

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

На правах рукописи



ПЕЙСАХОВИЧ ОЛЕГ ДМИТРИЕВИЧ

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С
ЧЕТЫРЁХЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМОЙ УСКОРЕНИЯ**

Специальность 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Хартов Сергей Анатольевич

Оглавление

Введение	5
Глава 1 Обзор современного состояния в области электроракетного двигателестроения.....	13
1.1 Основные типы электроракетных двигателей	13
1.1.1 Двигатели с замкнутым дрейфом электронов	13
1.1.2 Ионный двигатель постоянного тока.....	14
1.1.3 Высокочастотный ионный двигатель	15
1.2 Система ускорения в существующих ионных двигателях	16
1.2.1 Основные характеристики систем ускорения ионных двигателей..	20
1.2.2 Обзор существующих ионных двигатели	24
1.3 Двухступенчатая четырехэлектродная система ускорения перспективных ионных двигателей	27
1.3.1 Обзор существующих лабораторных моделей двигателей с четырехэлектродными системами ускорения	37
1.3.2 Оценки ресурса ионных двигателей с четырёхэлектродной системой ускорения	44
1.4 Заключение по Главе 1	49
Глава 2 Экспериментальное оборудование.....	50
2.1 Описание экспериментальных стендов	50
2.1.1 Экспериментальное оборудование стенда 2ИУ-3В	50
2.1.1.2 Система подачи рабочего тела 2ИУ-3В	52
2.1.2 Экспериментальное оборудование стенда 2ИУ-4В	55

2.1.2.2 Система подачи рабочего тела 2ИУ-4В	57
2.2 Оценка погрешностей регистрируемых параметров.....	59
2.3 Описание лабораторных моделей ионных двигателей	62
2.3.1 Лабораторная модель источника ионов с четырехэлектродной системой ускорения	62
2.3.2 Лабораторная модель высокочастотного ионного двигателя средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения.....	65
Глава 3 Расчётное и экспериментальное исследования вторичных потоков в системе ускорения.....	68
3.1 Экспериментальное исследование вторичных токов в четырёхэлектродной системе ускорения	68
3.1.1 Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.....	89
3.2 Заключение по Главе 3	97
Глава 4 Исследование лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения.....	98
4.1 Расчетная оценка применения четырёхэлектродной системы ускорения в составе лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя	98
4.1.1 Оценка интегральных характеристик высокочастотного ионного двигателя	98
4.1.2 Моделирование четырёхэлектродной системы ускорения	105
4.2 Расчётное и экспериментальное исследования лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения	110

4.2.1 Моделирование параметров плазмы в газоразрядной камере и конфигурации ионного пучка	110
4.2.2 Экспериментальное исследование лабораторной модели средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения	116
4.2.3 Измерение энергетического спектра ионного пучка извлекаемого из четырёхэлектродной системы ускорения	121
4.2.4 Сравнительный анализ результатов эксперимента	126
4.3 Расчётная оценка характеристик перспективного высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения.....	139
4.4 Заключение по Главе 4	141
Заключение	143
Список используемых сокращений	144
Список литературы	145
Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертационной работы	158

Введение

Актуальность темы исследования

Одним из наиболее востребованных на сегодняшний день направлений развития космической техники в части двигателестроения является разработка электроракетных двигателей с высокими удельным импульсом тяги (УИТ) и плотностью тяги для перспективных космических аппаратов (КА) с длительным сроком активного существования и КА для полетов по исследованию дальнего космоса. Применительно к телекоммуникационным КА, создаваемые ионные двигатели (ИД) должны обеспечивать двухрежимность работы, что необходимо для эффективного выполнения межорбитальных манёвров и поддержания орбиты с использованием единой двигательной установки. КА для межпланетных полетов также требуют функционирования двигателя в двух режимах по УИТ и тяге, что позволяет, с одной стороны, экономить рабочее тело на участке перелёта, а с другой сокращать время при манёврах вблизи планет.

Двухрежимные двигатели с четырехэлектродной системой ускорения (СУ) позволят на базе одной электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) с повышенной эффективностью выполнять задачи по довыведению КА на целевую орбиту, а затем осуществлять позиционирование и коррекцию орбиты в рамках поставленной миссии. В последнее время задачу по довыведению КА «Экспресс-АМУ-7» выполняет двигатель СПД-140Д, а по достижении целевой орбиты он отключается и дальнейшие маневры по ее поддержанию осуществляются с использованием СПД-100 [30, 34, 37]. Создание двухрежимного ионного двигателя позволит снизить массу ЭРДУ, что позволит повысить массу полезной нагрузки, а также увеличить срок активного существования КА. По программе «*Full Electric Propulsion*» на космической платформе *Boeing 702* используется двухрежимный двигатель XIPS-25. При полете до заданной высоты орбиты двигатель работает на режиме высокой мощности с тягой 165 мН и УИТ 2250 с., а для последующего поддержания и ориентации на орбите используется режим низкой мощности с тягой 80 мН и УИТ 3420 с. Тяговый КПД XIPS-25 на обоих режимах составляет

порядка 0,68, отдельные образцы двигателей имеют наработку 15250 часов и 14134 включений в ходе эксплуатации. [61, 60, 62]. XIPS-25 построен на схеме Кауфмана, которая имеет ряд ограничений по регулированию, а управление работой на разных режимах в основном осуществляется изменением расхода рабочего тела. При использовании двигателей с высокочастотным (ВЧ) разрядом можно совместно изменять ВЧ мощность и расход рабочего тела (РТ), что дает выигрыш в расширении диапазона регулирования. [26, 27].

Обычно СУ ионного пучка ИД состоит из трех электродов [97]. Ограничение диапазона регулирования по тяге и УИТ такой СУ обусловлено тем, что извлечение и ускорение ионов происходят в единой области – в первом межэлектродном зазоре. Добавление дополнительного извлекающего электрода позволяет разделить эти процессы, так в первой области (первый межэлектродный зазор), в которой можно регулировать величину извлекаемого ионного тока, формируется ионный пучок. Во второй области (второй межэлектродный зазор) ионы рабочего тела ускоряются до требуемых скоростей истечения. Таким образом, появляется возможность увеличения диапазона области регулирования двигателя [45, 46]. Вторым ограничивающим фактором традиционных трехэлектродных СУ в ИД являются предельно достижимый УИТ порядка 9000 с при энергии ионного пучка (ИП) около 5,8 кэВ (для двигателей NEXIS, NSTAR) [56]. В трехэлектродных СУ УИТ напрямую взаимосвязан с ускоряющей разностью потенциалов в первом межэлектродном зазоре, которая ограничена возможностью электрического пробоя межэлектродного зазора. Поэтому, например в инжекторах нейтральных и заряженных частиц наземных установок, где реализуются энергии пучка свыше 100 кэВ, используются многоэлектродные СУ [57, 63, 67].

При использовании существующих ИД с трёхэлектродными (СУ невозможно обеспечить повышенные требования к удельному импульсу тяги, плотности тяги и ресурсу. Поэтому целью диссертационной работы являлось их повышение в высокочастотных ионных двигателях за счёт применения четырёхэлектродной системы ускорения с возможностью обеспечения их многорежимности.

Актуальность темы исследования определяется: в научном плане – необходимостью развития современных теоретических и практических представлений о процессах, протекающих в четырёхэлектродных системах ускорения ионных двигателей; в практическом отношении – необходимостью создания ионных двигателей с повышенными плотностью тяги и удельным импульсом. Создание такого двигателя обеспечит современную потребность в решении задач околоземных и межпланетных перелетов.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время в мире активно ведутся исследования, направленные на создание электроракетных двигателей (ЭРД) с повышенным удельным импульсом и увеличенной плотностью тяги. В Соединённых Штатах работы по разработке ЭРД высокой мощности и большого диаметра (до 600 мм) осуществлялись в рамках проектов NSTAR (NASA JPL; J.S. Sovey, V.K. Rawlin, M.J. Patterson) и NEXIS (NASA JPL; J.E. Polk, J.R. Brophy, M.D. Cassidy), однако были приостановлены из-за нестабильной работы трёхэлектродных систем ускорения при повышенных ускоряющих напряжениях. Первые концепции ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения были предложены D.G. Fearn в 2006 году в Великобритании. Работы по созданию и экспериментальной отработке двигателя DS4G были выполнены научным коллективом Саутгемптонского университета (M. Coletti, S.B. Gabriel, D.G. Fearn) совместно с Европейским космическим агентством (ESA-ESTEC, R. Walker) и Австралийским национальным университетом (C. Bramanti, O. Sutherland). В Германии работы с лабораторной моделью двигателя с четырьмя электродами — RIT 3,5 проводились под руководством A. Mingo, M. Smirnova (TransMIT GmbH) при участии J. Schein (Университет Бундесвера, Мюнхен) и L. Massotti (Европейское космическое агентство — ESA, Европейский центр космических исследований и технологий — ESTEC, Нордвейк, Нидерланды). Следует отметить, что обе исследованные лабораторные модели имели малую мощность, кроме того, в литературе отсутствуют полные данные об их интегральных характеристиках и режимах

работы, что не позволяет сформировать представление о функционировании их четырехэлектродной СУ.

На сегодняшний день также не имеется информации об исследованиях лабораторной модели двухрежимного ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения и отсутствуют экспериментальные данные по интегральным характеристикам и режимам работы таких двигателей. Это свидетельствует о необходимости проведения более глубоких исследований ионных двигателей с четырёхэлектродными системами ускорения.

Объектом исследования являются лабораторные модели ионных двигателей с четырёхэлектродными системами ускорения.

Предметом исследования являются характеристики ионных двигателей с четырёхэлектродными системами ускорения.

Целью работы является повышение удельного импульса и плотности тяги многорежимных высокочастотных ионных двигателей.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Выявление ограничений в системах ускорения существующих ионных двигателей;
2. Разработка четырёхэлектродной системы ускорения для лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя средней мощности;
3. Исследование влияния применения четырёхэлектродной системы ускорения на интегральные характеристики лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя;
4. Измерение вторичных токов на электродах четырёхэлектродной системы ускорения, величины которых определяют ресурс двигателя.

Научная новизна результатов исследований:

- Установлены диапазоны эффективной работы лабораторной модели ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения на режиме

повышенных удельного импульса и плотности тяги при энергии ионного пучка 4 кэВ.

- Экспериментально определены два режима работы лабораторной модели ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения: режим с повышенным удельным импульсом и режим с дросселированием тяги (переход режимов осуществлялся изменением извлекающей и ускоряющей разностей потенциалов между электродами). Экспериментально доказана устойчивая инициация разряда и работа ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения.

- Получены экспериментальные зависимости величин вторичных токов на внешних и внутренних поверхностях электродов систем ускорения от извлекающей разности потенциалов и ускоряющей разности потенциалов.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:

- Экспериментально доказана возможность повышения ресурса и увеличения диапазона регулирования двухрежимного ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения.

- Экспериментально подтверждена возможность применения четырёхэлектродной системы ускорения на уже существующих конструкциях ВЧИД.

- Подтверждена возможность использования физико-математической модели для расчёта конфигурации ионного пучка и определения вторичных токов, выпадающих на поверхности электродов в четырёхэлектродных системах ускорения.

Методология и методы исследований

В ходе экспериментов использовались современные методики регистрации параметров ВЧИД поверенными средствами измерения и контактного исследования локальных параметров пучка тройным электростатическим зондом на аттестованном экспериментальном стенде. Используемые математические модели построены с учётом известных принципов теории физики плазмы газового разряда.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования интегральных характеристик лабораторной модели ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения, позволяющей работать как в режиме повышенного удельного импульса, так и в режиме дросселирования тяги;
- результаты расчётного и экспериментального исследований распределения вторичных токов на отдельные поверхности, извлекающего и ускоряющего электродов в трёх- и четырёхэлектродных системах ускорения.

Степень достоверности и обоснованности результатов исследований

Достоверность приведенных в данной работе результатов исследований обусловлена использованием сертифицированного оборудования и современных, апробированных ранее, методик измерений, сбора и обработки экспериментальных данных. Результаты экспериментальных результатов, полученные на лабораторных моделях двигателя с трёх- и четырёхэлектродными системами ускорения, согласуются с данными исследований других авторов.

Личный вклад автора работы

При непосредственном участии автора:

- разработана четырёхэлектродная система ускорения и модернизирована лабораторная модель ВЧИД, в конструкцию которого была интегрирована данная система;
- проведены экспериментальные исследования лабораторных моделей ИД с четырёхэлектродными системами ускорения;
- произведена обработка экспериментальных данных, на основе которой были получены зависимости основных параметров ИД, позволяющие оценить характеристики перспективных ИД с четырёхэлектродной системой ускорения;
- выполнено качественное сравнение экспериментальных данных и математической модели для оценки влияния четырёхэлектродной системы

ускорения на интегральные характеристики ВЧИД и на вторичные токи в системе ускорения.

Реализация и внедрение результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени

Научные результаты, а именно: новые данные о процессах протекающих в четырёхэлектродных системах ускорения ионных двигателей, используются в учебном процессе кафедры 208 МАИ при преподавании дисциплин: «Прикладные вопросы расчета сильноточных ЭРД» по направлению специализированного высшего образования 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов» (программа «Перспективные электроракетные двигатели космических аппаратов») и «Теория и расчет электроракетных двигателей» по направлению базового высшего образования 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (программа «Проектирование электроракетных двигателей»).

Апробация результатов исследования

Основные результаты расчетных и экспериментальных исследований обсуждались на семинаре кафедры 208 «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) МАИ. Были сделаны 5 докладов на следующих конференциях: XLIX Академические чтения по космонавтике, Москва, 28–31 января 2025 года, Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2023», Ярославль, 21–25 августа 2023 года, 21-ая и 22-я конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 2022 г., 2023 г.; XLVII Академические чтения по космонавтике 2023, Москва, 24–27 января 2023 года.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано **13** работ в рецензируемых научных изданиях. Из **13** работ: **4** – статьи в рецензируемых научных изданиях из рекомендованного ВАК перечня; **5** – тезисов докладов на научных конференциях. Получено два патента на изобретение (RU 2752857 C1, опубликован 11.08.2021; RU 2763333 C1, опубликован 18.12.2021).

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 158 страницах машинописного текста, включает в себя 136 рисунков, 18 таблиц, а также список литературы, содержащий 98 наименований. Работа разделена на: введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, определён объект исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводятся характеристики современных и перспективных ИД, демонстрируются последние наработки в области двухрежимных ИД, описывается принцип работы четырехэлектродных СУ и их преимущества по сравнению с трёхэлектродными СУ, выявляются ограничения существующих трехэлектродных систем ускорения ИД.

Во второй главе приводится описание экспериментального стендового оборудования и лабораторных моделей двигателей, используемых в работе.

В третьей главе описывается проведенное экспериментальное и расчетное исследование по определению вторичных токов, протекающих в четырехэлектродной СУ источника ионов КЛАН-53-3.4.

В четвертой главе описываются расчетное и экспериментальное исследования высокочастотного ионного двигателя средней мощности с диаметром ионного пучка 150 мм и четырехэлектродной системой ускорения.

Заключение содержит основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Глава 1 Обзор современного состояния в области электроракетного двигателестроения

1.1 Основные типы электроракетных двигателей

Электроракетные двигатели структурно делятся по физическому принципу организации разряда и по методу ускорения заряженных частиц. Классификация таких двигателей представлена в таблице 1.1. В данной работе основное внимание уделено ионным двигателям.

Таблица 1.1 – Классификация ЭРД [8, 12, 23, 24]

Характеристики	Электроракетные двигатели					
	Электро-термические	Электромагнитные двигатели			Ионные двигатели	
	Электро-дуговые двигатели	Магнитоплазмадинамические	ЭРД с замкнутым дрейфом электронов		С разрядом постоянного тока	С ВЧ и СВЧ разрядом
			Стациарные плазменные двигатели	Двигатели с анодным слоем		
Удельный импульс тяги, с	400–2000	4000–10000	1000–3000	1000–7000	3000–8000 и выше	
Цена тяги, кВт/Н	7,5–10	30–100	10–30	10–40	25–65	
Рабочее тело	Аммиак, гидразин, водород	Литий, газы, включая водород	Ксенон, криптон	Ксенон, криптон, жидкие металлы	Ксенон, криптон	

1.1.1 Двигатели с замкнутым дрейфом электронов

Двигатели с замкнутым дрейфом электронов основаны на создании и ускорении плазмы в электрическом газовом разряде в скрещенных электрическом и магнитном полях, обеспечивающих замкнутый дрейф электронов. Необходимая конфигурация разряда реализуется в канале кольцевой геометрии, ограниченном изолятором, в котором анод и катод установлены относительно друг друга по оси, а магнитное поле в разрядном канале имеет преимущественно радиальную компоненту. Продольное электрическое поле, ускоряющее ионы, возникает в описанной конфигурации разряда при подаче разности потенциалов между катодом и анодом и зажигании разряда [15]. Двигатели с замкнутым дрейфом электронов подразделяются на стационарные плазменные двигатели (СПД) и двигатели с анодным слоем (ДАС). В ДАС зона ускорения, в которой создается

электрическое поле, существенно превышает ларморовский радиус электрона. Принципиальные схемы СПД и различных модификаций ДАС имеют родство в части формы ускорительного канала, расположения анода и катода. К существенному конструктивному отличию ДАС следует отнести отсутствие в его конструкции кольцевого изолятора, что существенно изменяет топологию электрического поля. Наибольшую летную историю на текущий момент имеют СПД они успешно применяются на различных КА. Одно из ограничений работы таких двигателей это взаимосвязь ускоряющей разности потенциалов с эффективностью генерации плазмы. В связи этим плотность тяги возможно регулировать в основном расходом рабочего тела [10, 15].

1.1.2 Ионный двигатель постоянного тока

Принципиальная схема ионного двигателя с разрядом постоянного тока (ИДПТ) приведена на рисунке 1.1. Газоразрядная камера (ГРК) (1) содержит катодный блок, содержащий собственно катод (2) и электрод инициации разряда (2 а), а также анод (3). Магнитная система ГРК образована катушками (4) (или постоянными магнитами), магнитопроводом с внутренним (5) и внешним (6) полюсными наконечниками. Магнитная система формирует расходящееся от катода магнитное поле, силовые линии (7) которого условно показаны на рисунке. Основа рабочего процесса ГРК ИДПТ - разряд с горячим катодом во внешнем магнитном поле. Наиболее ответственным узлом ГРК является катод, который должен обладать высокой эмиссионной способностью (ток эмиссии в 5-7 раз превышает ток ионного пучка). Топология магнитного поля должна обеспечивать магнитную изоляцию плазмы для снижения тока электронов на анод (тока разряда). Регулирование таких двигателей в основном осуществляется путем изменения мощности разряда [89].

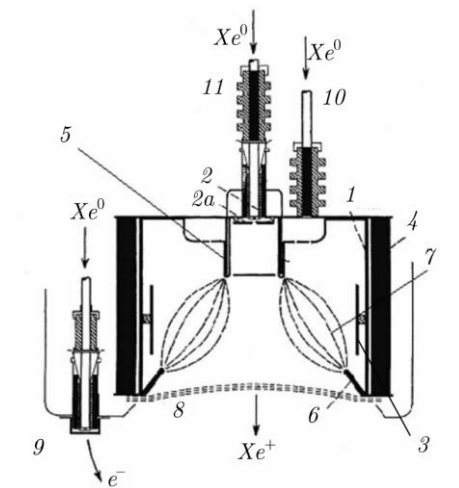


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема ионного двигателя с разрядом постоянного тока:

1 – катодный блок; 2 – катод; 2а – электрод инициации разряда; 3 – анод, 4 – катушки возбуждения; 5 – внутренний полюсный наконечник; 6 – внешний полюсный наконечник; 7 – силовые линии, 8 – система ускорения, 9 – катод нейтрализатор, 10 – подвод РТ в ГРК, 11 – подвод РТ в катод

1.1.3 Высокочастотный ионный двигатель

Высокочастотный ионный двигатель ВЧИД является одним из типов электроракетных двигателей в котором реализован высокочастотный индуктивный разряд для создания плазмы в области газоразрядной камеры и электростатический механизм разделения зарядов с последующим их ускорением. Схема работы данного типа двигателей представлена на рисунке 1.2.

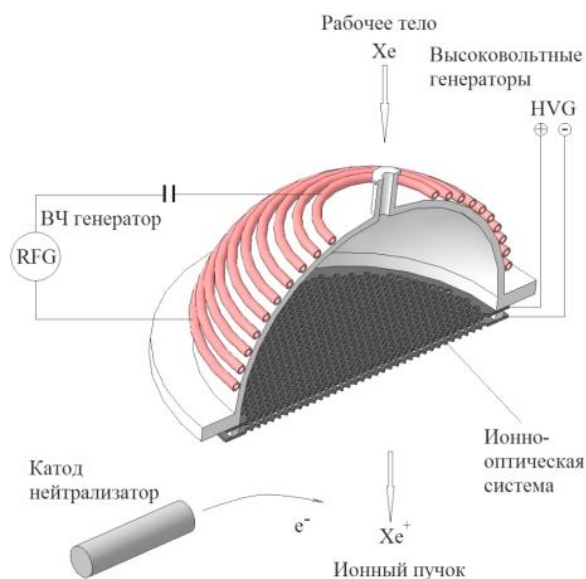


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема ВЧИД [27, 28]

Рабочий газ, в основном ксенон или криптон, подается в газоразрядную камеру. Высокочастотная (ВЧ) мощность в радиочастотном диапазоне подводится от ВЧ-генератора к индуктору. Зажигание разряда инициируется кратковременной подачей электронов, эмитируемых нейтрализатором в разрядную камеру. После зажигания в разрядной камере поддерживается ВЧ разряд индуктивного типа. В разряде нагреваемые ВЧ электромагнитным полем электроны производят ионизацию рабочего тела. Ионы извлекаются из плазмы разряда и ускоряются в системе ускорения. На стационарном режиме работы нейтрализатор служит для инжекции электронов в пучок ускоренных ионов, что обеспечивает токовую нейтрализацию плазменной струи [33].

1.2 Система ускорения в существующих ионных двигателях

Системы ускорения ИД так же называют ионно-оптическими системами (ИОС). Традиционные СУ включают в себя два электрода – эмиссионный (ЭЭ) и ускоряющий (УЭ) – выполнены перфорированными с множеством соосных отверстий. Третий замедляющий электрод (ЗЭ) чаще всего выполняется кольцевым, охватывающим пучок или может быть также перфорированным.

Потенциал ЭЭ положителен, потенциал УЭ отрицателен по отношению к корпусу. ЗЭ заземлен или находится под потенциалом корпуса аппарата [9, 21, 25, 42]. Ионы извлекаются из квазинейтральной плазмы газового разряда в ГРК через отверстия в эмитсионном электроде и ускоряются за счет потенциалов между ЭЭ и УЭ. Формирование пучка ионов определенной энергии, плотности тока и геометрии достигается согласованием параметров газоразрядной плазмы (концентрации плазмы и электронной температуры) с геометрическими параметрами СУ (диаметрами отверстий, толщинами электродов и величинами межэлектродных зазоров), а также электрическими потенциалами ЭЭ и УЭ и атомной массой рабочего тела. На выходе из двигателя ионный пучок в зоне нейтрализации трансформируется в поток квазинейтральной плазмы. Потенциал плазмы в зоне нейтрализации автоматически устанавливается таким образом, что формируется потенциальная ловушка для удержания в ее объеме электронов, компенсирующих пространственный заряд ионов. Конструктивная схема трехэлектродной системы ускорения, в которой реализуется схема «ускорение-торможение ионов», показана на рисунке 1.3.

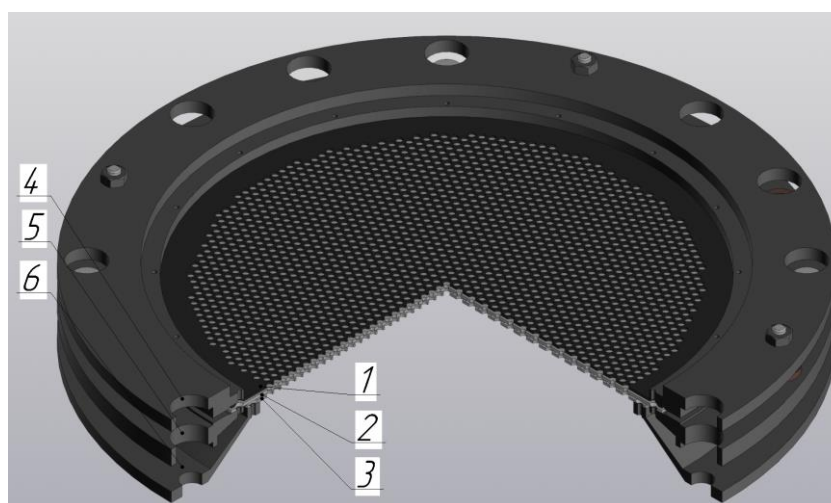


Рисунок 1.3 – Конструктивная схема системы ускорения:

1 – ЭЭ; 2 – УЭ; 3 – ЗЭ; 4 – фланец ЭЭ; 5 – фланец УЭ; 6 – фланец ЗЭ

Принципиальная схема трехэлектродной СУ и распределение электрических потенциалов на электродах показаны на рисунке 1.4.

