: US 8444870 B2/ V. Godyak; приор. 22.08.2006, заявл. 22.08.2007, опубл. 4.12.2008.
90. 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.

91. 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.
92. Godyak, V.A. Electron Energy Distribution Function Measurements and Plasma Parameters in Inductively Coupled Argon Plasma / V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich // Plasma Sources Science and Technology – 2002. – Vol. 11. – P.525-543.
93. Способ интегральной диагностики ВЧ индукционного газоразрядного устройства. Заявка на патент RU 2015110801 от 26.03.2015 / В.А. Рябый, В.А. Годяк, В.А. Обухов, П.Е. Машеров, А.И. Могулкин.
94. Masherov, P.E. Integral Diagnostics of an ICP Discharge System / P.E. Masherov, A.I. Mogulkin, V.A. Obukhov // rep. No. P 3.7, Proceeding of the 6 International Workshop and Summer School on Plasma Physics – Kiten, Bulgaria. – 2014. – P.48.
95. High Frequency Ion Source: US Patent 6378290 B1 / R. Killinger, H. Muller, H. Bassner, R. Kukies // дата публ. 30.04.2002, заявл. 10.10.2000, приор. 7.10.1999.
96. Рябый, В.А. Сертификация технологического ВЧ индукционного источника ионов RIM-20 / В.А. Рябый, В.А. Обухов, П.Е. Машеров, А.И. Могулкин // Труды 24-й Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела», 2014, июль. – Севастополь, РФ. – С. 407–417.
97. 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 // IEPC-2015-450p/ISTS-2015-b-450p, 34th International Electric Propulsion Conference. – 4-10 July, 2015. – Hyogo-Kobe, Japan.
98. Godyak, V.A. Probe Measurements Of Electron-Energy Distributions In Plasmas: What Can We Measure and How Can We Achieve Reliable Results?/ V.A. Godyak, V.I. Demidov // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2011. – Vol. 44. – 233001.
99. VGPS probe station URL: <http://www.plasmasensors.com>.
100. Riaby, V.A. On the Objectivity Of Plasma Diagnostics Using Langmuir Probes / V.A. Riaby, V.A. Obukhov, P.E. Masherov // High Voltage Engineering. – 2012. – Vol. 38. – P. 790-793.
101. Druyvesteyn, M.J. Der Niedervoltbogen / M.J. Druyvesteyn // Zeitschrift fur Physik – 1930. – Feit 64. – №. 11-12. – P. 781-798.
102. 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.

103.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.

104.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.

105.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.

106.Способ локальной диагностики плазмы с помощью одиночного зонда Ленгмюра. Заявка на патент RU 2015115585 от 24.04.2015/ В.А. Рябый, П.Е. Машеров.

107.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.

108.Каган, Ю.М. Зондовые методы исследования плазмы / Ю.М. Каган, В.И. Перель // УФН – 1963. – Т. 81. – № 3. – С. 409-452.

109.Guthrie, A. The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields / A. Guthrie, R.K. Wakerling (ed.), paper of D. Bohm – McGraw-Hill, 1949. – Vol. 5. – P. 1-76.

110.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.

111.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.

112.Козлов, О.В. Электрический зонд в плазме/ О.В. Козлов – М.: Атомиздат, 1969. – 292 с.

113.Masherov, P.E. Integral Electrical Characteristics and Local Plasma Parameters of a RF Ion Thruster / P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.A. Godyak // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87. – 02B926.

114.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.

115.Piejak, R.B. The Hairpin Resonator: A Plasma Density Measuring Technique Revisited / R.B. Piejak, V.A. Godyak, R. Garner, B.M. Alexandrovich, N. Sternberg // Journal of Applied Physics – 2004. – Vol. 95. – № 7. – P. 3795-3791.