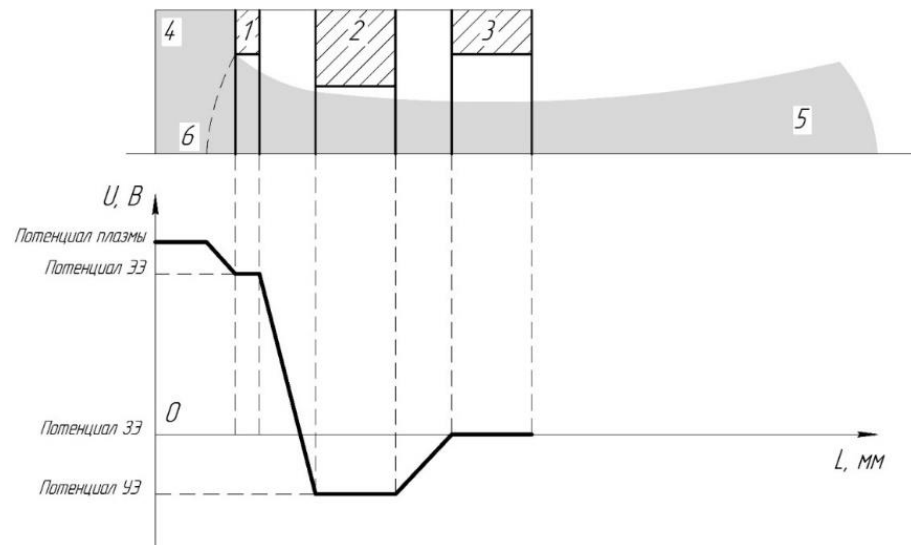


Рисунок 1.4 - Принципиальная схема трехэлектродной СУ:

- 1 – эмиссионный электрод; 2 – ускоряющий электрод; 3 – замедляющий электрод;
4 – плазма ГРК; 5 – плазма ионного пучка; 6 – плазменный мениск

В трехэлектродной СУ изменение ускоряющей разности потенциалов между ЭЭ и УЭ, приводит к изменению формы плазменного мениска. Так при повышении или понижении напряжённости электрического поля плазменный мениск увеличивает или уменьшает радиус кривизны, что приводит к изменению фокусировки ионного пучка и изменению извлекаемого ионного тока пучка. Поэтому для обеспечения стабильной работы СУ необходимо подбирать оптимальную величину межэлектродного зазора при заданных потенциалах ускорения. При работах на высоких напряжениях, 4 кВ и более, требуется увеличивать межэлектродный зазор, что способствует падению извлекаемого ионного тока согласно закону Чайлда-Ленгмюра [9]. Проблему взаимосвязи конфигурации пучка при разных значениях ускоряющих потенциалов позволяет решить использование четырёхэлектродной СУ. Конструктивная схема четырёхэлектродной СУ, разработанной в рамках диссертационной работы представлена на рисунке 1.5.

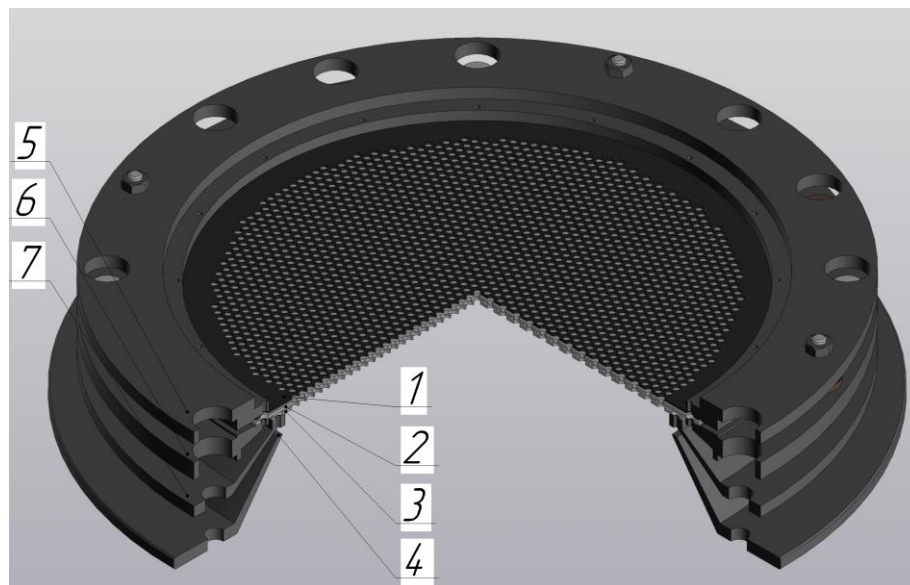


Рисунок 1.5 – Конструктивная схема системы ускорения:

1 – ЭЭ; 2 – ИЭ; 3 – УЭ; 4 – ЗЭ; 5 – фланец ЭЭ; 6 – фланец ИЭ; 7 – фланец УЭ

Принципиальная схема четырёхэлектродной СУ с распределением электрических потенциалов показана на рисунке 1.6.

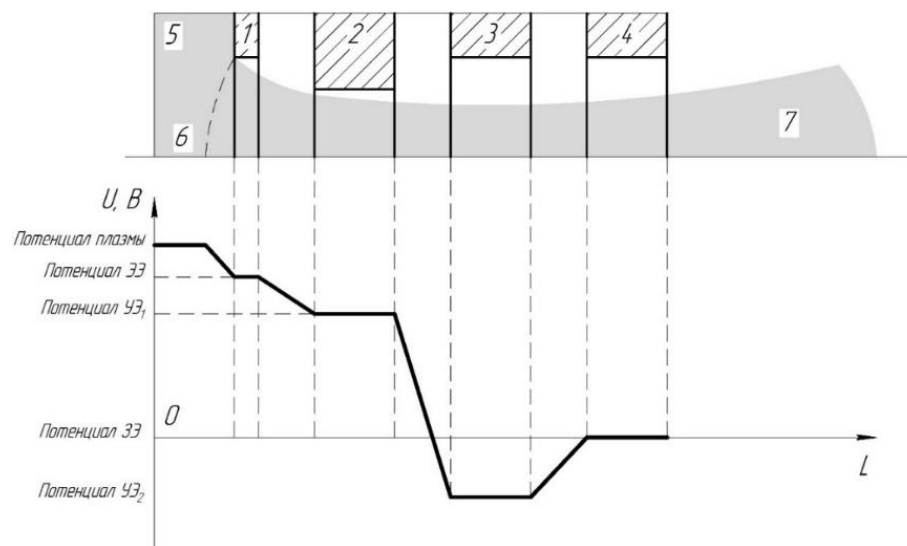


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема четырёхэлектродной СУ:

1 – эмиссионный электрод; 2 – извлекающий электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – замедляющий электрод; 5 – плазма ГРК; 6 – плазменный мениск; 7 – плазма ионного пучка

Добавление в конструкцию четвертого извлекающего электрода (ИЭ) позволяет разделить процессы извлечения ионного пучка из плазмы ГРК и

ускорение его до требуемых скоростей [5, 6]. В первом межэлектродном зазоре между ЭЭ и ИЭ подбирается оптимальный межэлектродный зазор, обеспечивающий предельную для данной конструкции извлекающую способность СУ, потенциалом ЭЭ задается энергия ИП. Во втором межэлектродном зазоре между ИЭ и УЭ обеспечивается ускорение ИП. Исходя из пробойной прочности материалов в условиях работы ИД, для заданной разности потенциалов ускорения расчетным и экспериментальным путём определяется межэлектродный зазор. Эти два процесса обуславливают двух ступенчатость СУ. Разделение процессов извлечения и ускорения добавляет дополнительную степень свободы в регулировании характеристиками ионного пучка [12, 29, 35].

1.2.1 Основные характеристики систем ускорения ионных двигателей

Проектирование СУ является многопараметрической задачей, в которой должны быть учтены параметры плазмы в ГРК, непосредственно влияющие на её геометрическую конфигурацию. Определяющим критерием эффективности СУ является форма плазменного мениска, который образуется вблизи отверстий эмиссионного электрода и является границей раздела сред между плазмой ГРК и ионным пучком. В зависимости от плотности плазмы в ГРК и распределения электростатического поля в СУ мениск может менять радиус кривизны и даже смещаться вглубь отверстия эмиссионного электрода. Расчеты СУ обычно проводятся в программных продуктах [38, 40]. Напряженность электрического поля между ЭЭ и УЭ совместно с плотностью в плазмы ГРК в трехэлектродных СУ задает форму границы плазмы – плазменного мениска. Обычно в квалификационных и летных ионных моделях ИД потенциал ЭЭ не превышает 0,9- 2 кВ, а напряжение на УЭ задается в пределах 10-20% от потенциала ЭЭ. На извлекающую способность СУ существенное влияние оказывает толщина ЭЭ [69, 70, 72], а ресурс ИД определяет толщина и диаметр отверстий УЭ [6, 7]. В современных ИД ресурс заявлен более 30 тыс. часов [59]. Трехэлектродная СУ может быть выполнена как из трех перфорированных электродов, так и с

кольцевым замедляющим электродом. Во втором случае поверхность УЭ, обращенная к плазме по потоку, подвержена сильной эрозии за счет бомбардировки ионами перезаряди и образовавшимися в области нейтрализации потока.

Обычно при испытаниях ВЧИД производят отработку двигателя во всем диапазоне расходов и мощностей и регистрируют интегральные характеристики по постоянному току пучка при заданном ускоряющем напряжении [70, 74, 78, 82]. Это стандартная методика, предложенная профессором Х. Лёбом – основоположником разработки ВЧИД, для определения рабочего диапазона ВЧИД. Так для оценки эффективности ВЧИД в работе [32, 73], были получены интегральные характеристики двух двигателей RIT-15 (Двигатель I) и RIT-15LT (Двигатель II), ускоряющее напряжение на всех режимах работы составляло 900 В, графики зависимости ВЧ мощности от расхода рабочего тела представлены на рисунке 1.7. Оптимальная область работы ВЧИД находится в зоне, где соотношение мощности к расходу, то есть цена ампера ионного тока имеет минимальное значение. В современных двигателях значение цены ампера стремится к 300 Вт/А и ниже. В работе [72] было также показано, что на величину извлекаемого ионного тока влияет толщина ЭЭ. На рисунке 1.8 представлены зависимости цены иона от коэффициента использования рабочего тела (КИРТ) для двух моделей ИД RIT-15 при различной толщине эмиссионного электрода (ток пучка 400 мА, тяга 20 мН).

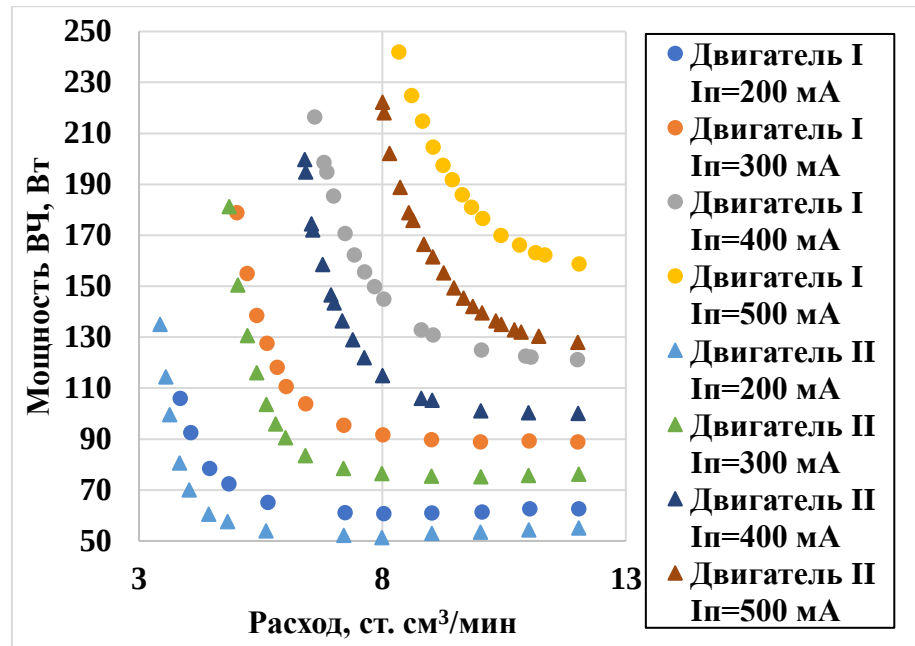


Рисунок 1.7 - Интегральные характеристики RIT-15 и RIT-15LT [72]

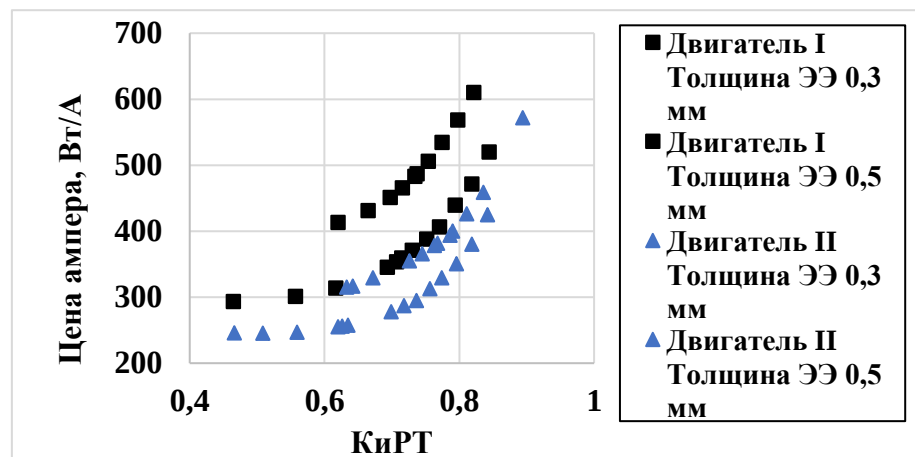


Рисунок 1.8 - Сравнение эффективности двух моделей RIT-15 при различной [72]

Из представленных зависимостей видно, что использование эмиссионного электрода толщиной 0,3 мм, вместо 0,5 мм, позволяет снизить величину вкладываемой ВЧ мощности для того же извлекаемого тока ионного пучка приблизительно на 20%. То есть при неизменной ВЧ мощности уменьшение толщины ЭЭ позволит извлечь больше ионного тока. Так же на величину извлекаемого тока из СУ влияет межэлектродный зазор между ЭЭ и УЭ,

уменьшение которого позволяет повысить предельную плотность тока $j_{\text{пр}}$, оцениваемую с помощью закона Чайлда-Ленгмюра [9]:

$$j_{\text{пр}} = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{M_{\text{РТ}}} \frac{U_{\Sigma}^{3/2}}{\delta^2 + \frac{d^2}{4}}}, \quad (1.1)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный электрический заряд; $M_{\text{РТ}}$ – масса иона рабочего тела, кг; $U_{\Sigma} = U_{\text{ЭЭ}} + U_{\text{УЭ}}$ – ускоряющая разность потенциалов, В; δ – величина межэлектродного зазора, м; d – диаметр отверстия эмиссионного электрода, м.

Стоит иметь в виду что данная формула справедлива для плоского диода и даёт сильно завышенные результаты по плотности ионного тока применительно к СУ ИД. Во время работы ионных двигателей электроды СУ могут быть подвержены значительным температурным деформациям [18, 25, 28, 83, 84, 86], что накладывает определённые ограничения на уменьшение межэлектродного зазора. Ещё одним ограничивающим фактором при выборе межэлектродного зазора является пробойное напряжение. Допустимые межэлектродные зазоры с учётом запаса в 35% для основных материалов электродов СУ ИД (молибден, углерод-углеродные композитные материалы, пиролитический графит) [31, 32, 33, 70, 71] представлены на рисунке 1.9. Представленные данные показывают, что допустимый межэлектродный зазор при разности потенциалов между электродами 2 кВ лежит в диапазоне 0,9-1,4 мм, а при напряжении 4 кВ – 1,3-2,1 мм [87, 88, 90, 93]. При работе в режиме повышенного удельного импульса с ускоряющим напряжением 4 кВ, минимально допустимый зазор при использовании молибденовых электродов составляет порядка 1,3 мм. В летных двигателях межэлектродные зазоры обычно составляют около 0,6-1,2 мм, а напряженность электрического поля не превышает 0,9-2 кВ/мм [52, 56, 92]. При увеличении ускоряющих напряжений требуется увеличивать межэлектродный зазор при

сохранении данной напряженности поля. Использование четырёхэлектродной СУ позволяет перераспределить падение напряжения, составляющее, между двумя парами электродов ЭЭ - ИЭ и ИЭ - УЭ, обеспечив таким образом запас по пробойной прочности зазоров.

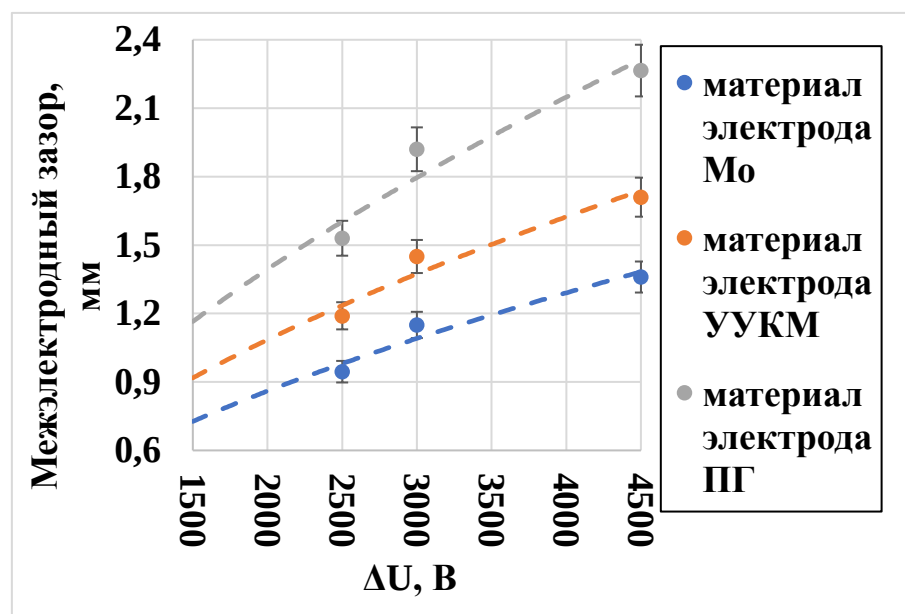


Рисунок 1.9 - Зависимости предельного межэлектродного зазора от напряжения пробоя для различных материалов СУ [31]

Мо – молибден; УУКМ – углерод – углеродный композитный материал;
ПГ – пиролитический графит

Обычно используют пару электродов, выполненных из разнородных материалов. В СУ двигателей ЭЭ обычно изготавливают из молибдена или титана, объемный коэффициент распыления которых равен $62 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Кл}$ и $38 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Кл}$ соответственно, а УЭ из композитных материалов с коэффициентом распыления порядка $9 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Кл}$, эрозионная стойкость которых намного выше, чем у металлов, что обеспечивает требование по ресурсу [85].

1.2.2 Обзор существующих ионных двигатели

Одной из перспектив применения ЭРД на околоземных космических аппаратах (КА) является обеспечение двухрежимности их работы по тяге и УИ. Эта особенность позволяет осуществлять с использованием одного двигательного

блока как довыведение при межорбитальном маневре КА, так коррекцию положения аппарата на целевой орбите. Наиболее распространенным примером, с помощью которого реализован такой полет КА, является ИД XIPS-25 [61], фотография которого представлена на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – XIPS-25

Данный двигатель работает в двух режимах с мощностями 2 кВт и 4,2 кВт и удельными импульсами, соответственно, 3420 с. и 3550 с. Эти параметры подтверждены летной историей двигателя. Характеристики данной модели ЭРД представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Параметры XIPS-25 [61]

Параметр:	Режим пониженной мощности	Режим повышенной мощности
Диаметр пучка, мм	250	
Мощность ЭРД, кВт	2,0	4,2
Удельный импульс, с	3420	3550
Тяга, мН	80	166

Плотность тяги, мН/см ²	0,16	0,34
КПД, %	67	68,8
Коэффициент использования рабочего тела (КиРТ), %	80	82,5
Энергия пучка, кэВ	1,2	
Ток пучка, А	1,45	3,5

В зависимости от режима работы мощность ЭРД меняется более чем в 2 раза. Рабочий процесс XIPS-25 построен по схеме с разрядом постоянного тока. Двухрежимность XIPS-25 обеспечивается за счёт изменения расхода рабочего тела, вкладываемой в результате этого в плазменный разряд мощности, при сохранении постоянной величины ускоряющего напряжения в ионно-оптической системе – около 1,2 кВ. Для сравнения в работе использовались данные отечественных ИД с разрядом постоянного тока разработки ведущего предприятия России АО ГНЦ «Центр Келдыша», а также одной из разработок двигателя на основе ВЧ разряда – модели средней мощности RIT-15 LP, разработанного в Гиссенском университете и другие ИД прошедших квалификационные испытания. Для сравнения приведены характеристики перспективного ВЧИД с четырёхэлектродной СУ разработанного в Саутгемптонском университете авторами работ [50, 51, 52, 53], стоит отметить что это лабораторный лабораторная модель для изучения и отработки двухступенчатых СУ. Характеристики этих двигателей представлены в таблице 1.3. [21, 23, 24, 64, 66, 68].

Таблица 1.3. Параметры современных моделей ИД

Параметр:	ИД-200	ИД-200КР	RIT-15 LP	UK-10	T-5	DS4G
Диаметр пучка, мм	200		150	100		20
Мощность ЭРД, кВт	5	3	1,275-1,325	0,5-0,7	0,7	0,3-0,6
Удельный импульс, с	6370	4410	2900-3600	3300	500-3200	>14000

Тяга, мН	100	85	2,5-50	18	1-25	2,7
Плотность тяги, мН/см ²	0,32	0,27	0,28	0,23	0,32	0,8-1,7
КПД, %	-	-	67	66	55	70
КИРТ, %	-	-	90	84	80	96
Энергия пучка, кэВ	-	-	1,1	1,2	1,2	10-17
Ток пучка, А	-	-	0,9	0,318	0,12- 0,3	0,004- 0,033

1.3 Двухступенчатая четырехэлектродная система ускорения перспективных ионных двигателей

Многоступенчатые системы ускорения широко используются в ионных ускорителях [47, 48, 93, 94, 95] и в источниках нейтральных атомов. Для источников нейтральных атомов требуется сократить каскад системы ускорения в силу работы при более высоких давлениях, при которых возрастает вероятность потерь и вторичных токов при перезарядке частиц [20]. Энергиях пучка в таких источниках не превышают 200 кэВ в силу ограничения по нейтрализации, в связи с этими ограничениями используют не более трех ступеней. История создания и применения двухступенчатых систем ускорения частиц началась с потребности к ионным источникам с более высокими энергиями извлекаемого пучка, в сравнении с уже существующими источниками с применением одноступенчатой СУ. Например, данные из работ [54, 82, 83, 91, 96, 98] свидетельствуют о максимально достижимых значениях энергий ионного пучка порядка ≤ 40 кэВ при реализации извлечения и ускорения в одноступенчатой СУ и постоянном извлекаемом токе пучка. Стоит отметить, что СУ ИД и технологических источников построены на одинаковом физическом принципе электростатического ускорения, однако конструктивно очень сильно отличаются. Например, толщины электродов могут достигать 10 мм [57] и имеют жидкостное охлаждение. Такие энергии пучка в одноступенчатой СУ ИД организовать невозможно. Для определения эффективных

геометрических параметров четырёхэлектродной СУ необходимо ввести следующие величины.

Извлекающий первеанс является качественной характеристикой работы СУ и определяется следующим соотношением:

$$P = \frac{I_{\Pi}}{\Delta U_{\text{изв}}^{3/2}}, \quad (1.2)$$

где $\Delta U_{\text{изв}} = U_1 - U_2$ – разница потенциалов между эмиссионным и извлекающим электродами, В; I_{Π} – ток ионного пучка, А.

Общий первеанс системы ускорения, состоящей из двух и более электродов учитывает индивидуальный эффект каждого межэлектродного промежутка определяется как:

$$P_c = \frac{I}{(U_{\text{изв}} + U_{\text{уск}} + U_{\text{торм}})^{3/2}}, \quad (1.3)$$

где $\Delta U_{\text{уск}} = U_2 - U_3$ – разница потенциалов между извлекающим и ускоряющим электродами, В; $\Delta U_{\text{торм}}$ – разница потенциалов между ускоряющим и замедляющим электродами, который находится под потенциалом корпуса системы.

Нормированный первеанс P/P_0 определяет расходимость системы ускорения ионного пучка в сравнении с первеансом Чайлда-Ленгмюра для двухмерного диода, ограниченного объемным зарядом:

$$P_0 = \frac{4}{9} \pi \varepsilon_0 S^2 \sqrt{\left(\frac{2e}{M_{\text{PT}}}\right)}, \quad (1.4)$$

Введем понятие пропускной способности, как отношение радиуса отверстия в ЭЭ к расстоянию в первом межэлектродном зазоре:

$$S = \frac{r_1}{z_1}, \quad (1.5)$$

где r_1 – радиус отверстия в ЭЭ, z_1 – первый межэлектродный зазор. Обычно параметр $S \geq 1,3$ применительно к ИД, то есть диаметр отверстия всегда больше, чем межэлектродный зазор.

Источнику ионов в работе авторов [96, 98] имел следующие параметры ионной оптики: $r_1 = 1,9$ мм, $z_1 = 4,7$ мм, $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = 2$ мм. Принципиальная схема четырёхэлектродной СУ представлена на рисунке 1.11. Потенциалы на электродах U_1, U_2, U_3, U_4 , в дальнейшем применительно к системам ускорения двигателей будут обозначаться $U_{эз}, U_{из}, U_{уз}, U_{зэ}$ соответственно.

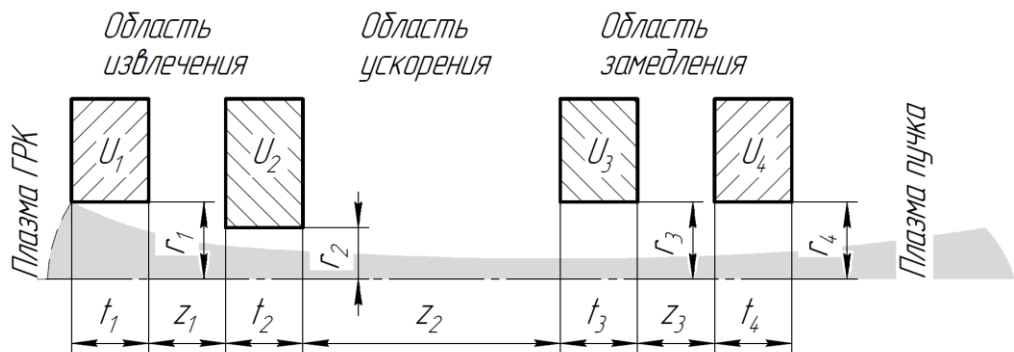


Рисунок 1.11 – Схема четырёхэлектродной двухступенчатой СУ

Введем понятие степени ускорения как отношение ускоряющей разности потенциалов $\Delta U_{\text{уск}}$ к извлекающей разности потенциалов $\Delta U_{\text{изв}}$:

$$\Gamma = \frac{\Delta U_{\text{уск}}}{\Delta U_{\text{изв}}}, \quad (1.6)$$

Введем понятие отношения межэлектродных зазоров в ускоряющей области к извлекающей:

$$f = \frac{z_2}{z_1}, \quad (1.7)$$

где z_1 – межэлектродный зазор между ЭЭ и ИЭ; z_2 – межэлектродный зазор между ИЭ и УЭ, мм.

В существующих ИД с трехэлектродными СУ реализованы предельные разницы потенциалов 4-6 кВ. Стабильная работа ИД, разработанного в НИИ ПМЭ МАИ, была продемонстрирована в работе [31, 77, 78, 79] при ускоряющем напряжении 4 кВ. Так же расчетным путем были продемонстрированы малые углы расходимости, порядка 6° при использовании профилированных электродов Пирсовской геометрии [41, 43, 77], то есть с отверстиями трапецеидального сечения. Есть основание утверждать, что четырехэлектродная СУ будет востребована при ускоряющих напряжениях $\Delta U_{\text{уск}} \geq 4$ кВ [1, 3], в связи с превышением пробойных свойств материалов электродов и необходимости увеличивать межэлектродный зазор. Параметр Γ будет принимать значения $\Gamma \geq 1$, то есть разница потенциалов во втором межэлектродном зазоре будет больше или равна разнице потенциалов в первом межэлектродном зазоре. Плотности тока в таких системах [97] достигают 3-4 кА/м², в то время как в ИД лежат в диапазоне 50-100 А/м². Поэтому в инжекторах частиц параметр S варьируется от 0,4-1,4, а параметр Γ от 1-8, чтобы обеспечить наилучшую фокусировку ИП и минимальный полугол расходимости. Проведено достаточно много исследований устанавливающих взаимосвязь этих параметров, так на рисунке 1.12 представлены расчетные зависимости полуугла расходимости от приведенной плотности плазмы при разных значениях Γ и S . Для удобства восприятия зависимости с параметром $S=1,5$ выделены полимодальной аппроксимацией.

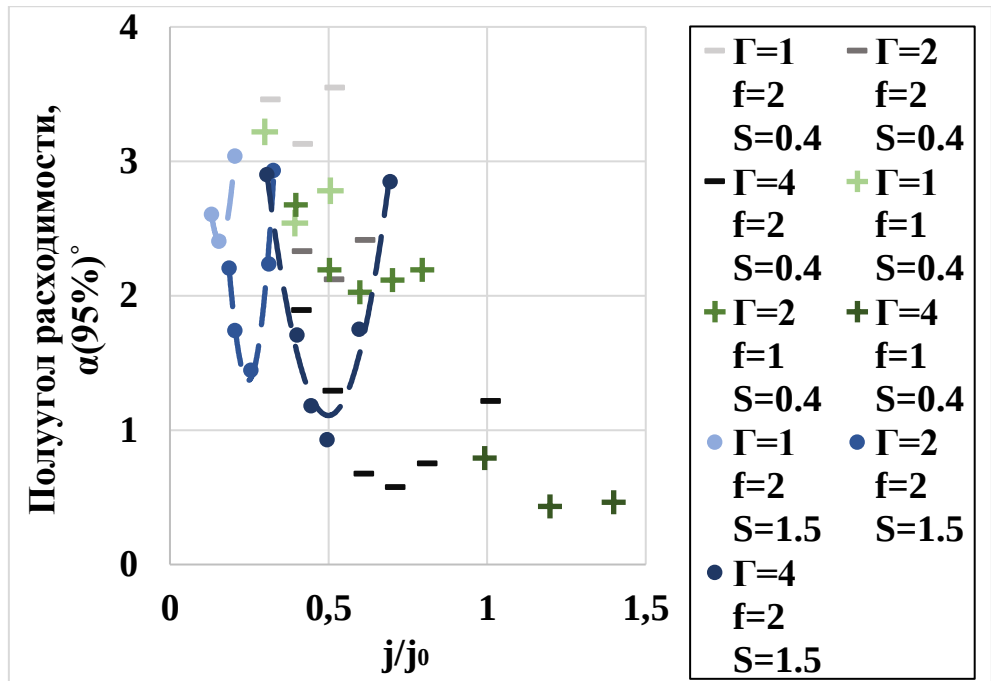


Рисунок 1.12 – Зависимость полуугла расходимости от приведенной плотности тока [98]

По зависимостям хорошо прослеживается тенденция к лучшей фокусировке ИП при увеличении Γ , а также смещение в область высоких j/j_0 при уменьшении S . При одинаковых Γ полуугол расходимости меньше при больших S . Зависимость полуугла расходимости имеет более острый экстремум при больших S . На рисунке 1.13 представлена экспериментальная зависимость полуугла расходимости от параметра Γ (отношения ускоряющей разности потенциалов к извлекающей), при фиксированном значении извлекающей разности потенциалов $\Delta U_{\text{изв}} = 10$ кэВ и при $S=0,4$.

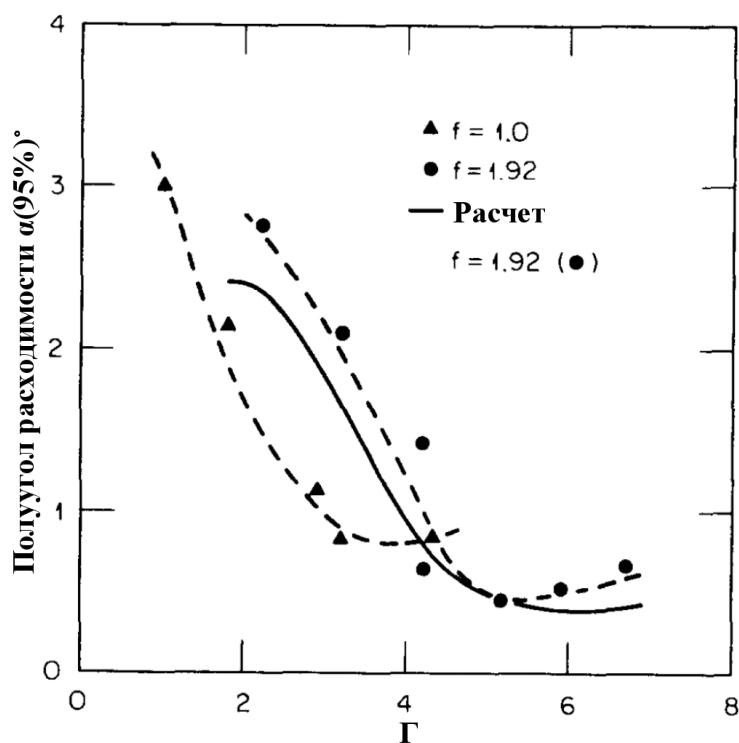


Рисунок 1.13 – Экспериментальная зависимость полуугла расходимости от отношения ускоряющей разности потенциалов к извлекающей [96]

Видно, что при увеличении Γ и f , уменьшается полуугол расходимости пучка. При увеличении ускоряющей разности потенциалов и фиксированной извлекающей разности потенциалов, требуется увеличение параметра f (отношение второго межэлектродного зазора к первому). Используя выведенные для высокоэнергичных источников ионов соотношения геометрии СУ, появилась тенденция интеграции таких СУ в ИД. В данной работе на основе расчётно – экспериментальных исследований будут определены оптимальные значения указанных параметров применительно к ИД.

На рисунке 1.14 представлен график с зависимостью угла расходимости ионного пучка $\alpha(95\%)^\circ$ от нормированного извлекающего первеанса для разных значений Γ и фиксированного значения $f=1,7$, т.е. межэлектродный зазор z_2 между ИЭ и УЭ в данном эксперименте составлял $z_2 = 8$ мм. Можно наблюдать, что

угловая расходимость пучка становится менее чувствительна к значению первеанса в области повышенных первеансов [96].

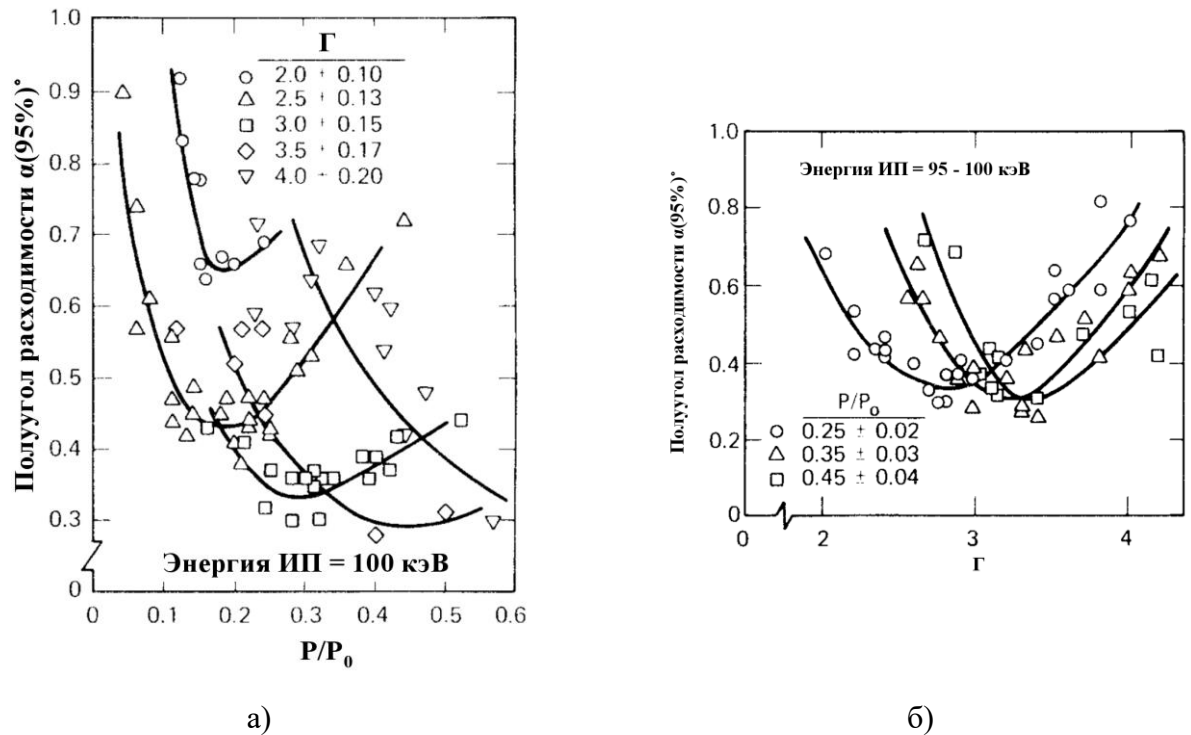


Рисунок 1.14 – Зависимость полуугла расходимости от приведенного первеанса и отношения ускоряющей разности и от параметра Γ

а) от приведенного первеанса пучка, б) от параметра Γ

Оптимальные значения фокусировки для нормированных переносов $0,2 < P/P_0 < 0,5$ соответствуют значениям Γ от 2 до 4. Исходя из имеющихся данных не трудно оценить напряженности электрического поля для извлекающей и ускоряющей областей, данные представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Извлекающие разности потенциалов и напряженности электрического поля в первом и втором межэлектродных зазорах

Γ	$\Delta U_{\text{изв}}$	$\Delta U_{\text{изв}}$	E_1 , кВ/мм	E_2 , кВ/мм
2	33,3	66,6	7,0	8,3
3	25,0	75,0	5,3	9,3
4	20,0	80,0	4,2	10,0

Исходя из данных таблицы видно, что при повышении Γ можно снижать напряженность поля в извлекающем межэлектродном зазоре. В летных ИД ускоряющая разность потенциалов не превышает 1,2 кВ, в экспериментальных образцах достигает 6 кВ (макетные СУ для NEXIS) при этом напряжённость электрического поля в межэлектродном зазоре не превышает 2 кВ. Первеанс Чайлда-Ленгмюра для СУ применяемых в ИД обычно равен $P_0 = 2,95 \times 10^{-8} \text{ А/В}^{3/2}$. Для оценки применения четырехэлектродных СУ в ИД нужно определить область приведенных первеансов для существующих ИД.

В рамках программ по исследованию дальнего космоса ведутся разработки ЭРД, которые способны отвечать требованиям для таких миссий. Двигатель NEXIS разработан как совершенствование серии NSTAR [47, 58, 59, 85]. Такие двигатели разрабатываются для применения на КА с ядерными энергоустановками для миссий к Юпитеру JIMO [52], с требуемым ресурсом порядка 100.000 ч. Мощность выделяемая на ЭРДУ в таких миссиях составляет 25-50 кВт с общей мощностью КА порядка 100 кВт, требование к удельному импульсу 6000-9000 с. и выше. Для обеспечения требуемых характеристик в качестве материала электродов СУ подходят только УУКМ, заявленная пробойная прочность которых составляет 2,3 кВ/мм [55]. Геометрические размеры СУ двигателя NEXIS в 3,5 раза больше чем в двигателе NSTAR. Толщина УЭ в 5,4 раза больше. Экспериментальные исследования проводились на уменьшенном макете СУ от NEXIS, геометрические размеры которой представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Геометрические размеры СУ NEXIS [44, 60]

Параметр:	NSTAR	NEXIS
Диаметр отверстия ЭЭ, мм	1,91	6,85
Диаметр отверстия УЭ, мм	1,14	4,08
Межэлектродный зазор, мм	0,66	2,36
Толщина ЭЭ, мм	0,38	1,52
Толщина УЭ, мм	0,51	2,75
Прозрачность ЭЭ	0,67	-
Прозрачность УЭ	0,24	-

На рисунках 1.15, 1.16 приведены экспериментальные данные по исследованию диапазона работы двигателя NEXIS. Оптимальная область работы СУ лежит в диапазоне извлекаемого ионного тока из единичной ячейки СУ от 0,4 до 1,4 мА. Область NSTAR соответственно будет лежать немного левее в силу меньших диаметров отверстий и соответственно меньшей пропускной способности СУ. Проектные параметры тока с одной ячейки составляют от 0,4 до 1,4 мА с одного отверстия.

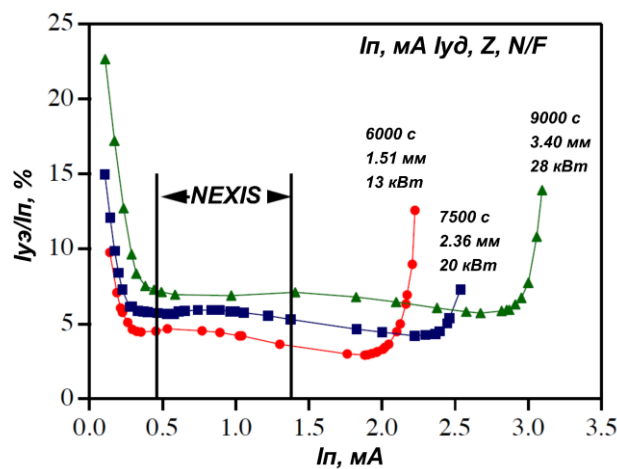


Рисунок 1.15 – Схема областей работы системы ускорения NEXIS

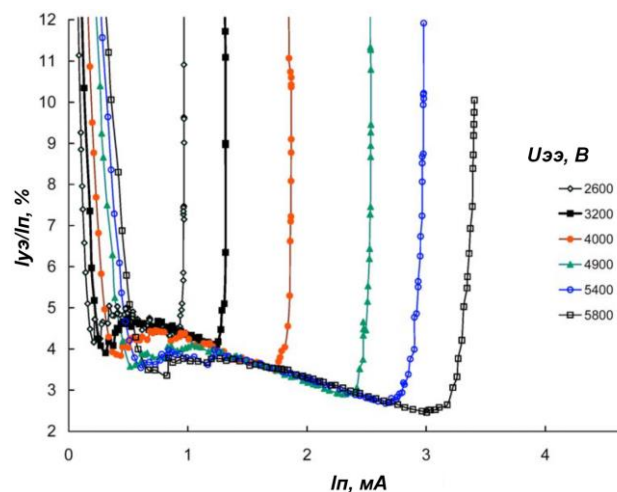


Рисунок 1.16 – Диапазон работы NEXIS с энергией ионного пучка от 2,6 до 5,8 кэВ

[76154]

Таким образом опираясь на расчетные и экспериментальные данные, определим области приведенных первеансов для существующих СУ для усредненных S и E , зависимость представлена на рисунке 1.17.

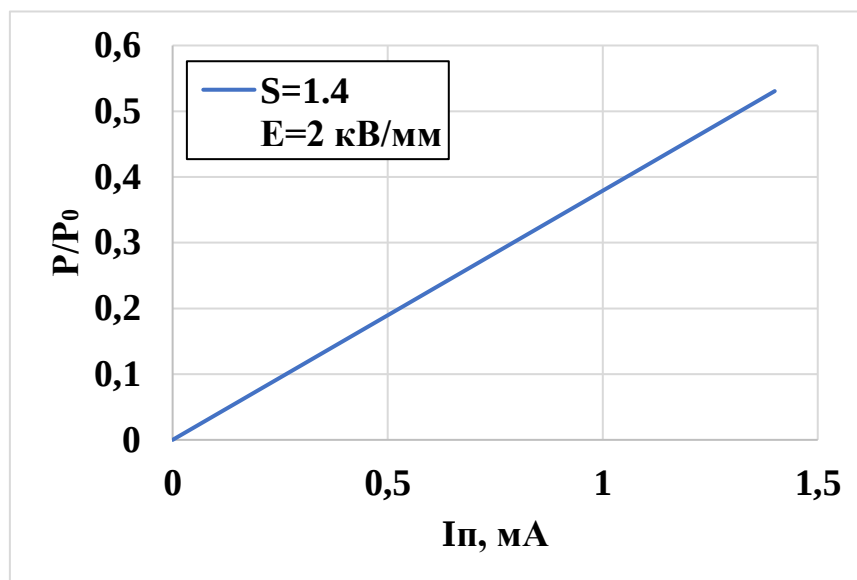


Рисунок 1.17 – Зависимость приведенного первеанса от тока пучка единичной апертуры для ИД

Приведенный первеанс ячейки СУ ИД попадает в область работы ячейки инжектора высокоэнергичных частиц. Таким образом можно утверждать, что приведенными соотношениями геометрических параметров четырехэлектродных СУ можно пользоваться при проектировании таких СУ для ИД. При проектировании СУ особый интерес представляет взаимосвязь между параметрами Γ/f и Γ обеспечивающая минимальную расходимость в диапазоне режимов проектируемой СУ. На рисунке 1.18 продемонстрирована взаимосвязь между извлекающим первеансом и отношением Γ/f , в диапазоне максимальной фокусировки при энергии пучка 100 кэВ.

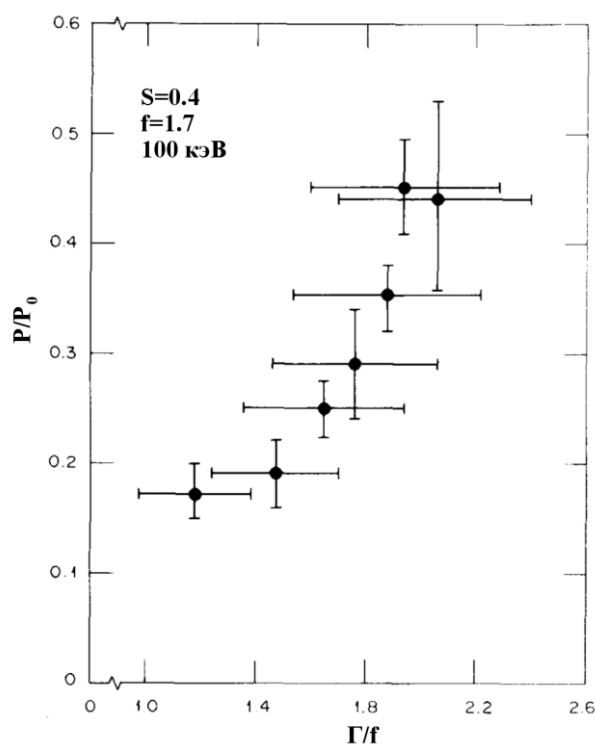


Рисунок 1.18 – Зависимость приведенного первеанса от отношения Γ/f

$S=0,4$; $f=1,7$; $E_{\text{п}}=95-110$ эВ

Видно, что при увеличении отношения Γ/f наблюдается рост приведенного первеанса, следовательно, и извлекающая способность СУ. Результаты этого исследования показали достаточно хорошую сходимость с расчетными данными, полученными как по модели оптики в линейном приближении, так и при численном моделировании [75]. Схожие результаты были получены энергиях пучка от 60 кэВ до 110 кэВ.

1.3.1 Обзор существующих лабораторных моделей двигателей с четырехэлектродными системами ускорения

В настоящее время прослеживается возрастающая тенденция по применению электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) на борту КА различного назначения. В сегменте КА для исследований дальнего космоса требуются высокие значения суммарных удельных импульсов тяги (УИ) двигательной установки (ДУ) при относительно небольших значениях тяги, что приводит к доминированию

ионных двигателей, обеспечивающих наиболее длительный ресурс при высоком коэффициенте полезного действия и высоких значениях УИ. Миссии Hayabusa 1 и 2 [68], DAWN [59], BepiColombo [60, 71], Deep space 1 [61, 62] были успешно осуществлены с использованием ионных двигателей. Во всех таких двигателях использована традиционная трехэлектродная СУ, то есть реализована «одноступенчатая» схема ускорения ионов рабочего тела. Технология двухступенчатой схемы ускорения ионов в СУ DS4G (Dual Stage 4 Grid Ion Engine) была предложена D.G. Fern [58]. Здесь следует отметить, что многоступенчатая схема ускорения ионов давно реализована в инжекторах легких нейтральных атомов, а именно изотопов водорода и гелия для ввода их в реакторы термоядерного синтеза. Ионы легких элементов ускоряются в четырех- и более электродных СУ до энергий порядка 100 кэВ и после их перезарядки в специальных камерах поступают в виде высокоэнергичных нейтральных атомов в реактор для поддержания реакции. Фактически D.G. Fern предложил применить данную технологию для «тяжелых» ионов, используемых в ионных двигателях. В настоящее время в мире разработки технологии DS4G применительно к ионным двигателям ведутся в Саутгемптонском университете в рамках проекта HiPER (High impulse Propulsion Electric Rocket) с 2008 г., который является фактически дорожной картой будущего использования ЭРД в космических миссиях. Ранее в 2006 г. группой Саутгемптоновского университета была представлена лабораторная модель двигателя с диаметром ионного пучка 5 см, на которой для ксенона были достигнуты рекордные значения УИ почти в 15000 с. и тягой от 2 мН до 3 мН. Плотность тяги составляла от 0,86 до 1,7 мН/см². Потенциал ЭЭ задавался от 10 до 30 кВ. Исследования данной группы впоследствии были включены в проект HiPER [53, 64, 65, 66], продолжающийся в настоящее время. Однако стоит учитывать, что это лабораторная модель – демонстратор технологии, открытых данных по исследованию полноразмерных четырехэлектродных ИД нет, в рамках данной диссертационной работе проведены испытания с полноразмерным двигателем средней мощности с диаметром ИП 150 мм. Фотография лабораторной

модели двигателя с двухступенчатой ионно-оптической системой DS4G представлена на рисунке 1.19 [53].

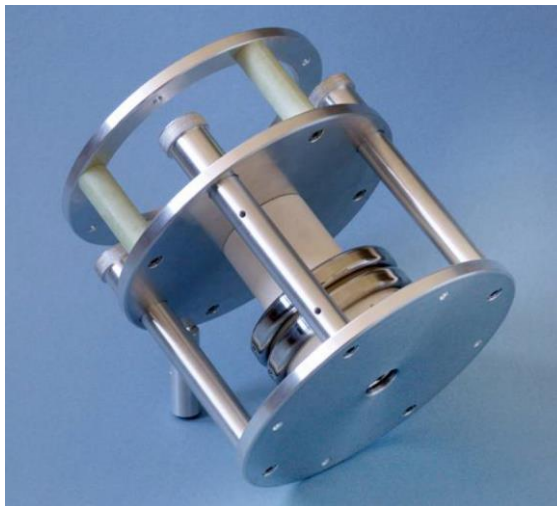


Рисунок 1.19 - Двигатель с двухступенчатой ионно-оптической системой DS4G [53]

На рисунке 1.20 представлена зависимость тока, приходящего на УЭ в результате прямого перехвата и вторичных токов в том числе токов перезарядки от тока ионного пучка для традиционной трехэлектродной СУ и четырехэлектродной СУ двигателя DS4G [46]. Видно, что в левом первеанском пределе ток перехвата традиционной СУ ниже, чем в альтернативной схеме 1,8% и 6,2% соответственно. Однако в области высоких токов по правой границе в области первеанского предела токи перехвата четырехэлектродная СУ значительно ниже и составляют до 3%, в то время как токи УЭ в традиционной СУ достигают 9%.