116. Демидов, В.И. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы / В.И. Демидов, Н.Б. Колоколов, А.А. Кудрявцев, – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 49 с.
117. 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.
118. Walther, R. Plasma Diagnostics of the RF-Ion Thruster 'RIT-10.' / R. Walther, M. Schäfer, J. Freisinger // 9th Electric Propulsion Conference. – 17-19 April, 1972. – Bethesda, MD, USA. – P. 472.
119. Рябый, В.А. Экспериментальное исследование эффективности лабораторной модели ВЧИД-200 в виде технологической установки RIM-20 / В.А. Рябый, В.А. Обухов, П.Е. Машеров, А.В. Кудрявцев // 12-я междунар. конф. «Авиация и космонавтика-13» – М.: изд. МАИ, 2013. – С. 342-344.
120. Рябый, В.А. Характеризация ВЧ индукционного газоразрядного узла ВЧ источника ионов / В.А. Рябый, М.Н. Булаева, П.Е. Машеров, А.И. Могулкин // Труды Всероссийской (с международным участием) конф. «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014. Казань: изд-во КНИТУ – Т. 2. – С. 342-346.
121. Loeb, H.W. Principle Of Radio-Frequency Ion Thrusters RIT. Workshop RIT-22 Demonstrator Test At Astrium At Giessen University / H.W. Loeb – Giessen: Giessen University, 2010 – 86 p.
122. Piejak, R. Surface Temperature And Thermal Balance of Probes Immersed in High Density Plasma / R. Piejak, V. Godyak, B. Alexandrovich, N. Tishchtnko // Plasma Sources Science and Technology. – 1998. – Vol. 7. – P. 590-598.
123. Godyak, V. Observation of the Ponderomotive Effect in an Inductive Plasma / V. Godyak, R. Piejak, B. Alexandrovich, A. Smolyakov // Plasma Sources Science and Technology – 2001 – Vol. 10 – P. 459-462.
124. Лохте-Хольтгревен, В. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды / В. Лохте-Хольтгревен – М., Мир, 1971 – 552 с.
125. Absalamov, S.K. Measurement of Plasma Parameters in the Stationary Plasma Thruster (SPT-100) Plume and Its Effects on Spacecraft Components / S.K. Absalamov, V.B. Andreev, T. Colbert, M. Day, V.V. Egorov, R.U. Gnizdor, H. Kaufman, V. Kim, A.I. Koriakin, K.N. Kozubskii // AIAA 92-3156, AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. – 6-8 July, 1992. Nashville, TN, U.S.A.
126. 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.

127.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.

128.Smartprobe station, URL:http://www.jcmueller.de/pdf/Smartprobe_brochure.pdf.

129.Langmuir probe station, URL:http://www.impedans.com/langmuir-probe#quicktabs-langmuir_tab_system.

130.ESPION Probe Station, URL:<http://www.hidenanalytical.com/en/products/for-thin-films-plasma-surface-engineering/espion#brochures>.

131.Riaby, V. Decrease of Plasma Perturbations Caused by Langmuir Probes / V. Riaby, V. Obukhov, P. Masherov, V. Savinov // Proc. 21 Intern. Symp. on Plasma Chemistry.– Cairns: Austr. Nat. Univ., 2013, report No.410. – Cairns, Australia. – Aug. 2013. – URL: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID410.pdf>.

132.Nuhn, B. Comparison of Classical and Numerical Evaluation of Langmuir Probe Characteristics at Low Plasma Densities / B. Nuhn, G. Peter // Proceedings of XIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases. – 1977. – Vol. 2 – P. 97-98.

133.Обухов, В.А. Расчет переходного слоя в эмиссионном отверстии газоразрядного источника ионов/ В.А. Обухов, В.Е. Сосновский// 5-ая Конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам / М.: Наука, 1982. – С. 105-106.

134.Панасенков, А.А. Водородный источник ионов с периферийным магнитным полем / А.А. Панасенков, С.А. Равичев, Н.Н. Семашко, В.М. Кулыгин // Плазменные ускорители и ионные инжекторы: сб. науч. статей / Наука – М., 1984. – С. 154-163.

135.Разработка возможных сценариев увода объектов космического мусора из области ГСО на орбиту захоронения с использованием сервисного КА, в т.ч. с ЭРДУ. Предварительный проектно-баллистический анализ и предложения по уводу крупногабаритных фрагментов космического мусора из окрестности ГСО с использованием сервисного КА с ЭРДУ. Анализ способов стыковки этого КА с фрагментами мусора. Этап 2. «Предварительный проектно-баллистический анализ и предложения по уводу крупногабаритных фрагментов космического мусора из окрестности ГСО с использованием сервисного КА с ЭРДУ. Анализ способов стыковки этого КА с фрагментами мусора»: НТО по НИР «Дебри-ПМЭ» / Науч.-исслед. ин-т прикладной механики и электродинамики; рук. Попов Г.А. – М., 2012. – 90 с. – Исполн.: Г.А. Попов, В.А. Обухов, В.Г. Петухов, В.М. Кульков, Е.М. Петров, М.С. Константинов, Г.Г. Федотов, А.А. Белик, В.В. Свотина, Р.В. Ельников, Ю.Г. Егоров. – Библиогр. С. 87-90. – Инв. № 02-5-16-32/12 ДСП.

136. Goebel, D. M. Fundamental of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters / D.M. Goebel, I. Katz – New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 507 p.

137. Loeb, H.W. Status Report of the Giessen University and TransMit GmbH, Nordwijk / H.W. Loeb, K.H. Schartner – 2008. – 24 p.
138. Программный комплекс IGUN, URL:<http://www.egun-igun.com>.