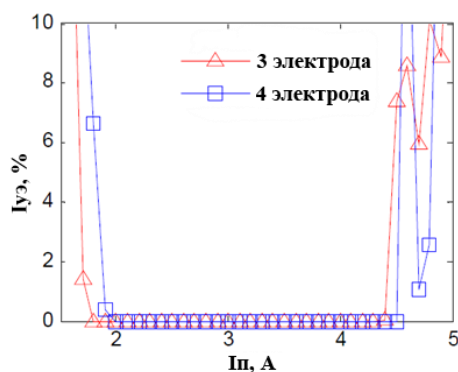


Рисунок 1.20 – Диапазоны работы трех- и четырехэлектродной СУ [45]

Стоит отметить, что данное исследование проводилось при одинаковых напряжениях на обоих СУ. В случае потребности увеличения правой первеанской границы четырехэлектродная СУ может работать при гораздо больших напряжениях, в то время как трехэлектродная СУ ограничена разницей напряжения в 4-6 кВ. Этот факт расчетным путем и экспериментально подтвержден в работах [45, 52]. Левая граница по первеансу обусловлена перефокусировкой ионного пучка, которая возникает при уменьшении плотности плазмы разряда пропорционально уменьшению расхода, тем самым плазменный мениск выгибается в зону плазмы ГРК. Известно, что траектории ионов перпендикулярны касательным к линиям напряженности электрического поля, соответственно при уменьшении радиуса мениска точка фокуса смещается в левую область. Правая первеанская зона ограничена предельным положением мениска, в котором он имеет поверхность приближенную к плоскости. Далее давление плазмы ГРК при увеличении расхода начинает преобладать над электростатическим давлением и плазменный мениск начинает прогибаться в зону плазмы пучка. Это в свою очередь ведет к расфокусировке потока. Стоит отметить, что первеанские пределы обязательно просчитывать для частной геометрии СУ и характеристик двигателя в целом. Четырехэлектродная СУ позволяет задавать границу плазмы оптимальной напряженностью электрического поля в первом зазоре, так как форма мениска зависит от напряженности поля, а не от значения потенциала. Таким образом четырехэлектродная СУ позволяет расширить рабочую первеанскую область, то есть расширить диапазон работы по току перехвата на УЭ.

В Германии ведутся работы по созданию ВЧИД RIT-3,5 с диаметром ионного пучка 3,5 см и с аналогичной ступенчатой схемой ускорения в четырёхэлектродной СУ [91]. Экспериментально был отработан режим с удельным импульсом 3000 - 5000 с. и тягой до 2 мН. Была показана возможность регулирования тяги в диапазоне от 50 мкН до 2 мН с ценой тяги порядка 40 Вт/мН, что явно демонстрирует преимущество над классической трехэлектродной схемой СУ, у

которой при дросселировании номинального режима по тяге происходит существенное ухудшение энергетического КПД. Фотография лабораторной модели RIT-3,5 представлена на рисунке 1.21 [14, 91].

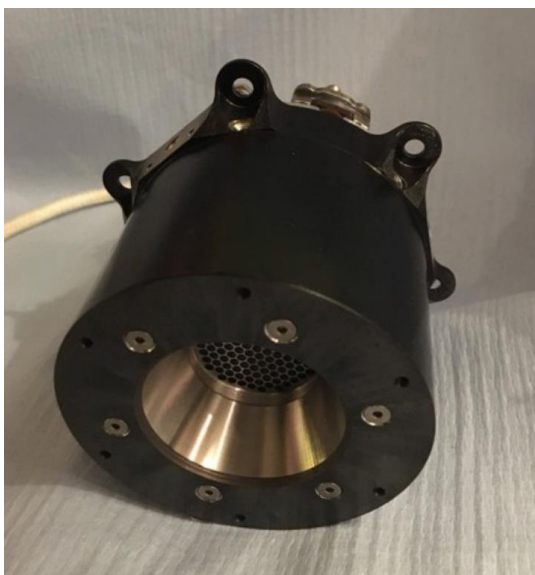


Рисунок 1.21 - RIT-3,5 с изменяемым удельным импульсом тяги [91]

Практическое применение таких двигательных систем обусловлено следующими фактами. Современные наработки в области ионных двигатели имеют ограничение удельного импульса на уровне примерно 7000 с. [91] при использовании ксенона в трёхэлектродных системах ускорения. Это не представляет проблемы для миссий во внутренней части Солнечной системы или к объектам типа Юпитера, поскольку типичные оптимальные значения для таких миссий ниже этого предела. Типичные значения удельных импульсов, при разумной длительности этих миссий, составляют 2.000-6.000 с. для полетов туда и обратно на Марс, 8.000-10.000 с. для зондов к спутникам Юпитера. Перспектива таких миссий предполагает использовании современных и перспективных технологий в области энергоустановок. Однако очевидно, что для миссий во внешнюю часть Солнечной системы и за её пределы, таких как полеты к поясу Койпера, к объектам за орбитой Плутона, к облаку Оорта и межзвездным миссиям на расстоянии 100–250 а.е., потребуется удельный импульс выше 10,000 с. [58] Это

необходимо, чтобы доля топлива не доминировала в массе аппарата при высоких значениях ΔV (25–50 км/с). Поэтому четырехэлектродная концепция двигателя, успешно протестированная в экспериментальной программе, по расчетам подходит для таких классов миссий. Потенциальные преимущества высокоэффективных двигателей включают сокращение времени полета, увеличение научной и коммуникационной полезной нагрузки и очень слабые требования к запуску с Земли. Предварительные технологические оценки и оптимизация миссий показывают, что значительные преимущества можно получить при использовании четырехэлектродных систем ускорения в межзвёздных миссиях на расстояния 200 а.е., и к другим миссиям в внешнюю часть Солнечной системы. Например, оптимальный проект включал космический аппарат массой 8.000 кг, полезную нагрузку 400 кг, 65 кВт ядерный реактор и двигатель типа DS4G с удельным импульсом 10.200 с. и тягой 0,9 Н. Предполагалось использовать один двигатель диаметром 25 см с потенциалом пучка 13 кВ. Сравнение проводилось с одно тонным, кило ватным традиционным двигателем с трехэлектродной системой ускорения и энергоустановкой типа РИТЭГ. Расчетным путем показано сокращение времени полета с 30 до 23 лет, увеличение полезной нагрузки, меньшую потребность в энергии запуска СЗ которая составила $16 \text{ км}^2/\text{с}^2$ для ракетополетителя Ариана 5, и более широкие временные окна запуска, например, для миссий к Юпитеру. Недостаток – это высокая стоимость и сложность ядерной энергетической системы. Из-за высокого отношения тяги к мощности при таком удельном импульсе около 90 кВт/Н при 15.000 с. очевидно, что четырехэлектродная система ускорения применима только с источниками энергии с низкой удельной массой. Например, РИТЭГи с удельной массой более 200 кг/кВт слишком тяжелы. Альтернативой может стать реактор с удельной мощностью порядка 25 кг/кВт с машинными преобразователями энергии, например, двигатели Брайтона с высокой эффективностью, которые по оценкам способны работать более 10 лет. Известно, что эти технологии находятся на очень ранней стадии развития. Ограничения плотности мощности и тяги также серьезно влияют на

возможность применения таких двигателей для пилотируемых и тяжелых миссий. Для достижения необходимой тяги уровня одного ньютона приходится увеличивать диаметр электродов, а следовательно, массу и диаметр двигателя. Адекватным максимумом увеличения габарита двигателя является типоразмер 50 см. в силу таких факторов как сильные вибрационные нагрузки и ограничения по термическим циклам работы электродов такого габарита. Современные трехэлектродные ионные двигатели работают в диапазоне 1-40 кВт и тяге 10- 1000 мН, абсолютный предел - 40 кВт. Поэтому для миссий с потреблением 100 кВт-1 МВт приходится собирать кластеры из множества двигателей и блоков обработки энергии, что увеличивает массу и объем системы. Например, для пилотируемой миссии на Марс с использованием электрической тяги, потребуется 8-15 МВт энергии и 90-180 Н тяги. При ограничении по мощности в 50 кВт на двигатель, потребуется 160-320 таких двигателей по 50 см, что требует сложной сборки на орбите. Даже использование распределенных сеток и единой зоны разряда требует большого по размеру двигателя и не уменьшает массу. Поэтому исследуются альтернативные технологии, способные обеспечить высокую мощность и тягу в компактном исполнении, например, магнитоплазодинамические (МПД) и геликоновые плазменные двигатели VASIMR или HDLT [56]. Высокая мощность и плотность тяги и удельного импульса, достигаемые в четырехэлектродных СУ благодаря высокому потенциалу пучка (15-30 кВ), делают её пригодной для миссий с высокой мощностью и большим ΔV - таких как многоразовые тягачи для доставки и возвращения грузов на Марс с мощностью 100-500 кВт, получаемой от солнечных панелей, межзвездных миссий, полетов к объектам пояса Койпера и облака Оорта с теми же легкими солнечными панелями, а также пилотируемых миссий с ядерным источником на уровне мегаватт [47, 58].

Ряд вышеперечисленных исследований, проведенные в мировом сообществе, дает основание на проведение расчестно исследовательской и экспериментальной

работы по исследованию и изучение четырехэлектродных систем ускорения применительно к высокочастотным ионным двигателям, которые в России не проводились до настоящего времени.

1.3.2 Оценки ресурса ионных двигателей с четырёхэлектродной системой ускорения

Критическим элементом конструкции ИД и технологических источников ионов, с точки зрения их ресурса, является УЭ, распыляемый под воздействием потока ионов перезарядки [6]. Особенно критично ограничение по ресурсу для ИД, так как требования по наработке для современных ИД превышают 20000 ч. За более чем 70-летнюю историю развития технологии ИД, за рубежом выполнен большой объем теоретических, расчетных и экспериментальных исследований, посвященных проблеме ресурса ИД. Строго ресурс ИД может быть определен на основании полноразмерных и дорогостоящих ресурсных испытаний, длительность которых два года и более.

В классической трехэлектродной СУ, реализующей схему «ускорение-торможение», УЭ находится под отрицательным потенциалом. Извлекаемый пучок ионов формирует объемный заряд ионов, ограничивающий плотность тока эмиссии с границы плазменного эмиттера. За границей 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 положителен по отношению к ЗЭ (пучок ионов является потенциальной ловушкой для электронов). В ионных двигателях чаще используют двухэлектродную систему ускорения с двумя перфорированными электродами и замедляющим электродом выполненным в виде кольца. В четырёхэлектродной систему ускорения так же можно использовать кольцевой выходной электрод. Для выполнения сравнительного

анализа таких систем ускорения выполнено математическое моделирование вторичных процессов протекающий в элементарной ячейке.

В объеме пучка ионов и в зоне нейтрализации образуются медленные ионы, как результат резонансной перезарядки при взаимодействии быстрых ионов Xe^+ пучка с медленными атомами Xe^0 истекающего из источника рабочего газа:



Сечение этого процесса зависит от скорости ионов. Ионы перезарядки образуются также в объеме пучка ионов в пространстве между границей плазмы и УЭ. Часть этих ионов также выпадает на УЭ. Целью моделирования потока ионов перезарядки из обеих областей является получение распределения ионов по поверхности УЭ, по энергиям и углам их падения на УЭ.

Оценим, для начала, поток ионов перезарядки из объема пучка между ЭЭ и УЭ при известной величине межэлектродного зазора l . Вероятность перезарядки может быть оценена по формуле:

$$P_{\Pi} \approx \sigma_{i0} n_0 l \quad (1.9)$$

На рисунке 1.22 представлена зависимость сечения перезарядки от энергии иона ксенона.

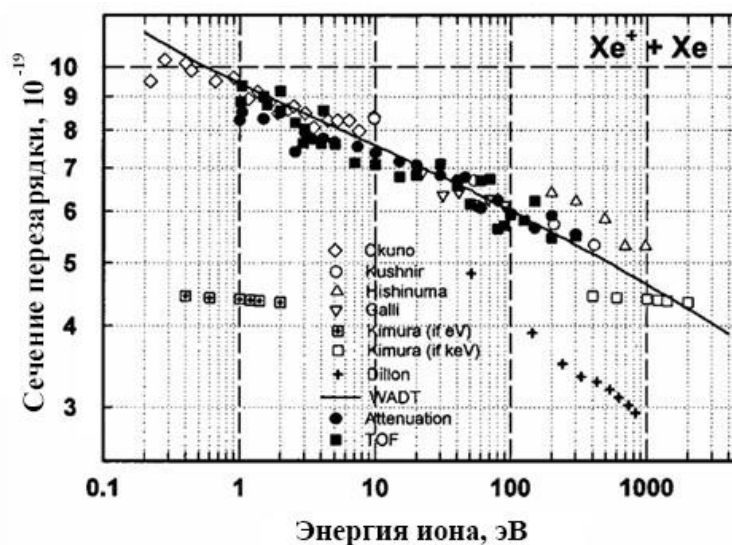


Рисунок 1.22 – Сечение взаимодействия от энергии [36]

В трехэлектродной СУ, работающей на ксеноне при энергии ионного пучка от 1 кэВ до 4 кэВ значение сечения перезарядки будет составлять от $\sigma_{i0} \approx 3,2 - 3,95 \cdot 10^{19} \text{ м}^2$. То есть родившиеся в межэлектродном зазоре ионы в предельном случае будут приобретать энергию порядка 4 кВ. В четырехэлектродной системе ускорения, работающей при такой же энергии ионного пучка, ионы перезарядки могут приобрести энергию до 2 кэВ, соответствующее этой величине сечение перезарядки составляет $\sigma_{i0} \approx 3,46 \cdot 10^{19} \text{ м}^2$. В силу двухступенчатой системы ускорения, в которой в первом и втором межэлектродных зазорах предельное падение потенциала составляет 2 кэВ. При этом для средней концентрации атомов в межэлектродном промежутке $n_0 \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и $l = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ вероятность рождения иона перезарядки в трехэлектродной системе ускорения составит $P_{П1} \approx 7,9 \cdot 10^{-2}$, а в четырехэлектродной $P_{П2} \approx 6,9 \cdot 10^{-2}$. Таким образом можно сделать вывод о том, что четырехэлектродная СУ имеет преимущество с точки зрения ресурса ускоряющего электрода. Вместе с тем, из экспериментов известно, что ток в цепи УЭ составляет от 1 до 3% от тока ионов пучка [3, 9]. Оценочный расчет проводился авторами работы [45] для двигателя DS3G со следующими расчетными

характеристиками $U_{ээ}=8$ кВ, $I_{уд}=10.000$ с и $P=400$ мН, при извлекающей разности потенциалов 2 кВ. Сравнение проводилось с трехэлектродным двигателем с идентичной геометрией первых двух электродов и такой же разность потенциалов. Авторы провели сравнение трех- и четырехэлектродной СУ при одинаковом токе ИП [53], извлекаемом из ячейки и равным 0,8 мА. Результаты показаны на рисунке 1.23.

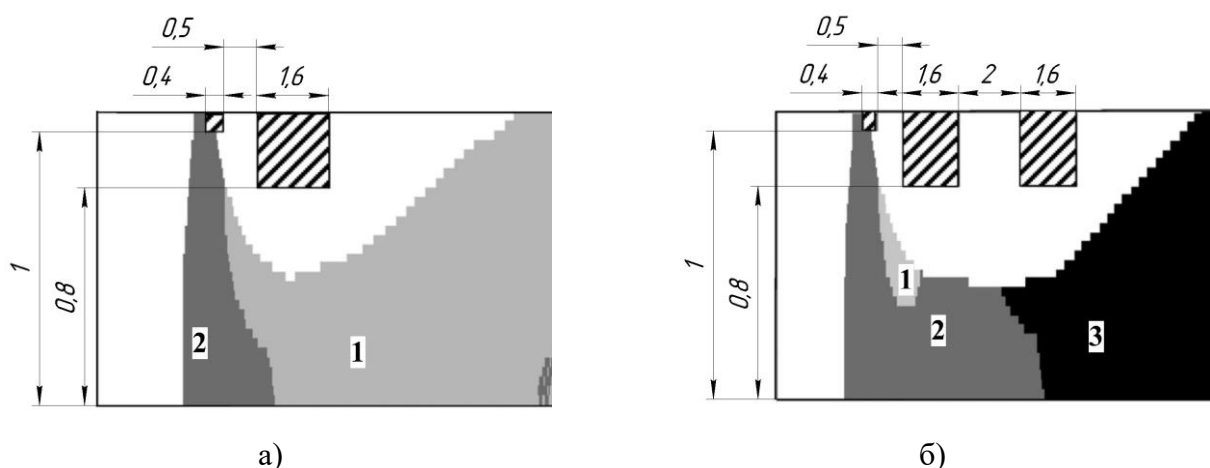


Рисунок 1.23 – Результаты расчета вторичного ионообразования в результате резонансной перезарядки [94]

а) трехэлектродная СУ с кольцевым ЗЭ; б) четырехэлектродная СУ.

1 – зона образования ионов перезарядки, воздействующих на второй электрод, 2 – зона образования ионов перезарядки, которые не воздействуют на электроды, 3 – зона образования ионов перезарядки, которые воздействуют на третий электрод

В результате расчётов эрозии по истечению 36 тыс. часов работы двигателя, используя программный продукт [85], получены следующие результаты. Глубина впадин в результате эрозии УЭ составила 0,1 мм, высота выступов составила 0,25 мм. Результаты расчетов хорошо соотносится с результатами испытаний NSTAR. Результаты расчетов показаны на рисунке 1.24.

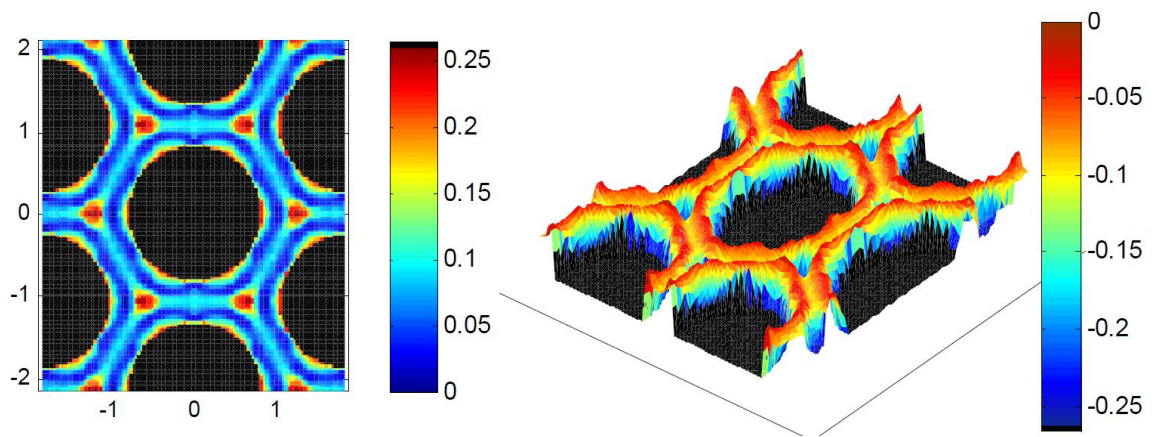


Рисунок 1.24 – Профиль эрозии УЭ двигателя DS3G в результате наработки 36 тыс. часов

На рисунке 1.25 показана зависимость, полученная в результате математического моделирования эрозии авторами работы [48], потенциала на центральной линии электрода по времени наработки двигателя DS3G с четырёхэлектродной СУ и традиционного ИД. Увеличение времени наработки DS3G до параметрического отказа составило 20%.

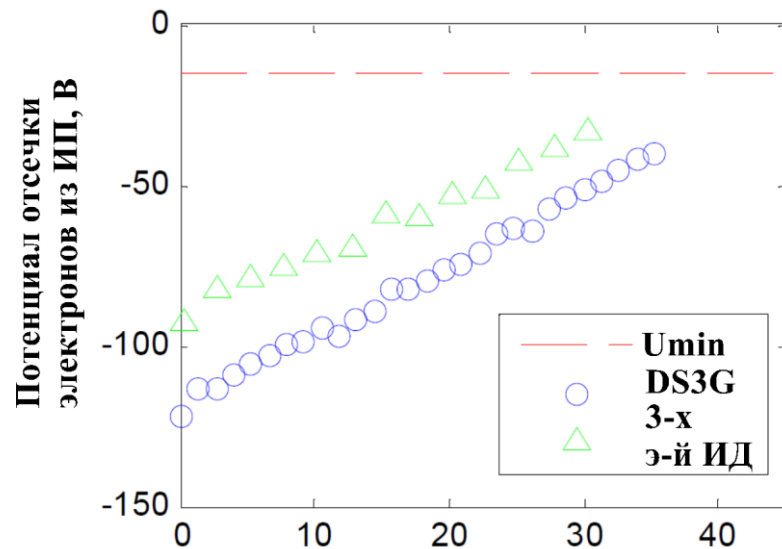


Рисунок 1.25 – Зависимость потенциала в отверстии УЭ от наработки двигателя

1.4 Заключение по Главе 1

В результате проведённого обзора можно заключить, что четырёхэлектродные системы ускорения достаточно подробно исследованы применительно к наземным промышленным источникам ионов с высокоэнергетическими пучками, однако в отношении ионных двигателей объём экспериментальных данных остаётся ограниченным. Экспериментальные исследования полноразмерных ИД с четырёхэлектродными СУ не проводились. В связи с этим данное направление требует дальнейшего изучения и проведения научно-исследовательских работ. Обоснована перспектива применения четырехэлектродных систем ускорения в составе ИД. Выявлены ограничения трехэлектродных систем ускорения. Доказана возможность повышения удельного импульса тяги, плотности тяги и ресурса ионного двигателя при использовании четырёхэлектродной СУ, что невозможно достичь при использовании существующих трехэлектродных СУ в составе ИД.

Глава 2 Экспериментальное оборудование

2.1 Описание экспериментальных стендов

В рамках данной работы было проведено две экспериментальные работы, на базе стендов МАИ «2ИУ-3В» и «2ИУ-4В».

2.1.1 Экспериментальное оборудование стенда 2ИУ-3В

Экспериментальные исследования в рамках эксперимента по определению вторичных токов, протекающих в системе ускорения производились на вакуумном стенде «2ИУ-3В» МАИ, общий вид которого представлен на рисунке 2.1.

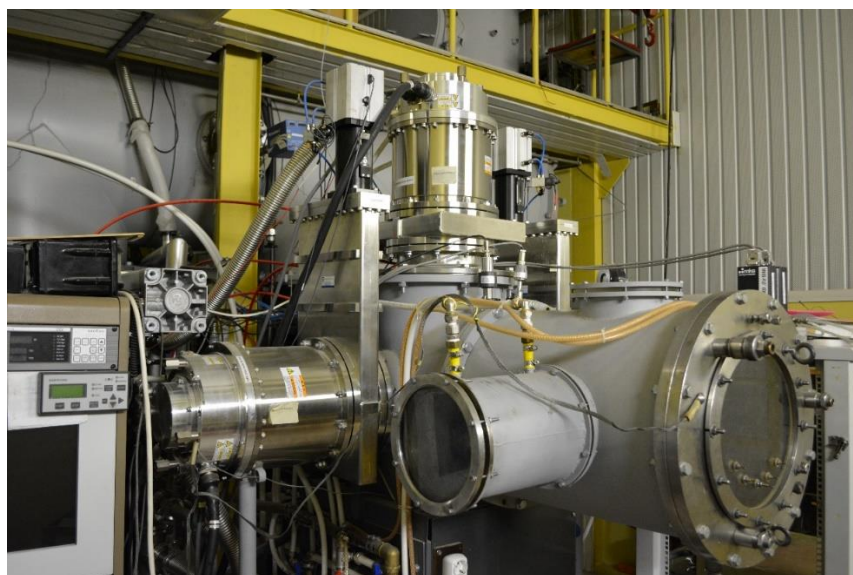


Рисунок 2.1 - Фотография установки «2ИУ-3В».

В состав стенда входят следующие основные элементы: цилиндрическая вакуумная камера объемом $0,4 \text{ м}^3$; система вакуумной откачки; система подачи рабочего тела; система электропитания лабораторных моделей ВЧИД. Выполненная из нержавеющей стали вакуумная камера конструктивно разделена на две секции, одна из которых предназначена для подключения форвакуумной магистрали, турбомолекулярных насосов и датчиков давления, а другая для установки исследуемых двигателей и подключения дополнительного

экспериментального оборудования. Кроме того, камера оснащена специальной водоохлаждаемой мишенью из алюминиевого сплава, принимающей, рассеивающей и полностью нейтрализующей приходящий на неё ионный пучок. Особенный рельеф мишени обеспечивает снижение обратного потока вторичных частиц во время работы исследуемого двигателя [26, 27].

2.1.1.1 Система вакуумирования испытательного стенда 2ИУ-3В

Система откачки стенда «2ИУ-3В» включает в себя двухступенчатый безмасляный форвакуумный насос и четыре турбомолекулярных насоса (ТМН) с электромагнитным подвесом ротора. После создания в вакуумной камере предварительного разрежения поддерживается необходимое давление в форвакуумной магистрали для работы турбомолекулярных насосов. Контроль давления на вакуумном стенде осуществляется двумя типами вакуумметров: теплоэлектрическими, обеспечивающими измерение давления до 10^{-3} мм рт. ст., и вакуумметрами ионизационного типа, работающими в диапазоне давлений 10^{-2} - 10^{-8} мм рт. ст.. В форвакуумной магистрали давление контролируется одним теплоэлектрическим вакуумметром, в то время как в вакуумной камере, помимо теплоэлектрического, установлены два ионизационных датчика давления. Данные со всех вакуумметров снимаются с двух контроллеров. Четыре ТМН обеспечивают суммарную скорость откачки по ксенону около 8400 л/с, что позволяет при исследовании ВЧИД мощностью до 1 кВт работать на динамическом вакууме свыше $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. [22, 23]. Схема вакуумной системы стенда приведена на рисунке 2.2, а расшифровка обозначений указана в таблице 2.1.

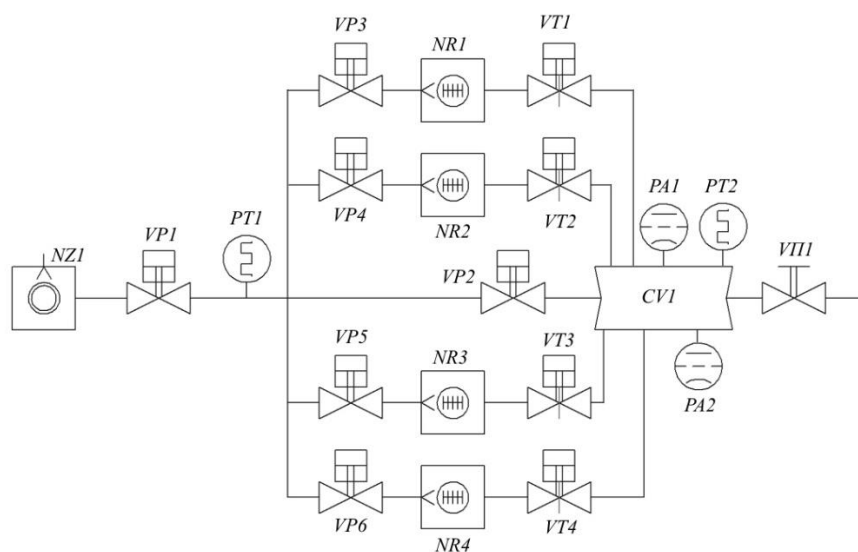


Рисунок 2.2 — Схема вакуумной системы стенда 2ИУ-3В [19]

Таблица 2.1 – Обозначение элементов на схеме вакуумной системы.

Обозначение на схеме	Наименование
CV1	Вакуумная камера
NR1-NR4	Турбомолекулярный насос
NZ1	Двухступенчатый форвакуумный насос
PA1, PA2	Ионизационный вакуумметр
PT1, PT2	Теплоэлектрический вакуумметр
VP1-VP6	Клапан с пневмоприводом
VT1-VT4	Тарельчатый клапан с пневмоприводом
VPI	Клапан с ручным приводом

2.1.1.2 Система подачи рабочего тела 2ИУ-3В

Общая схема системы подачи РТ для исследуемых лабораторных моделей ионных двигателей представлена на рисунке . Она включает в себя: баллон с ксеноном, баллонный редуктор, механический регулятор давления газа РДМ-24 производства ЭЛТОЧПРИБОР, ресивер из нержавеющей стали объёмом 2 л и два параллельно подключённых регулятора-измерителя расхода газа (РРГ) MKS Instruments 1179В с цифровым блоком управления и индикации MKS PR4000В.

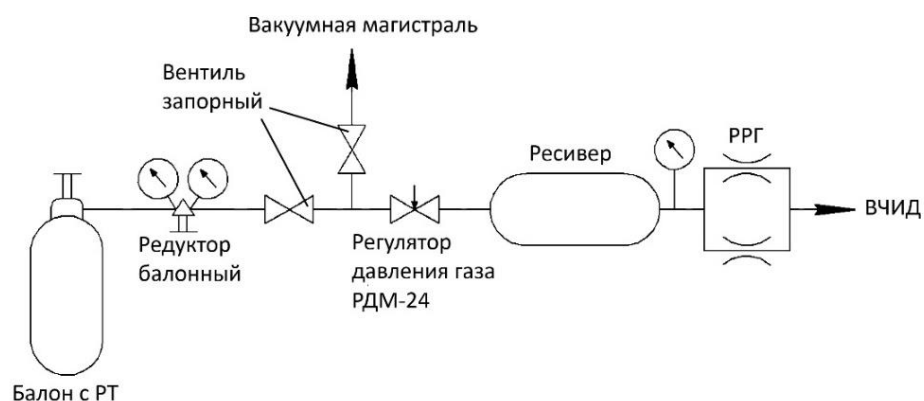


Рисунок 2.3 — Схема системы подачи РТ

Такая система подачи РТ позволяет работать как с одним РРГ в диапазоне расхода по ксенону от 0,1 до 14 ст. см³/мин, так и с двумя, обеспечивая требуемый в некоторых случаях расход ~ 20 ст. см³/мин. Точность регулировки каждого РРГ определяется суммой величин 0,5 % от текущего показания расхода РТ и 0,2 % от максимально возможного значения (с учётом GCF (Gas Correction Factor)). Таким образом погрешность по величине расхода РТ может составлять $\pm 0,03$ - 0,1 ст. см³/мин [11, 22, 23].

2.1.1.3 Система электропитания 2ИУ-3В

Система электропитания (СЭП) КЛАН-53-4.3 включает шесть основных источников электропитания: блок полового катода (БПК) - регулируемый источник постоянного напряжения (600 В, 1 А); блок разряда (БПР) - регулируемый источник постоянного напряжения (75 В, 2 А); блок ионного пучка (БИП) - регулируемый источник постоянного положительного напряжения (1500 В, 50 мА); блок ускоряющего электрода (БУЭ) - регулируемый источник постоянного отрицательного напряжения (1000 В, 50 мА); блок накала нейтрализатора (БНН) - регулируемый источник выпрямленного напряжения (7 В, 18 А), блок смещения нейтрализатора (БСН) - нерегулируемый источник постоянного отрицательного напряжения (18 В, 100 мА) [11, 22, 23].

Блоки БПК, БПР - высокопотенциальные, с гальванической развязкой на 2 кВ относительно заземленного корпуса. Блок БНН выполнен с обратной связью по току БСН для стабилизации тока БСН. Питание СЭП осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность - не более 2 кВт. Конструктивно СЭП смонтирована в двух отдельных корпусах 19-дюймового стандарта, высота 3U. В корпусе ПКР размещена разрядная высокопотенциальная часть СЭП, включающая блоки БПР и БПК, в корпусе ВВН высоковольтная часть СЭП, включающая блоки БИП, БУЭ, БНН и БСН. Управление СЭП возможно в режиме ручного управления при помощи встроенных регуляторов, а также в режиме удаленного управления при помощи входных и выходных сигналов 0-10 В. Выходное сопротивление выходных сигналов – до 10 кОм [11, 22, 23].

Для питания ИЭ был дополнительно подключён высоковольтный блок питания с рабочим напряжением до 4000 В, позволяющий работать с извлекаемым током ионного пучка до 0,5 А. Все цепи питания оснащены специальными фильтрами, предотвращающими возникновение ВЧ-наводок. Кроме того, БПЭЭ и БПУЭ позволяли выводить на внешние цифровые измерители, в виде вольтового сигнала, значения извлекаемого ионного тока пучка, потенциала ЭЭ, и тока перехвата. При этом истинные значения данных параметров определялись исходя из заданного производителем НПК «Платар» коэффициента пересчёта. Регистрация внешнего сигнала с блоков питания осуществлялась цифровыми вольтметрами В7-78/1 (для извлекаемого ионного тока пучка) и В7-78/1 (для потенциала ЭЭ и тока перехвата). Регистрация токов на ИЭ и УЭ производилась при помощи микроамперметра М906 0-100 мкА с классом точности 1,5. Фотография блоков питания разряда и управляющий модуль расходомера показаны на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Расходомер MKS PR4000B и источник питания разряда

2.1.2 Экспериментальное оборудование стенда 2ИУ-4В

Эксперимент с четырехэлектродным двигателем ВЧИД-15-4 проводился на базе стенда МАИ «2ИУ-4В». Рабочий объем вакуумной камеры 5,6 м³. Преимуществом данного стенда является возможность установки Фотография стенда представлена на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Общий вид стенда «2ИУ-4В»

В эксперименте использовались высоковольтные источники питания производства ООО НТЦ «Платар». Регистрация параметров производилась

вольтметрами В7-78/2. Для питания индуктора лабораторной модели использовался ВЧ генератор Seren R1001, который в диапазоне частот от 1,7 до 2,1 МГц, позволяет работать с мощностью до 1000 Вт. Стоит упомянуть, что ВЧ потери в согласующем устройстве могут достигать 40-50% от вкладываемой ВЧ мощности [19, 26]. Во всех интегральных зависимостях по постоянному току пучка отраженная ВЧ мощность не превышала 20 Вт. Погрешность измерения исходящей ВЧ мощности у R1001 составляла $\pm 2\%$. Для управления расходом использовался регулятор расхода газа (РРГ) MKS Instruments 1179C с цифровым блоком управления и индикации MKS 247D Readout. Во всех этапах эксперимента в качестве рабочего тела использовался ксенон [22, 23, 33].

2.1.2.1 Система вакуумирования испытательного стенда 2ИУ-4В

Для создания предварительного разрежения используется два безмасляных двухступенчатых форвакуумных насоса Kashiyama MU-603. Для создания глубокого вакуума на стенде работают 3 турбомолекулярных насоса. Скорость откачки вакуумной системы – 22000 л/с по азоту. Уровень динамического вакуума возможный на стенде «2ИУ-4В» составляет от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. [22, 23, 33]. Схема вакуумной системы стенда «2ИУ-4В» приведена на рисунке 2.6.

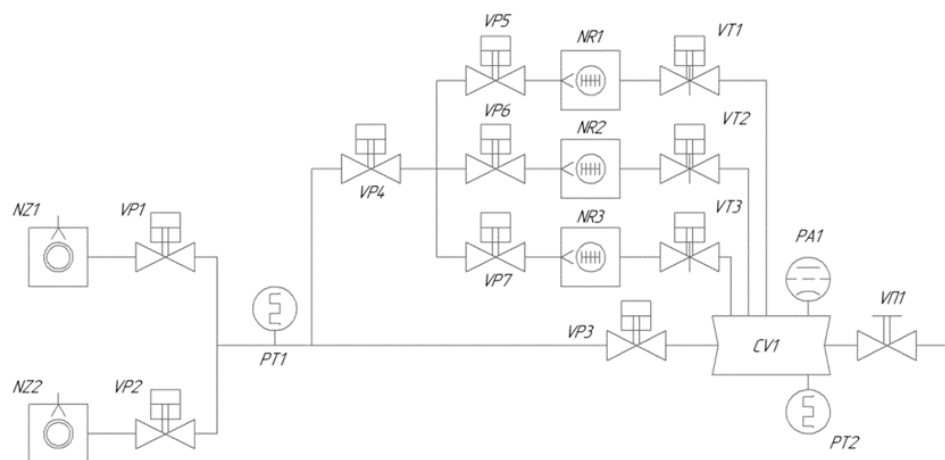


Рисунок 2.6 – Схема вакуумной системы стенда «ИУ-4В»

2.1.2.2 Система подачи рабочего тела 2ИУ-4В

В ходе исследований РПГ MKS 1179A работали с четырехканальным цифровым блоком MKS 247D Readout [80, 81], который позволяет задавать и считывать массовый расход газа. Измерения возможны в диапазоне $2 \div 100$ % максимального значения массового расхода РПГ, что составляет от 1 до 50 ст. см³/мин для MKS 1179A 50 SCCM. Погрешность измерений составляет сумму постоянной величины 0,2 % от полной шкалы блока MKS 247D Readout и величины, составляющей 0,5 % от текущего показания. Фотографии MKS 1179A и MKS 247D Readout представлены на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 - Общий вид блока управления и чтения расхода

а) MKS 247D Readout; б) РПГ MKS 1179A

Установка и измерения массового расхода РТ во время исследования моделей двигателей проводились в ст. см³/мин. Важно отметить, что текущее заданное значение расхода РТ по шкале блока соответствует действительному расходу газа в пропорции 1:1 только в том случае, если используется газ, по которому проверяется данный РПГ. В случае MKS 1179A – это азот. Для работы с ксеноном и кислородом вначале нужно рассчитать специальный поправочный коэффициент, Gas Correction Factor (GCF) для блока управления РПГ. Gas Correction Factor для газа X (GCFX) рассчитывается следующим образом:

$$GCF_x = \frac{0,306 \times S}{d_x \times Cp_x}, \quad (2.1)$$

где где S – коэффициент, соответствующий молекулярной или атомарной структуре газа. $S=1,030$ для атомарного газа, $S=1$ для двухатомного молекулярного газа. d_x – плотность газа X в г/л при нормальных условиях (давление 760 мм. рт. ст, температура 0°C), Cp_x – удельная теплоемкость газа в кал/грамм $\cdot^\circ\text{C}$, 0,306 – коэффициент, рассчитанный исходя из плотности и удельной теплоемкости азота. GCF для ксенона 1,32. Данные пересчетные коэффициенты задаются для каждого канала на задней панели блока управления массовым расходом MKS 247D Readout [22, 23, 33].

2.1.2.3 Система электропитания 2ИУ-4В

В систему электропитания двигателя ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения входят высокочастотный генератор ВЧГ с согласующим устройством СУ, блок питания эмиссионного электрода БПЭЭ, блок питания извлекающего электрода, блок питания ускоряющего электрода БПУЭ, а также блок питания нити накала БПНН с блоком смещения накала БСНН. Производителем всех блоков является ООО НПК «Платар». Блоки питания эмиссионного и извлекающего электродов обеспечивают максимальный ионный ток до 1 А. Значение напряжения на эмиссионном и извлекающем электродах может задаваться в диапазоне от 0 до +4000 В. Блок питания ускоряющего электрода (БПУЭ) обеспечивает максимальное напряжение -500 В, максимальный ток перехвата 300 мА. Блок питания накальной нити (БПНН) обеспечивает питание нити-нейтрализатора током номиналом до 20 А. Блок смещения накальной нити (БСНН) задает потенциал нити -80В. Потенциалы источников питания задаются относительно земли. Для предотвращения наводок ВЧ мощности, все цепи питания содержат специальные электротехнические фильтры. Управление системой и регистрация

информации осуществляется как в ручном режиме. Значения напряжения и ионного тока регистрировались с датчиков компенсационного типа и выводились на внешние цифровые измерители в виде сигнала в вольтах. Коэффициент пересчета получаемого сигнала в истинное значение был задан производителем блоков НПК «Платар». В ходе экспериментальных исследований использовался высокочастотный генератор Seren модель R1001. Высокочастотный генератор Seren R1001 имеет диапазон частот $1700 \div 2100$ КГц, номинал выходной мощности $1 \div 1000$ Вт [22, 23, 33].

2.2 Оценка погрешностей регистрируемых параметров

В ходе экспериментов проводилась регистрация следующих параметров. Регистрировались токи ЭЭ, ИЭ и УЭ в каждой точке измерения проводилась с малым временным интервалом (обычно менее 1 минуты). Напряжения выставлялись вручную, значения напряжения измерялись с помощью мультиметров MAS830, погрешность измерений которых составляет 0,5%. Измерения токов проводились при помощи вольтметра В7-78/2, погрешность которого составляет $\pm 0,008$ %. Погрешность показаний прибора Seren R1001 складывалась из величины равной 1% от всей шкалы показаний и величины равной 1% от текущего показания. При оценке интегральных характеристик можно учитывать только приборную погрешность измерений $\Delta \tilde{x}_n$. В таблице 2.2 для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ приведены значения приборных погрешностей регистрируемых параметров [22, 23, 33].

Таблица 2.2 – Приборная погрешность измерений

Измеряемая величина	Приборная погрешность
Ток ионного пучка	$\pm 0,1-0,5$ мА (для тока пучка 0,1-10 мА); $\pm 0,3-1,1$ мА (для тока пучка 25-200 мА); $\pm 2,9-4,3$ мА (для тока пучка 200-500 мА)
Токи на извлекающем и ускоряющем электродах	$\pm 2,5$ мкА (для тока 1-100 мкА);

Расход ксенона	$\pm 0,01-0,09$ ст. см ³ /мин (Расходомер MKS 1179A 10 SCCM, $\dot{v}_{Xe} = 0,1-14$ ст. см ³ /мин); $\pm 0,09-0,1$ ст. см ³ /мин (Расходомер MKS 1179A 50 SCCM, $\dot{v}_{Xe} = 1-50$ ст. см ³ /мин)
Подводимая от ВЧ генератора мощность	$\pm 0,95-7,6$ Вт (при подводимой мощности 50-400 Вт)

Однако при оценке абсолютного значения интегральных характеристик необходимо учитывать и возникающие во время проведения серии экспериментов случайные погрешности $\Delta\tilde{x}_{сл}$, которые определяются как:

$$\Delta\tilde{x}_{сл} = t\tilde{\sigma} \quad (2.2)$$

где t – коэффициент Стьюдента; $\tilde{\sigma}$ – среднеквадратичное отклонение результата измерения.

Так как при исследовании интегральных характеристик производилось осреднение данных из 4 измерений, то коэффициент Стьюдента, в данном случае, будет равен $t = 3,18$ ($\alpha = 0,95$). Среднеквадратичное отклонение результатов измерения для каждой экспериментальной точки рассчитывается исходя из следующего соотношения:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (2.3)$$

где $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – среднее арифметическое измеряемой величины x_i .

Для нахождения общей погрешности серии измерений $\Delta\tilde{x}$ используется закон сложения независимых величин:

$$\Delta \tilde{x} = \sqrt{\Delta \tilde{x}_{\text{п}}^2 + \Delta \tilde{x}_{\text{сл}}^2}. \quad (2.4)$$

Так как во время экспериментов значения подводимой от ВЧ генератора мощности задавались с точностью до цены деления используемых приборов, то $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}$ в данном случае была равна нулю, и общая погрешность для данных величин определялась только $\Delta \tilde{x}_{\text{п}}$ (см. таблицу 2.2). Извлекаемый ток ионного пучка и расход РТ уже регистрировались в ходе испытаний, поэтому для них $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}} \neq 0$ [22, 23, 33]. Общая погрешность измерений для этих параметров, с учётом $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}$, представлена в таблице Таблица 2.3.

Таблица 2.3 - Общая погрешность измерений в эксперименте

Измеряемая величина	Общая погрешность
Ток ионного пучка	$\pm 0,12-0,54$ мА (для тока пучка 0,1-10 мА) , менее $\pm 2,5$ %; $\pm 0,34-1,2$ мА (для тока пучка 25-200 мА), менее ± 2 %; $\pm 2,9-4,3$ мА (для тока пучка 200-500 мА), менее $\pm 1,5$ %
Токи на извлекающем и ускоряющем электродах	$\pm 3,1$ мкА (для тока 1-100 мкА), менее ± 3 %
Расход ксенона	$\pm 0,01-0,5$ ст. см ³ /мин (Расходомер MKS 1179A 10 SCCM, $\dot{v}_{Xe} = 0,1-14$ ст. см ³ /мин), $\sim \pm 3$ %; $\pm 0,7-1,4$ ст. см ³ /мин (Расходомер MKS 1179A 50 SCCM, $\dot{v}_{Xe} = 14-20$ ст. см ³ /мин), менее ± 5 %

Выявление грубых ошибок в массиве экспериментальных данных осуществлялось за счёт использования критерия Граббса [27].

2.3 Описание лабораторных моделей ионных двигателей

2.3.1 Лабораторная модель источника ионов с четырехэлектродной системой ускорения

Эксперименте исследование проводилось с модернизированным источником ионов (ИИ) КЛАН-53 [13]. ИИ включает холодный полый катод (ХПК), ГРК, СУ и катод-нейтрализатор (КН). ХПК содержит полый корпус с катодными стенками и рубашкой охлаждения, магнитную систему, поджигай и выходной электроды, трубку подачи газа. ГРК состоит из корпуса, анода и магнитной системы. ИОС включает эмитсионный и ускоряющий электроды-сетки, а также кольцевой заземленный выходной электрод. Эта конфигурация СУ была модернизирована под поставленную задачу по изучению вторичных токов внутри СУ. В рамках данной работы был изготовлен и установлен фланец электрода держателя извлекающего электрода и извлекающий электрод. Катод нейтрализатор (КН) - накаливого типа. Так же все электроды были заменены на комплект электродов с семью отверстиями в каждом электроде. ИЭ и УЭ были изготовлены в виде слоистой структуры, состоящей из двух слоев фольги алюминия толщиной 0,04 мм и прослойки из каптона между слоем фольги и телом электрода. Система электропитания содержит следующие блоки электропитания источника ионов: блок полого катода (БПК), блок разряда (БПР), блок ионного пучка (БИП), блок ускоряющего электрода (БУЭ), блок накала катода-нейтрализатора (БНН) и блок смещения катода-нейтрализатора (БСН).

Принцип действия ИИ заключается в следующем. При подаче от системы подачи газа (СПГ) заданного расхода газа в ХПК, подаче воды в рубашку охлаждения катода и подаче напряжения от БПК на поджигной и выходной электроды относительно корпуса катода, в катоде зажигается самостоятельный тлеющий разряд. Первичные электроны образуются на катодных стенках корпуса за счет вторичной ион-электронной эмиссии, ускоряются на прикатодном падении

потенциала и, осциллируя внутри корпуса, ионизуют атомы рабочего газа. Ионы, образующиеся при ионизации, выпадают на катодные стенки ХПК, а электроны выпадают на поджигной и выходной электроды. При подаче напряжения от БПР на анод ГРК относительно выходного электрода ХПК, основная часть электронов через отверстие в выходном электроде поступает в ГРК и обеспечивают зажигание и поддержание несамостоятельного разряда в камере. Электроны в дальнейшем выпадают на анод, а ионы, образующиеся при ионизации газа в ГРК, выпадают на эмиссионный электрод и частично на стенки корпуса ГРК. При подаче положительного, относительно земли, потенциала на анод (при помощи БИП) и отрицательного потенциала, относительно земли, на ускоряющий электрод (от БУЭ) ионы, попадающие в отверстия эмиссионного электрода СУ, ускоряются в ИОС и образуют на выходе из СУ ионный пучок. Объемный (положительный) заряд ионного пучка нейтрализуется электронами, поступающими с катода-нейтрализатора при подаче на КН напряжения накала от БНН и напряжения смещения от БСН. В данном эксперименте КД не использовался. Схема источника КЛАН-53 показана на рисунке 2.8.

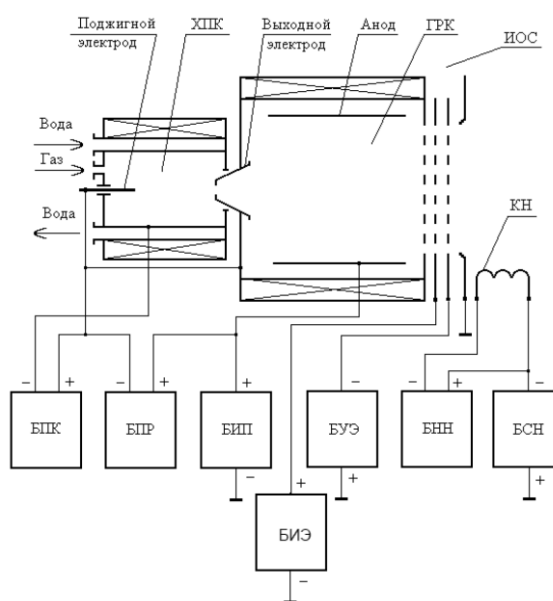


Рисунок 2.8 – Схема источника ионов КЛАН-53-3.4

На рисунках 2.9 - 2.10 показаны фотографии источника ионов КЛАН-53 и доработанной СУ для установки четырех электродов.

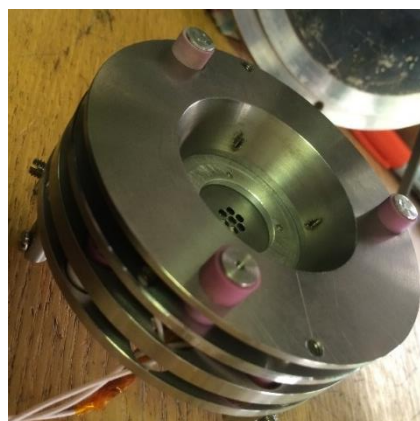


Рисунок 2.9 – Источник ионов КЛАН-53

Изготовлено два электрода состоящих из пяти слоев. Основная рабочая область электрода изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, с обеих сторон проложен диэлектрический слой из каптона и затем приклеено два слоя из алюминиевой фольги [35]. Электрическое сопротивление между слоями составляло 0,5 МОм при 2 кВ. Фотографии четырёхэлектродной СУ со стороны ЭЭ и ЗЭ представлены на рисунке 2.10.



а)



б)

Рисунок 2.10 – Четырёхэлектродная СУ со стороны ЭЭ

а) – СУ со стороны ЭЭ; б) – СУ со стороны ЗЭ

Геометрические параметры четырёхэлектродной СУ представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Геометрические параметры СУ КЛАН-53

Параметр:	Значение:
Диаметр СУ, мм	50
Кол-во отверстий	7
Расстояние между отв., мм	3,1
Диаметр отверстия ЭЭ. мм	2,5
Диаметр отверстия ИЭ. мм	2
Диаметр отверстия УЭ. мм	2,5
Диаметр отверстия ЗЭ. мм	2,5
Межэлектродный зазор ЭЭ-ИЭ, мм	1
Межэлектродный зазор ИЭ-УЭ, мм	1
Межэлектродный зазор УЭ-ЗЭ, мм	1
Толщина ЭЭ, мм	0,3
Толщина ИЭ, мм	0,7
Толщина УЭ, мм	0,7

На фланце крепления были источника ионов к вакуумной камере стенда были выведены 3 дополнительных герморазъема для вывода измерительных цепей для изолированных поверхностей ИЭ и УЭ.

2.3.2 Лабораторная модель высокочастотного ионного двигателя средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения

Исходный ВЧИД-15 представляет собой лабораторный образец ВЧИД с трехэлектродной СУ, имеющей три перфорированных электрода. Диаметр ГРК составляет 150 мм, высота 60 мм. Этот двигатель прошел полный цикл отработки на ксеноне, проведенный автором работы [33]. Номинальный режим работы СУ для этого двигателя имел следующие значения: $U_{\text{ЭЭ}}=1200\text{В}$, $U_{\text{УЭ}}=-200\text{В}$. Значения тяги составляли от 19 мН до 28 мН, при мощности двигателя от 520 Вт до 850 Вт. Предельная плотность тяги при этом составляет $0,159\text{ мН/см}^2$. Базовая СУ этого

двигателя состояла из ЭЭ, УЭ и ЗЭ, все три электрода имели плоскую форму. В рамках данной работы была произведена модернизация конструкции СУ и был разработан и интегрирован четвертый кольцевой электрод. Это обеспечило возможность подвода необходимого потенциала к трем перфорированным электродам, а четвертый при этом был ЗЭ под потенциалом корпуса. Таким образом показано что традиционную СУ с тремя перфорированными электродами возможно оснастить четвертым электродом, который является частью корпуса двигателя и выполняет функцию кольцевого ЗЭ. ЭЭ данного двигателя имеет толщину 0,8 мм и изготовлен из молибдена марки МЧ, ИЭ изготовлен из титана марки ВТ1-0 и имеет толщину 1 мм, УЭ так же изготовлен из титана. СУ выполнена по пережатой схеме это значит, что отверстия на ИЭ меньше отверстий ЭЭ, отверстия ЭЭ имеют диаметр 2,5 мм, в ИЭ диаметр отверстий равен 1,6 мм, диаметр отверстий УЭ равен диаметру ЭЭ. Индуктор, охлаждаемый диаметром 6 мм, с семью витками. ГРК цилиндрического типа, изготовленная из кварцевого стекла. Суммарная мощность двигателя, без учета мощности на катод нейтрализатор (КН), работающего с трехэлектродной СУ не превышала 1 кВт [33]. При использовании четырёхэлектродной СУ в рамках данной работы мощность двигателя удалось поднять до 2,4 кВт. Увеличение мощности двигателя было реализовано за счёт увеличения мощности ИП, так в рамках работы [33] напряжение на ЭЭ составляло 1200 В и током ИП 0,5А. А при использовании четырёхэлектродной СУ удалось отработать режимы с напряжением 4кВ на ЭЭ и 2 кВ на ИЭ при мощности ИП 2 кВт, максимальная мощность разряда при этом доходила до 400 Вт. Геометрические параметры четырёхэлектродной СУ представлены в таблице 2.5. Фотография модернизированного ВЧИД-15-4 представлена на рисунке 2.11.

Таблица 2.5 - Геометрические параметры четырёхэлектродной СУ ВЧИД-15-4

Параметр:	Значение:
Диаметр СУ, мм	150
Прозрачность ЭЭ:	0,63
Прозрачность УЭ:	0,26
Кол-во отверстий, шт.	2197

Диаметр отверстия ЭЭ. мм	2,5
Диаметр отверстия ИЭ. мм	1,6
Диаметр отверстия УЭ. мм	2,5
Диаметр отверстия ВЭ. мм	3,0
Межэлектродный зазор ЭЭ-ИЭ, мм	1
Межэлектродный зазор ИЭ-УЭ, мм	1
Межэлектродный зазор УЭ-ВЭ, мм	1
Толщина ЭЭ, мм	0,8
Толщина ИЭ, мм	1
Толщина УЭ, мм	1

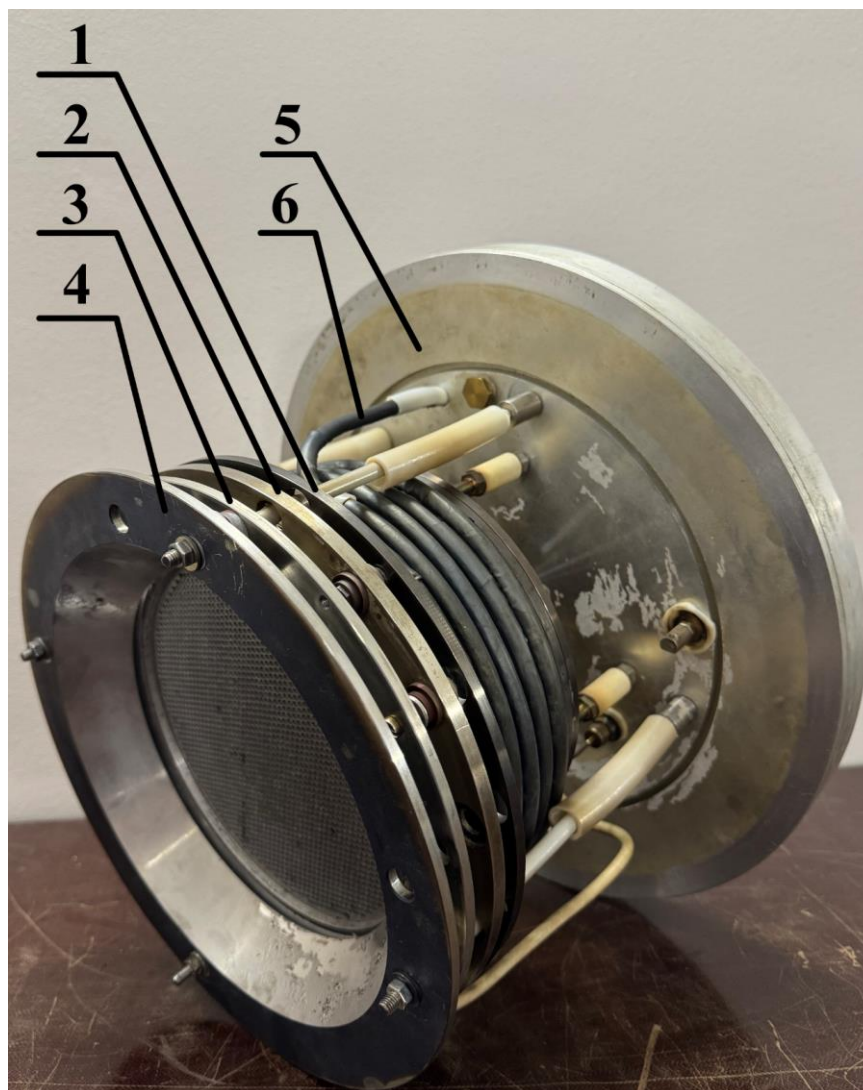


Рисунок 2.11 – Лабораторная модель ВЧИД-15-4 средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения и диаметром ионного пучка 150 мм

1 – фланец ЭЭ; 2 – фланец ИЭ; 3 – фланец УЭ; 4 – замедляющий электрод;
5 – установочный фланец; 6 – индуктор

Глава 3 Расчётное и экспериментальное исследования вторичных потоков в системе ускорения

3.1 Экспериментальное исследование вторичных токов в четырёхэлектродной системе ускорения

В рамках данной работы лабораторная модель двигателя на базе источника ионов КЛАН-53, была оснащена четырёхэлектродной СУ. В такой конфигурации СУ имела три перфорированных электрода и четвёртый замедляющим кольцевой электрод. Был изготовлен электрод, состоящий из пяти слоёв: двух диэлектрических слоев между тремя проводящими. Основная рабочая область электрода выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, с обеих сторон которой размещены диэлектрические слои из каптона, к которым приклеены два слоя алюминиевой фольги. Толщина каптона составляла 0,04 мм, толщина алюминиевой фольги – 0,08 мм. Эксперимент состоял из двух этапов. Все эксперименты проходили за один установ в вакуумную камеру стенда 2ИУ-3В.

На первом этапе источник ионов обозначался КЛАН-53-3.3. Трёхэлектродная СУ, включала ЭЭ, секционный УЭ, перфорированный ЗЭ и кольцевой фланец электрода держатель, находившийся под потенциалом корпуса. Три секции УЭ выводились через герморазъёмы установочного фланца.

На втором этапе источник ионов обозначался КЛАН-53-3.4. На данном этапе проводилось переподключение блоков питания цепей УЭ и ЗЭ для перераспределения потенциалов, что позволяло преобразовать трёхэлектродную СУ в четырёхэлектродную. Подключение цепи ЭЭ оставалось неизменным. Дополнительный источник напряжения подавался на УЭ, превращая его в ИЭ четырёхэлектродной схемы. ЗЭ был отвязан от корпуса и подключён к блоку УЭ. В этой фазе эксперимента выполнялись измерения токов на трёх поверхностях ИЭ и УЭ. Общая структура экспериментов, представленных в данной главе показана на рисунке 3.1.

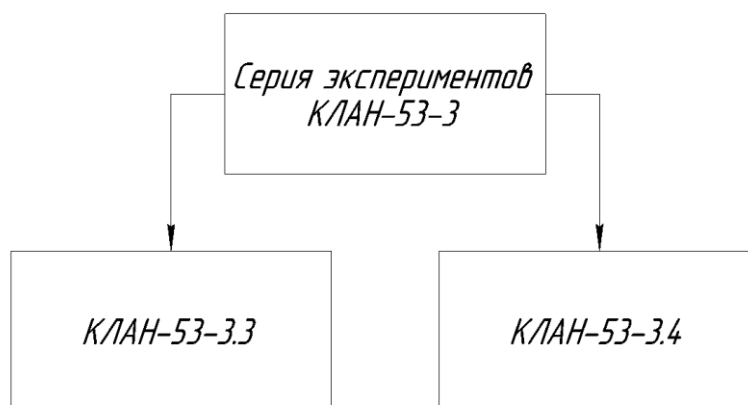


Рисунок 3.1 – Структура эксперимента

Схема эксперимента с источником ионов КЛАН-53-3.3 оснащенного трехэлектродной СУ по измерению токов на ускоряющем электроде показана на рисунке 3.2.

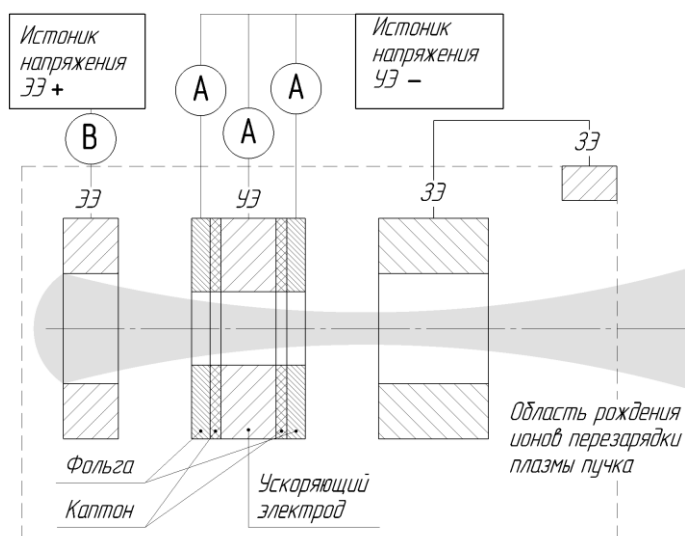


Рисунок 3.2 – Схема эксперимента 1.1 по измерению вторичных потоков на УЭ в трехэлектродной СУ источника ионов КЛАН-53-3.3

Четырехэлектродная СУ, используемая в эксперименте 1.2, с секционным ИЭ представляет собой описанную ранее трехэлектродную СУ, с УЭ выполняющим роль секционного ИЭ, на ЗЭ подавался отрицательный потенциал, тем самым он выполнял роль УЭ. Кольцевой ЗЭ остался без изменений. Схема эксперимента 1.2

с источником ионов КЛАН-53-3.4 оснащенный четырёхэлектродной СУ и кольцевым ЗЭ по измерению токов на ИЭ представлена на рисунке 3.3.

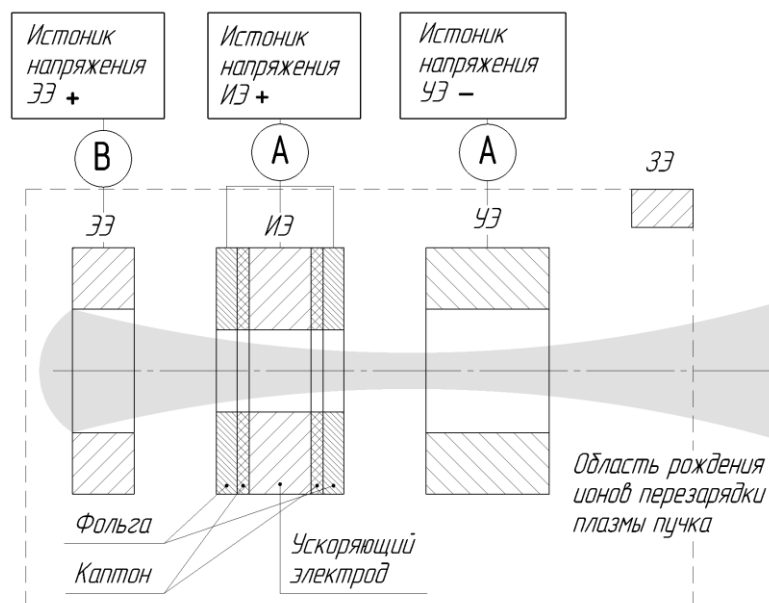


Рисунок 3.3 – Схема эксперимента 1.2 по измерению вторичных потоков на ИЭ в четырёхэлектродной СУ источника ионов КЛАН-53-3.4

На рисунке 3.4 представлена фотография источник ионов КЛАН-53 в режиме извлечения пучка с током 2 мА.



Рисунок 3.4 – Источник ионов КЛАН-53-3 в режиме извлечения ионного пучка с током 2 мА

Извлекающая разность потенциалов $\Delta U_{\text{изв}}$ в первом межэлектродном зазоре между ЭЭ и ИЭ определяется:

$$\Delta U_{\text{изв}} = U_{\text{ЭЭ}} - U_{\text{ИЭ}}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{ЭЭ}}$ – напряжение на ЭЭ, $U_{\text{ИЭ}}$ – напряжение на ИЭ.

Ускоряющая разность потенциалов $\Delta U_{\text{уск}}$ во втором межэлектродном зазоре между ИЭ и УЭ определяется:

$$\Delta U_{\text{уск}} = U_{\text{ИЭ}} + |U_{\text{УЭ}}|, \quad (3.2)$$

где $U_{\text{УЭ}}$ – напряжение на УЭ.

Общая разность потенциалов ΔU между ЭЭ и УЭ определяется:

$$\Delta U_{\Sigma} = U_{\text{ЭЭ}} + |U_{\text{УЭ}}|. \quad (3.3)$$

Суммарный ток перехвата для четырёхэлектродной СУ состоит из совокупности вторичных токов на ИЭ и УЭ, возникающих в результате прямого перехвата на поверхности электродов тока ионного пучка, так и от токов перезарядки, переделается по формуле:

$$I_{\text{перехвата}} = I_{\text{ИЭ}} + I_{\text{УЭ}}, \quad (3.4)$$

Ток ионного пучка определяется формулой:

$$I_{\Pi} = I_{\text{ЭЭ}} - I_{\text{УЭ}}, \quad (3.5)$$

где $I_{\text{ЭЭ}}$ – ток на ЭЭ, $I_{\text{УЭ}}$ – ток на УЭ.

Ток на ускоряющем электроде в свою очередь считался по формуле:

$$I_{\text{УЭ}} = I_{\text{УЭ}_{\text{Пл.ГРК}}} + I_{\text{УЭ}_{\text{Пл.Отв.}}} + I_{\text{УЭ}_{\text{Пл.ИП}}}, \quad (3.6)$$

где $I_{\text{УЭ}_1}$ – ток на стороне УЭ обращенной к плазме ГРК, $I_{\text{УЭ}_2}$ – ток на УЭ внутри отверстий, $I_{\text{УЭ}_3}$ – ток на УЭ на стороне УЭ, обращенной к плазме ионного пучка.

Основной задачей первой части эксперимента являлось сравнение процессов вторичного ионообразования в трёхэлектродной СУ с тремя перфорированными электродами и четырёхэлектродной СУ, дополненной четвёртым ЗЭ в виде кольцевого фланца. Полученные результаты могут служить основанием для формулирования рекомендаций по проектированию четырёхэлектродных СУ для ИД. В первой фазе эксперимента проводилось исследование влияния извлекающей разности потенциалов $\Delta U_{\text{изв}}$ на ток ИП $I_{\text{п}}$, ток на ИЭ $I_{\text{из}}$, ток на УЭ $I_{\text{уэ}}$ и суммарный ток перехвата $I_{\text{перехвата}}$. Для обеспечения сопоставимости условий извлечения ИП, при сравнении трех- и четырехэлектродных СУ параметры разряда постоянного тока для этого этапа контрольного эксперимента оставались неизменными: $U_{\text{к}}=500$ В, $I_{\text{к}}=0,5$ А, $U_{\text{р}}=48$ В, $I_{\text{р}}=0,3$ А при расходе ксенона $0,3$ ст.см³/мин. Испытания трехэлектродной СУ проводились при потенциалах на ЭЭ, равных $0,5$ кВ, $0,8$ кВ, $1,0$ кВ и $1,5$ кВ, при изменении напряжения на УЭ в диапазоне от 0 до -1000 В. Изменение напряжения на УЭ выполнялось с целью увеличения диапазона изучения обеих СУ и расширения области регистрации параметров. Обычно у ИД величина тока на УЭ составляет $10-20$ % от тока на ЭЭ. Для повышения достоверности результатов измерения диапазона точек при изменении напряжения на УЭ выполнялись в четыре повторные серии. Между сериями двигатель охлаждался в течение одного часа, после чего параметры разряда в ГРК настраивались заново. По каждой исследуемой точке рассчитывалось среднее значение, полученное на основе шести серий измерений.

Была проведена исследовательская работа по определению величины вторичных токов ионообразования на трёх поверхностях УЭ в трехэлектродной СУ при варьировании потенциала на УЭ от -1000 В до нуля. На этом этапе параметры разряда ГРК были повышены по сравнению с предыдущей серией экспериментов и составляли следующие значения: $U_{\text{к}}=600$ В, $I_{\text{к}}=0,75$ А, $U_{\text{р}}=60$ В, $I_{\text{р}}=1,1$ А при расходе ксенона $0,3$ ст. см³/мин. На рисунке 3.5 представлена зависимость извлекаемого тока пучка от ΔU_{Σ} .

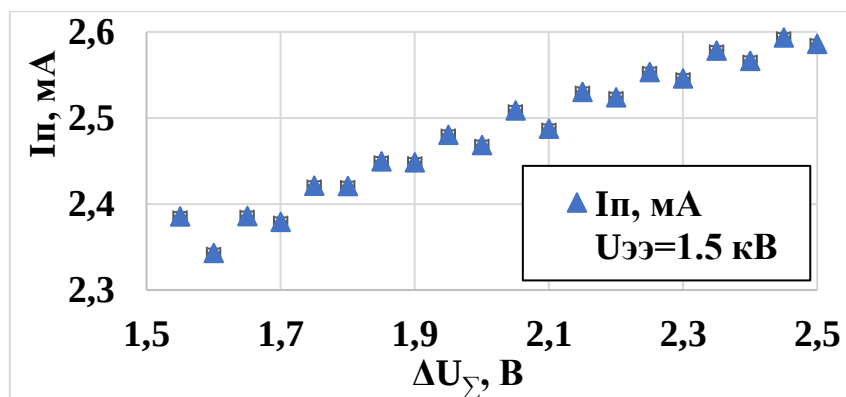


Рисунок 3.5 – Зависимость извлекаемого тока ИП от ΔU_{Σ} .

При $U_{ээ} = 1,5$ кВ ток ионного пучка демонстрирует тенденцию к увеличению с $\sim 2,6$ мА до $\sim 2,35$ мА с увеличением ΔU_{Σ} .

Распределение вторичных токов, приходящих на три области УЭ. Ток $I_{уэ1}$ и ток $I_{уэ3}$ возникают в результате процессов перезарядки внутри СУ, а ток $I_{уэ2}$ возникает в результате перезарядки во внешней плазме ионного пучка. На рисунке 3.6 представлены зависимости трех токов на трех поверхностях УЭ.

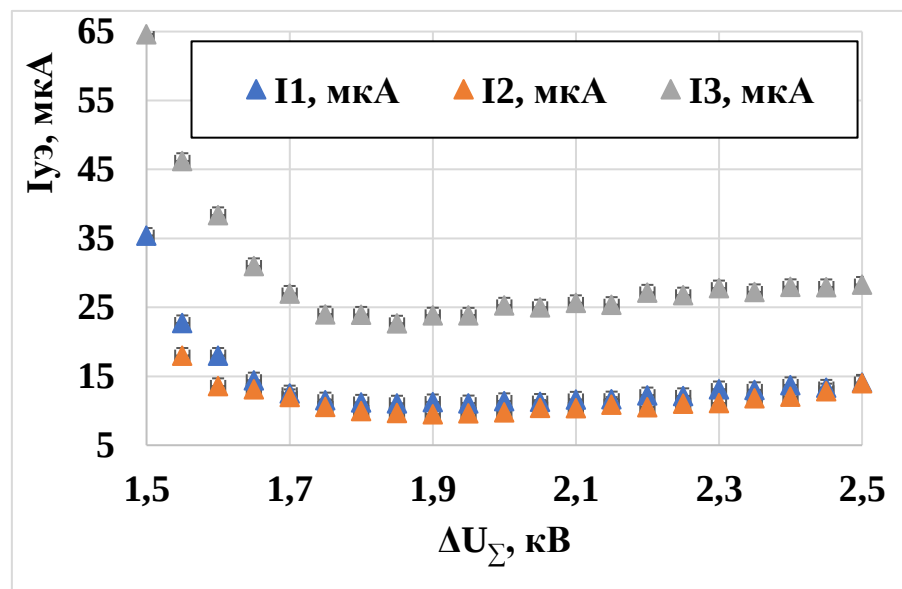


Рисунок 3.6 – Зависимости тока на трех поверхностях УЭ от ΔU_{Σ} .

I_1 – поверхность УЭ со стороны плазмы ГРК, I_2 – поверхность УЭ внутри отверстий, I_3 – поверхность УЭ со стороны плазмы ионного пучка составляли соответственно

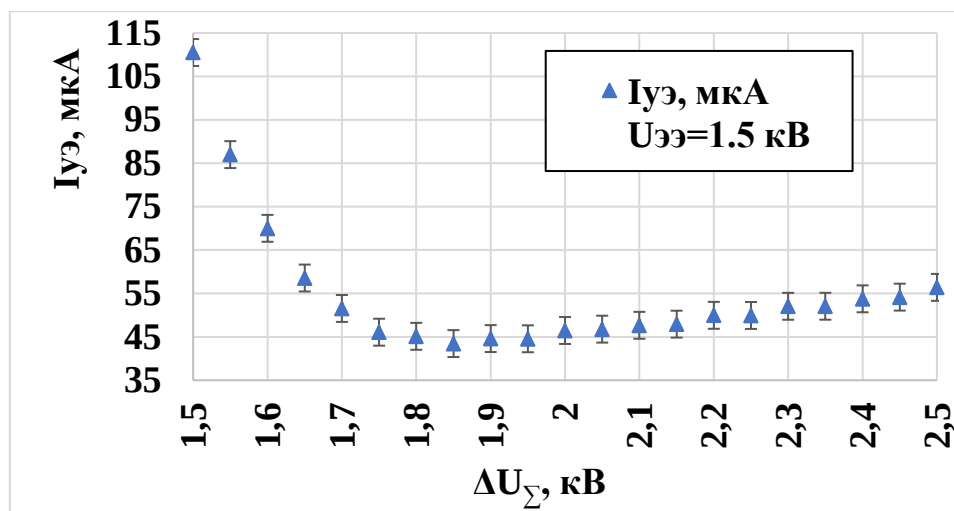


Рисунок 3.7 – Зависимости тока на УЭ от ΔU_{Σ} .

При изменении напряжения на УЭ от -1000 В до -200 В токи, зарегистрированные на всех поверхностях, остаются практически неизменными: на стороне плазмы пучка они составляют ~ 25 – 28 мкА, внутри отверстий и на стороне плазмы ГРК — порядка 11 – 14 мкА. При дальнейшем увеличении потенциала до 0 В фиксируется резкий рост токов. Наиболее выраженное возрастание наблюдается на поверхности УЭ со стороны плазмы пучка, где ток достигает ~ 65 мкА. Для поверхности, обращённой внутрь отверстий, ток увеличивается до ~ 17 мкА, а на стороне плазмы ГРК — до ~ 20 мкА. Таким образом, при приближении потенциала УЭ к нулевому значению наблюдается существенная интенсификация процессов, приводящая к росту токов на всех исследованных поверхностях, особенно со стороны плазмы пучка. На рисунке 3.8 представлена зависимость трех токов на УЭ от расхода РТ ксенона от $0,1$ до $1,6$ см³/мин.

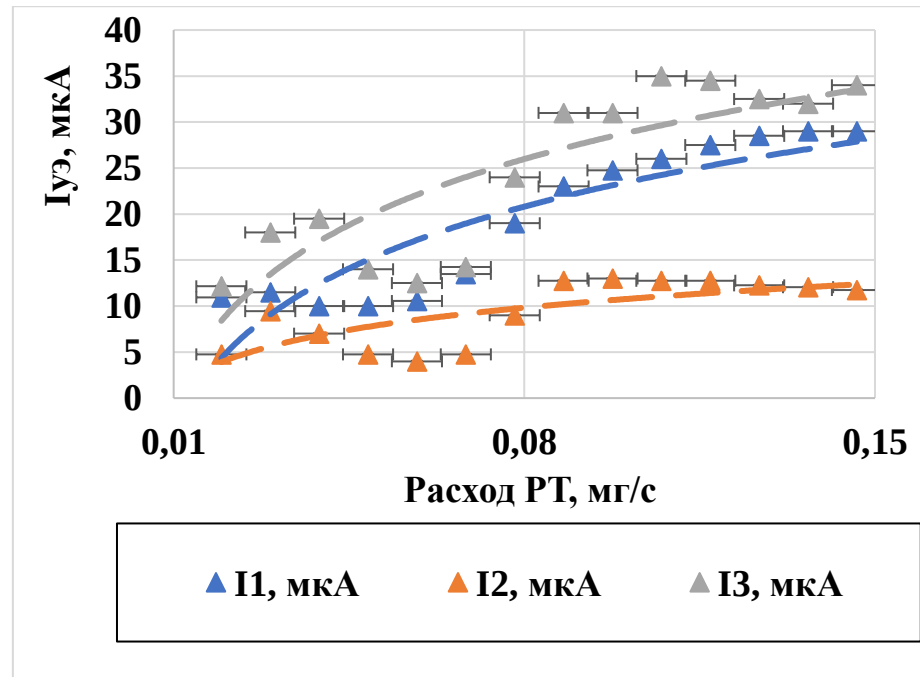


Рисунок 3.8 – Ток на УЭ от расхода РТ

I_1 – поверхность УЭ со стороны плазмы ГРК, I_2 – поверхность УЭ внутри отверстий, I_3 – поверхность УЭ со стороны плазмы ионного пучка составляли соответственно

При расходах рабочего тела свыше $0,6 \text{ см}^3/\text{мин}$ на всех поверхностях фиксируется скачкообразное увеличение токов перехвата: с ~ 4 до 13 мкА для тока на УЭ со стороны плазмы ГРК, с ~ 11 до 23 мкА для тока внутри отверстий и с ~ 12 до 35 мкА для тока на поверхности, обращённой к плазме пучка. Данный эффект связан с переходом двигателя с расчётного режима по расходу рабочего тела на режим с повышенным расходом, что приводит к усилению вторичных процессов и росту токов перехвата.

Основной задачей второй части эксперимента являлось определение режимов и рабочих диапазонов четырёхэлектродной СУ, при постоянном напряжении на ЭЭ равном $1,5 \text{ кВ}$ и варьировании напряжения на ИЭ с шагом 100 В , зарегистрирована характеристика извлекаемого тока ИП. На рисунке 3.9 представлены зависимости тока ИП от извлекающей разности потенциалов для всех исследуемых режимов работы двигателя. Напряжение на УЭ равнялось -250 В .

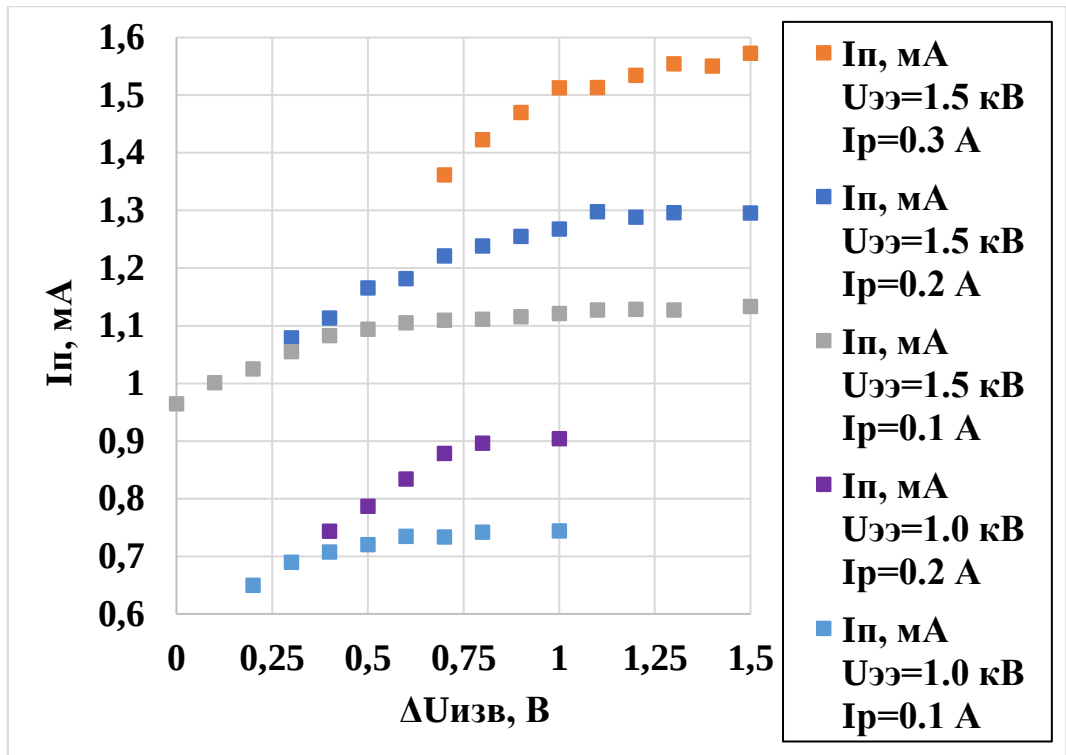


Рисунок 3.9 – Зависимость тока ИП от извлекающего потенциала

Область работы при токах ионного пучка от 0,9 мА до 1,6 мА получена при токе разряда $I_p=0,1; 0,2; 0,3 А$ при напряжении на ЭЭ равном 1,5 кВ. Вторая область работы при напряжении на ЭЭ равном 1,0 кВ и токах разряда $I_p=0,1; 0,2 А$ лежит в диапазоне извлекаемых токов от 0,65 до 0,9 мА. Даная зависимость подтверждает, что извлекаемый ионный ток растет при увеличении извлекающей разности потенциалов $\Delta U_{изв}$, то есть при уменьшении напряжения на ИЭ.

Для определения оптимальных извлекающих напряжений при проектировании ИД необходимо знать, как изменяться ток, выпадающий на ИЭ и УЭ. Распределение токов на ИЭ и УЭ от извлекающего напряжения представлено на рисунках 3.10 и 3.11.

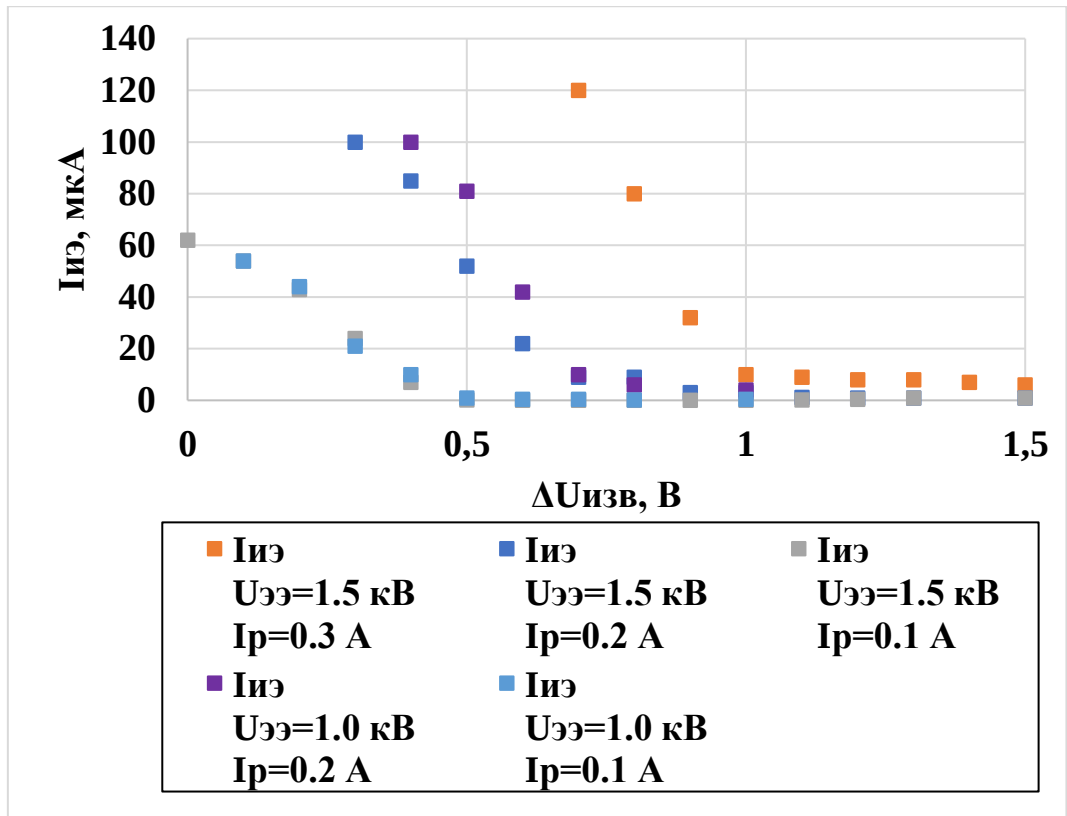


Рисунок 3.10 – Зависимость тока на ИЭ от извлекающей разности потенциалов

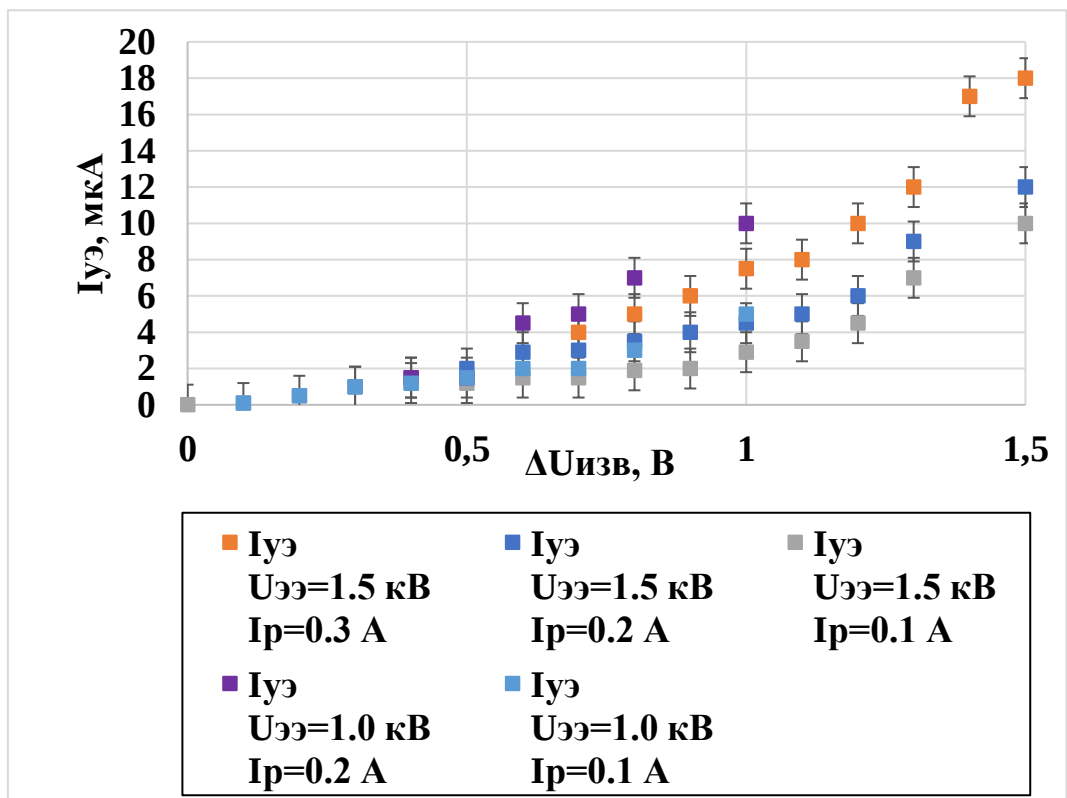


Рисунок 3.11 – Зависимость тока на УЭ от извлекающей разности потенциалов

По представленным графикам видно, что изменение тока на ИЭ выражено значительно сильнее, чем на УЭ. При этом ток на УЭ изменяется обратно пропорционально току перехвата на ИЭ. Для всех режимов работы ток перехвата на УЭ не превышал 18 мкА. Увеличение извлекающего напряжения сопровождается резким снижением тока перехвата, который при $U_{изв} \geq 1,0$ кВ близок к нулю. В диапазоне извлекающих разностей потенциалов 0-1,0 кВ наблюдается существенный ток на ИЭ, что обусловлено преобладанием давления плазмы ГРК над электростатическим полем, формируемым между ЭЭ и ИЭ. При увеличении извлекающей разности потенциалов свыше 0,5-1,5 кВ, для токов разряда 0,1-0,2 А, величина тока на ИЭ становится близкой к нулевым значениям. Для тока разряда 0,3 А, величина тока на ИЭ меньше 10 мкА. Это свидетельствует о переходе СУ в расчетный режим извлечения. Суммарные токи на УЭ во всем диапазоне не превышают 1,4% от тока ИП.

Исходя из режимов извлечения, при которых ток на ИЭ принимает минимальные значения, для дальнейшего анализа были выбраны четыре режима: 1,5 кВ, 1,3 кВ, 1,0 кВ и 0,8 кВ при которых варьировалось напряжение на УЭ тем самым изменялась $\Delta U_{иск}$. Обычно $U_{уэ}$ не превышает 10-20% от $U_{ээ}$. На рисунке 3.12 представлена зависимость тока пучка при данных режимах извлечения от $\Delta U_{иск}$.

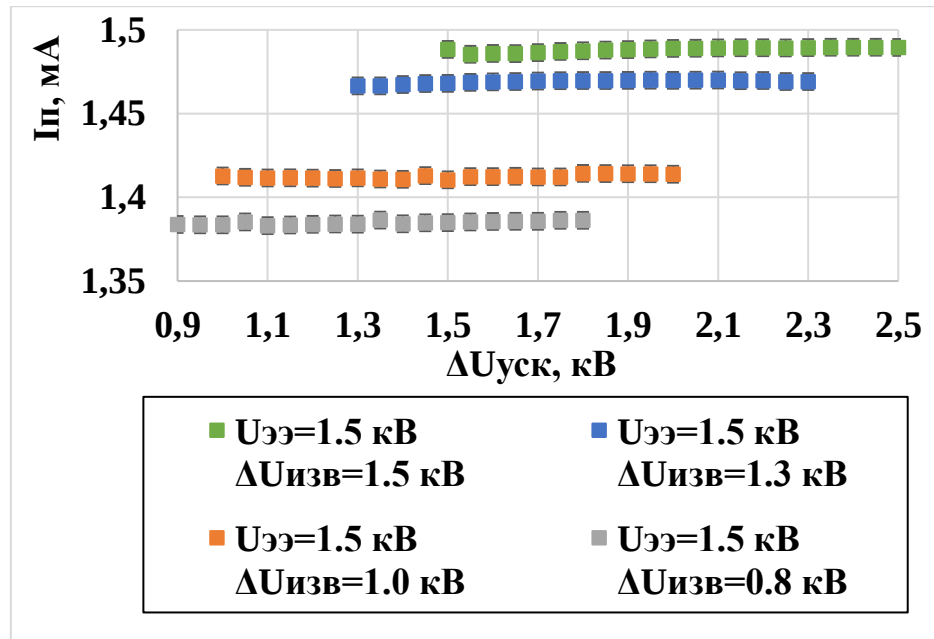


Рисунок 3.12 – Зависимость тока ИП в четырехэлектродной СУ от ускоряющей разности потенциалов

По представленным зависимостям можно заключить, что в четырехэлектродной СУ ток ИП определяется разностью потенциалов $\Delta U_{\text{изв}}$ в первом межэлектродном зазоре и остаётся неизменным при изменении $\Delta U_{\text{уск}}$. В трехэлектродной СУ извлечение и ускорение реализуются в одной совместной зоне между ЭЭ и УЭ, вследствие чего ток ИП падает при уменьшении разницы потенциалов в межэлектродном зазоре. В четырехэлектродной СУ ток ИП зависит только от извлекающей разности потенциалов. На разделение процесса извлечения и ускорения указывает отсутствие заметного влияния $\Delta U_{\text{уск}}$ на ток ИП. Данный вывод является принципиальным и подтверждает, что диапазон регулирования четырехэлектродной СУ обладает на одну степень свободы больше по сравнению с трехэлектродной СУ и что четырехэлектродная СУ является двухступенчатой т.е. зона извлечения и зона ускорения разделены. Для наглядной демонстрации на рисунке 3.13 приведены зависимости извлекаемого тока пучка для трехэлектродной СУ.

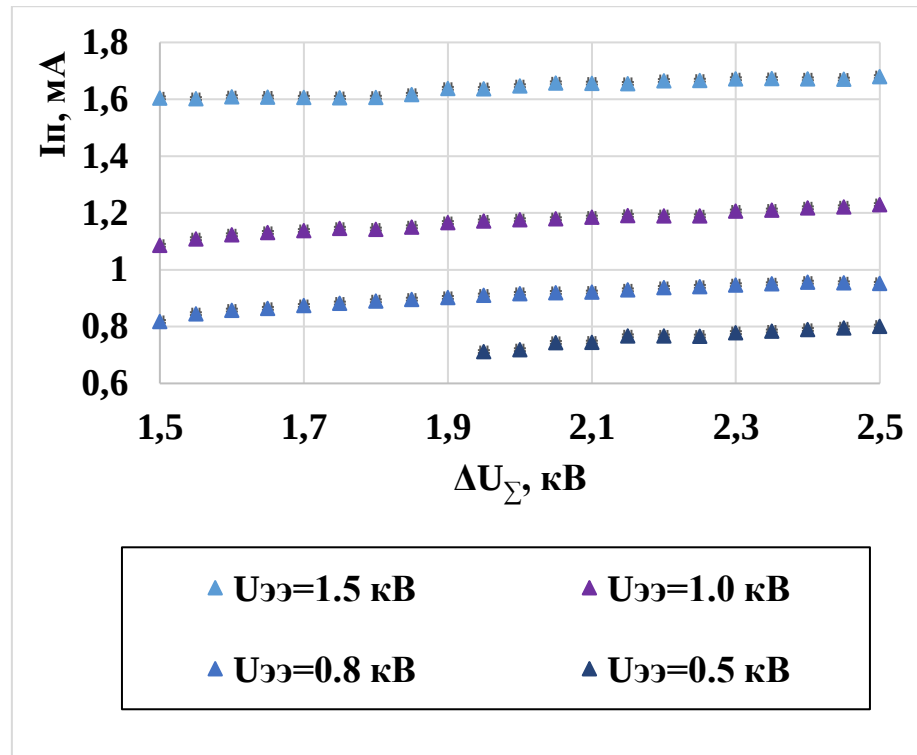


Рисунок 3.13 – Зависимость тока ИП в трехэлектродной СУ от тока разности потенциалов

По зависимостям извлекаемого тока пучка от напряжения на УЭ видно, что при изменении напряжения на ЭЭ в диапазоне от 1,5 до 0,5 кВ значения тока ИП находятся в пределах 0,8–1,7 мА в левой области графика и 0,7–1,6 мА — в правой области. При этом изменение каждого тока составляет от 5% до 11%.

Особый интерес и научную новизну представляет установление взаимосвязи между $\Delta U_{\text{уск}}$ и распределением вторичных токов, возникающих на ИЭ в четырёхэлектродной СУ. Понимание данного процесса позволит выработать рекомендации по выбору оптимальных режимов работы четырёхэлектродных СУ. На рисунке Рисунок 3.14 представлена зависимость тока на ИЭ от напряжения на УЭ.

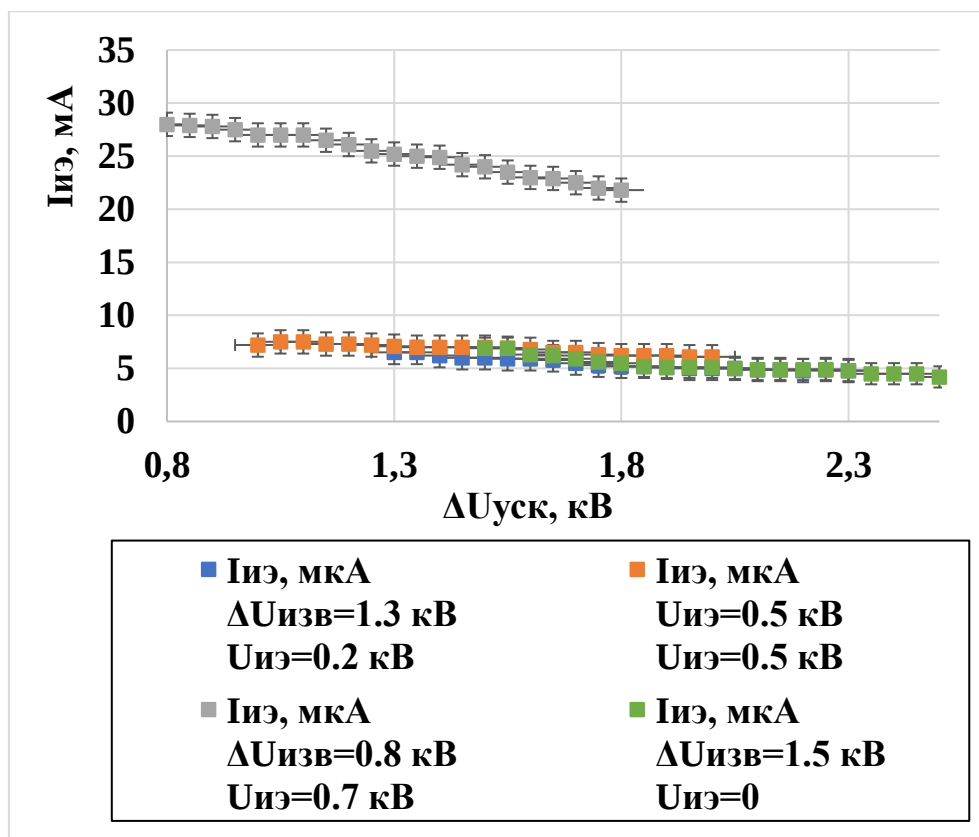


Рисунок 3.14 – Зависимость тока на ИЭ от ускоряющей разности потенциалов

Значения токов перехвата на ИЭ составляют 8 мкА и ниже в режимах с напряжениями на ИЭ, равными 0,2 кВ, 0,5 кВ, а также при нулевом потенциале на ИЭ. В режиме при извлекающем напряжении 0,7 кВ фиксируется рост тока до 22 – 29 мкА. Это связано с недостаточной извлекающей разностью потенциалов в первом межэлектродном зазоре между ЭЭ и ИЭ и, как следствие, преобладанием давления плазмы ГРК, что приводит к недофокусировке ИП.

Сравнение токов ИП трёх- и четырёхэлектродных СУ проводится при фиксированных извлекающем напряжении $U_{\text{изв}}$ 1,3 кВ, 1,0 кВ и 0,8 кВ, которые задавались изменением напряжения на ИЭ и при постоянном напряжении на ЭЭ, которое составляло $U_{\text{ЭЭ}}=1,5$ кВ. Режимы извлечения для трёхэлектродной СУ при напряжении на ЭЭ 0,8 кВ, 1,0 кВ и 1,5 кВ. На рисунках 3.15, 3.16, 3.17 представлены зависимости извлекаемого тока ИП от напряжения на УЭ.

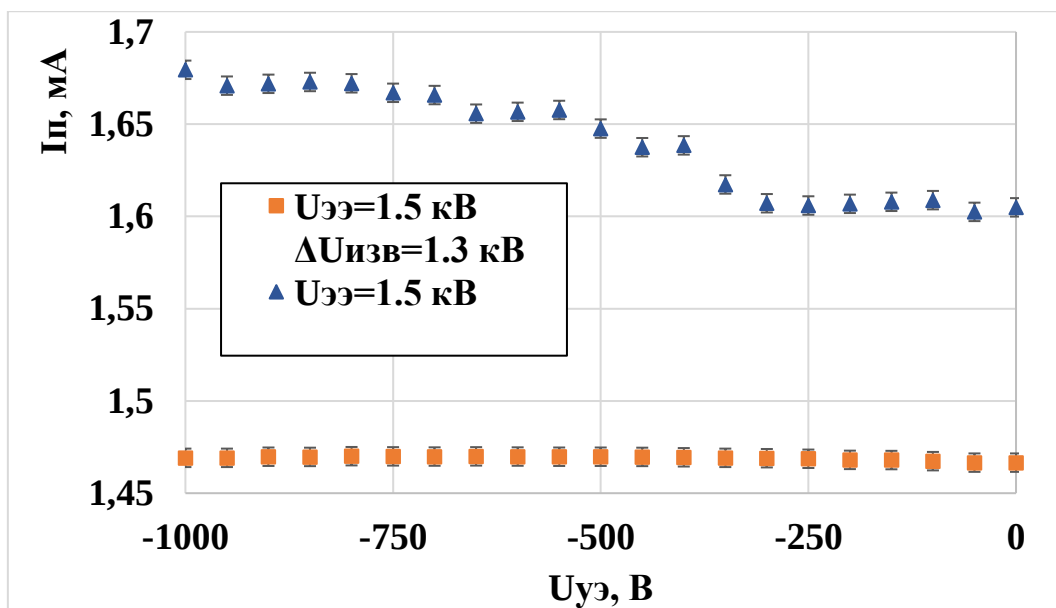


Рисунок 3.15 – Зависимость извлекаемого тока ИП от изменения напряжения на УЭ, при $\Gamma=0,3$

Среднее значения тока пучка для трёхэлектродной СУ примерно на 10 % выше, чем для четырёхэлектродной СУ. Это связано с различием в режимах извлечения: в четырёхэлектродной СУ напряжение извлечения зафиксировано и составляет 1,3 кВ, тогда как в трёхэлектродной СУ оно изменяется от 2,5 кВ до 1,5 кВ при изменении напряжения на УЭ от -1000 В до нуля. Обеспечить извлекающую разницу потенциалов 1,5 кВ в четырёхэлектродной СУ возможно при условии повышения напряжения на ЭЭ до 1,7 кВ, однако в силу ограничения по напряжению в источниках питания дальнейшее сравнение производилось на пониженных извлекающих разностях потенциалов. Это позволяет проводить сопоставление по извлекающей разности потенциалов $U_{изв}$, задаваемой в первом межэлектродном зазоре четырёхэлектродной СУ, и фактическому значению напряжения на ЭЭ в трёхэлектродной СУ. На рисунках 3.16, 3.17 представлены зависимости при одинаковых извлекающих потенциалах для обоих СУ.

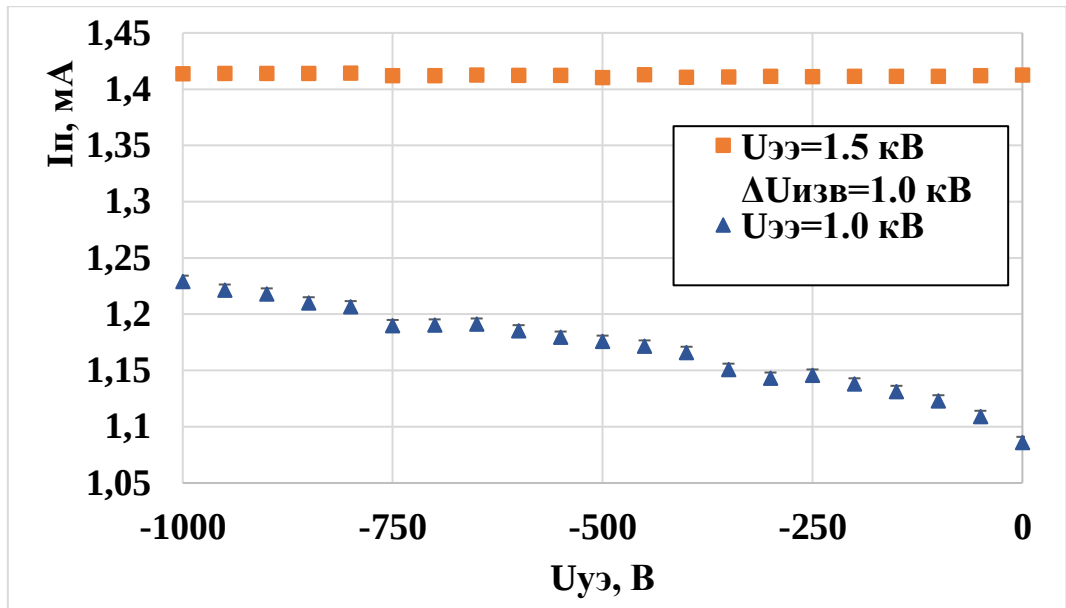


Рисунок 3.16 – Зависимость извлекаемого тока ИП от изменения напряжения на УЭ, при $\Gamma=0,8$

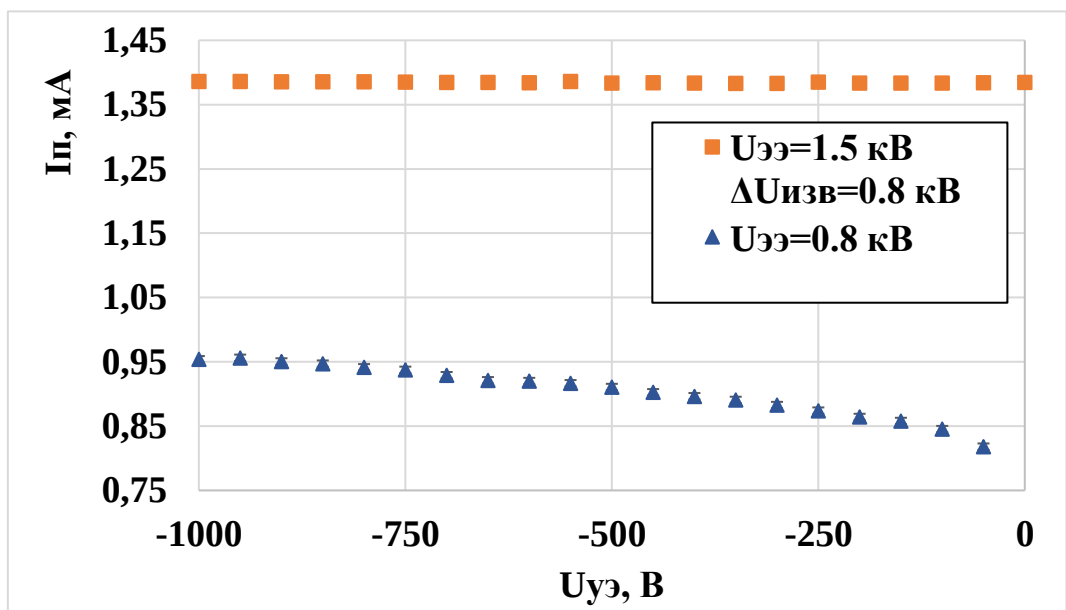


Рисунок 3.17 – Зависимость извлекаемого тока ИП от изменения напряжения на УЭ, при $\Gamma=1,2$

Одной из возможных причин заметного снижения извлекаемого тока в трехэлектродной СУ, которое наблюдается на рисунках 3.16, 3.17, может быть влияние объемного положительного заряда, возникающего за срезом лабораторной модели на извлекающую способность СУ. При одинаковых извлекающих

разностях потенциалов ток ИП у четырёхэлектродной СУ в среднем выше на 21% и 34% при $\Delta U_{\text{изв}}=0,8\text{кВ}$ и $\Delta U_{\text{изв}}=1,0\text{ кВ}$, по сравнению с токами ИП в трехэлектродной СУ. На этих режимах параметр Γ , являющийся отношением ускоряющей равности потенциалов к извлекающей, $\Gamma>0,8$, что хорошо согласуется с данными работы [45], в которой данный эффект был установлен расчётным путём при значении $\Gamma>0,6$.

Далее проводится сравнение токов перехвата на УЭ для обоих СУ, в трехэлектродной СУ ток перехвата – это фактически ток на УЭ, а в четырёхэлектродной это сумма токов, приходящих на ИЭ и УЭ. На рисунках 3.18, 3.19, 3.20 представлены зависимости тока перехвата от напряжения на УЭ для обоих СУ.

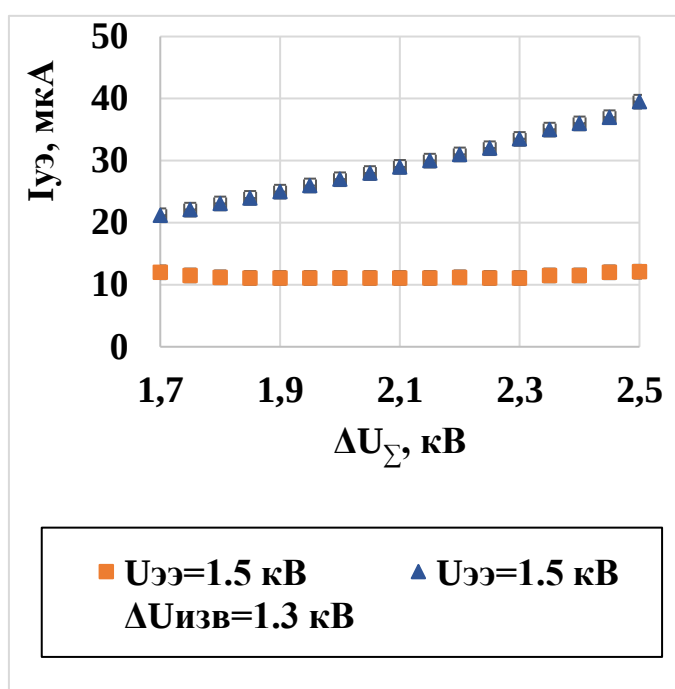


Рисунок 3.18 – Зависимость тока перехвата от разности потенциалов, при $\Gamma=0,3$

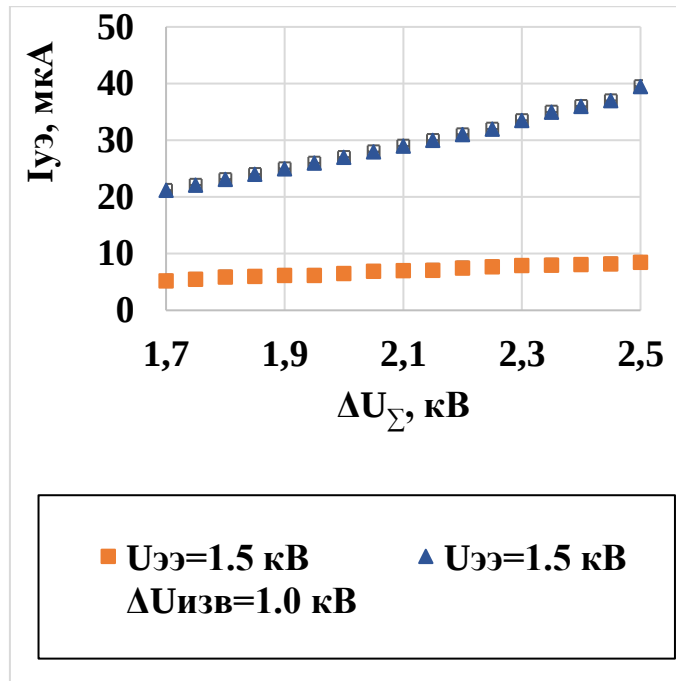


Рисунок 3.19 – Зависимость тока перехвата от разности потенциалов, при $\Gamma=0,8$

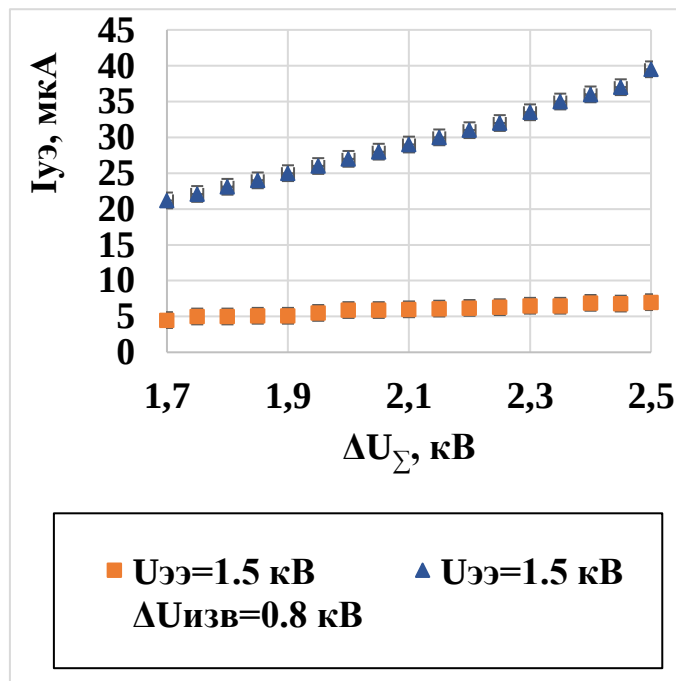


Рисунок 3.20 – Зависимость тока перехвата от разности потенциалов, при $\Gamma=1,2$

Во всех исследованных режимах наблюдается, что ИП в четырёхэлектродной СУ ионный пучок формируется и фокусируется уже в первом межэлектродном зазоре, вследствие чего влияние изменения напряжения на УЭ является

минимальным по сравнению с трехэлектродной СУ. В среднем уменьшение токов перехвата у четырехэлектродной СУ при извлекающей разности потенциалов 1,3 кВ и 1,0 кВ составило 37% и 51%. Суммарный ток перехвата в четырехэлектродной СУ составляет величину, примерно в два раза меньшую по сравнению с трехэлектродной СУ (1,4 % против 2,9 %).

В начале данного раздела была обоснована возможность дополнительного регулирования четырехэлектродной СУ путем изменения напряжения на ИЭ, при сохранении энергии пучка и скорости истечения. Следующим этапом стала демонстрация работы четырехэлектродной СУ в двух режимах. Первый режим должен обеспечить высокий удельный импульс, то есть при высоких значениях напряжения на ЭЭ. Для оптимальной конфигурации плазменного мениска, по максимальному извлекаемому току при заданной плотности плазмы ГРК задать напряжение на ИЭ при не большом падении потенциала, порядка 1-2 кВ, которое соответствует традиционным ИД. Затем во втором межэлектродном зазоре между ИЭ и УЭ организовывается зона ускорения, в которой падение потенциала может достигать более 4-6 кВ. При работе на втором режиме предлагается обнулить потенциал на ИЭ, что имитирует режим работы традиционной трехэлектродной СУ, в которой извлечение и ускорения ИП пучка происходят в межэлектродном зазоре между ЭЭ и УЭ. Этот режим будет обозначаться режимом дросселирования тяги. В рамках данного эксперимента было проведено исследование данного режима работы. На рисунке 3.21 представлены зависимости тока ИП от напряжения на УЭ для двух систем ускорения.

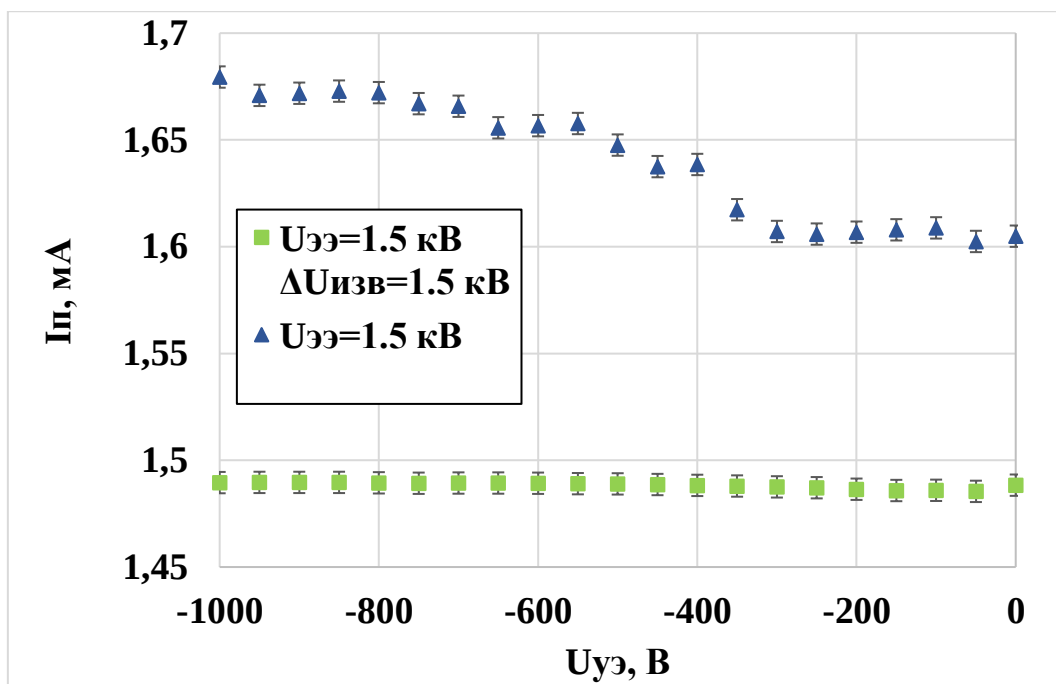


Рисунок 3.21 – Зависимость извлекаемого тока ИП от изменения напряжения на УЭ, при $\Gamma=0,2$

На рисунке 3.22 представлены зависимости тока перехвата от напряжения на УЭ для двух систем ускорения.

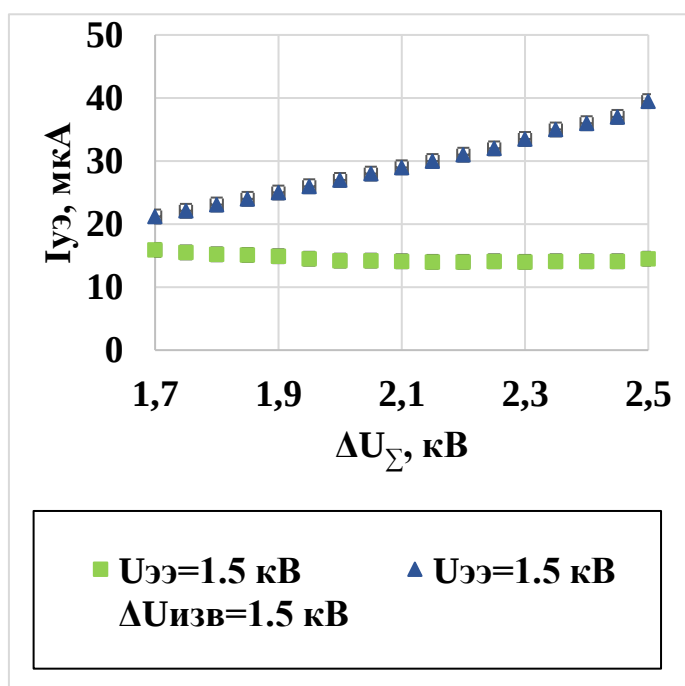


Рисунок 3.22 – Зависимость тока перехвата от разности потенциалов, при $\Gamma=0,2$

В результате сравнения четырёхэлектродной СУ, функционирующей в режиме трёхэлектродной (при нулевом потенциале на ИЭ), установлено, что ток ИП в трёхэлектродной СУ на 10 % выше, чем в четырёхэлектродной. Указанное различие обусловлено увеличением межэлектродного зазора в четырёхэлектродной схеме, который в данном режиме формируется между ЭЭ и УЭ и одновременно выполняет функции извлечения и ускорения пучка, аналогично трёхэлектродной конфигурации. При этом токи перехвата в трёхэлектродной СУ оказались на 26 % выше, чем в четырёхэлектродной. Изменение тока ИП в диапазоне напряжений на УЭ от -1000 В до 0 В составило 5 % для трёхэлектродной СУ и лишь 0,2 % для четырёхэлектродной, что свидетельствует о разделении областей извлечения и ускорения, то есть о двухступенчатости четырёхэлектродной СУ, что согласуется с выводами, полученными при варьировании потенциала на ИЭ. На рисунке 3.23 представлена диаграмма со значениями токов перехвата для трех- и четырехэлектродной СУ. Ток перехвата в четырехэлектродной СУ ниже во всем диапазоне работы.

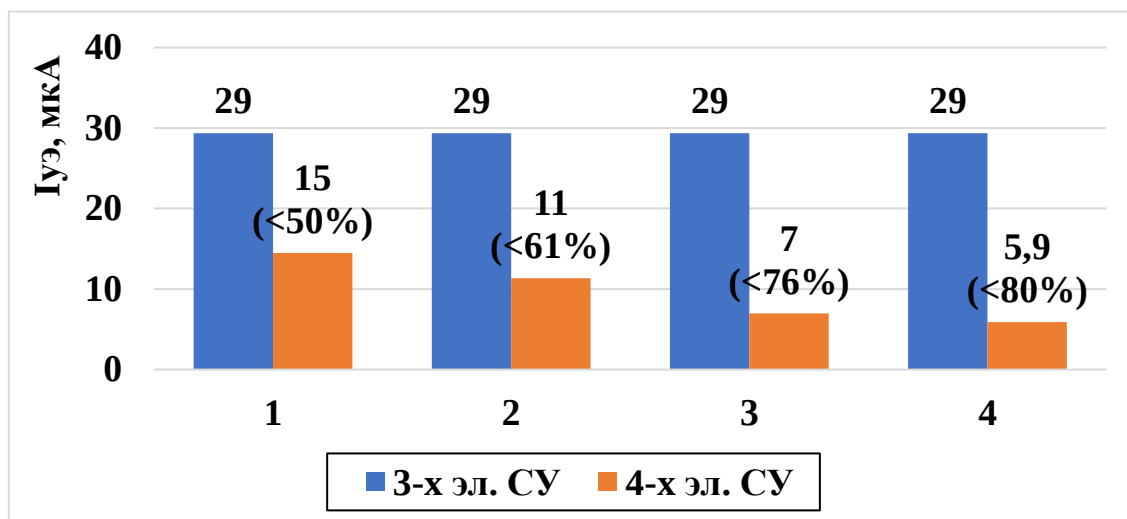


Рисунок 3.23 – Диаграмма сравнения тока «перехвата» на УЭ трех- и четырехэлектродных СУ в одинаковом диапазоне ΔU_{Σ}

1 – $U_{изв}=1,5$ кВ, 2 – $U_{изв}=1,3$ кВ, 3 – $U_{изв}=1,0$ кВ, 4 – $U_{изв}=0,8$ кВ

3.1.1 Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования

Расчеты проводились в программном продукте IOS-3D [38]. Программа IOS - 3D предназначена для расчета электрических полей и ионных потоков в трёхмерном пространстве с произвольной формой граничных поверхностей. Электрические поля рассчитываются путем решения уравнения Пуассона [25]:

$$\nabla^2 \varphi = -(\rho_i + \rho_e)/\varepsilon_0, \quad (3.7)$$

где φ - электрический потенциал, ρ_i , ρ_e — плотности зарядов ионов и электронов соответственно, ε_0 - диэлектрическая постоянная. Решение уравнения Пуассона проводится методом конечных разностей на ортогональной прямоугольной сетке. Система конечно-разностных уравнений решается методом итераций с заданным постоянным коэффициентом верхней релаксации или с ускорением по Чебышеву [25].

Граничные поверхности описываются набором планарных многоугольников. На каждой граничной поверхности может быть задано одно из трех граничных условий: условие Дирихле, при котором на выделенной поверхности задаётся постоянный потенциал; условие Неймана, означающее нулевое значение производной потенциала по направлению нормали к поверхности, ($dU/dn = 0$); условие трансляционной симметрии, при котором трансляционный вектор должен быть параллелен одной из осей координат. Самосогласованная задача решается в стационарном приближении. Уравнения движения ионов интегрируются с использованием метода с перешагиванием. Для расчета пространственного заряда ионов используется метод трубок тока [25].

Методика моделирования процесса вытягивания ионов из плазмы заимствована из более ранней двумерной численной модели GASEL [38]. Метод состоит в следующем. В расчетной области должна быть выделена занятая плазмой

область. Входными данными являются потенциал плазмы φ_p , плотность плазмы n_p и электронная температура T_e . При расчете траекторий трубок тока применяется следующий алгоритм. Начальная скорость рассчитывается на основании критерия Бома [25]:

$$V_{i0} = V_B \equiv \sqrt{k_B T_e / M_i}, \quad (3.8)$$

где V_B - Бомовская скорость, k_B - постоянная Больцмана, T_e - электронная температура и M_i - масса иона. Если в точке, расположенной внутри расчетной области, рассчитана траектория, и электрический потенциал в ней выше, чем заданный потенциал плазмы $\varphi > \varphi_p$, считается, что такая точка расположена внутри плазмы. В этой точке траектории электрическое поле считается равным нулю, и объёмный заряд обнуляется в соответствии с условием квазинейтральности. Если потенциал меньше, чем указанный потенциал плазмы, электрическое поле в точке рассчитывается по обычной интерполяционной процедуре. В последнем случае отрицательный объёмный заряд электронов добавляется к полному объёмному заряду в ближайших узлах расчетной сетки. Движение электронов не моделируется. Вместо этого полагается, что объёмный заряд электронов описывается уравнением Больцмана [25]:

$$\rho_e = - \exp \left[\frac{e(\varphi - \varphi_p)}{k_B T_e} \right]. \quad (3.9)$$

В представленном ниже исследовании используется ионно-оптическая система с круглыми апертурами, расположенными в узлах гексагонального паттерна, которая исследовалась ранее численно и экспериментально, как исходный эталонный вариант. Расположение апертур в ионно-оптической системе и вид расчетной области представлены на рисунке 3.24.

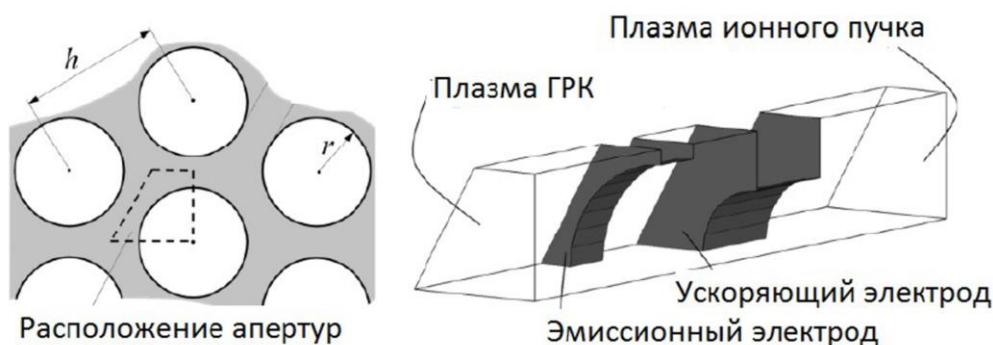


Рисунок 3.24 – Геометрия расчетной области [38]

Однозарядные ионы ксенона инжектировались в область моделирования через границу «Плазма ГРК». На этой границе был задан потенциал плазмы, равный от 520 до 1520 В. Потенциал эмиссионного электрода менялся от 500 В до 1500 В, в зависимости от режима работы, потенциал ускоряющего электрода равен -1000 В до -250 В. Граница «Плазма ионного пучка» имела нулевой потенциал. На всех боковых поверхностях было задано условие нулевого нормального электрического поля и условие зеркального отражения для ионов. Полный ионный ток $I_{ГРК}$, входящий в расчетную область через границу «Плазма ГРК», разделяется на три части: ток на эмиссионный электрод $I_{ээ}$; ток перехвата на ускоряющий электрод $I_{уэ}$; и ток ионного пучка $I_{п}$, который покидает расчетную область через границу «Плазма ионного пучка». В расчетах в качестве варьируемого параметра использовалась плотность тока ионов J_i , входящих в область моделирования через границу «Плазма ГРК». По результатам моделирования рассчитывалось отношение тока прямого попадания ионов на ускоряющий электрод $I_{уэ}$ к току элементарного пучка $I_{п}$. Ток элементарного пучка рассчитывался как ток ионов, выходящих из области моделирования через границу «Плазма ионного пучка». Также рассчитывалась эффективная прозрачность ионной оптики для ионов, как отношение тока элементарного пучка $I_{п}$ к полному току ионов $I_{ГРК}$, входящему в область моделирования через границу «Плазма ГРК». В рамках математического моделирования была задана геометрия элементарной ячейки, геометрия расчетной

области представлена на рисунке 3.25. В области плазмы ГРК задается плотность ионного тока исходя из экспериментальных данных, а также расход нейтральных атомов. В области плазмы пучка в результате численного моделирования рассчитывается ионный ток и плотность нейтралов [25].

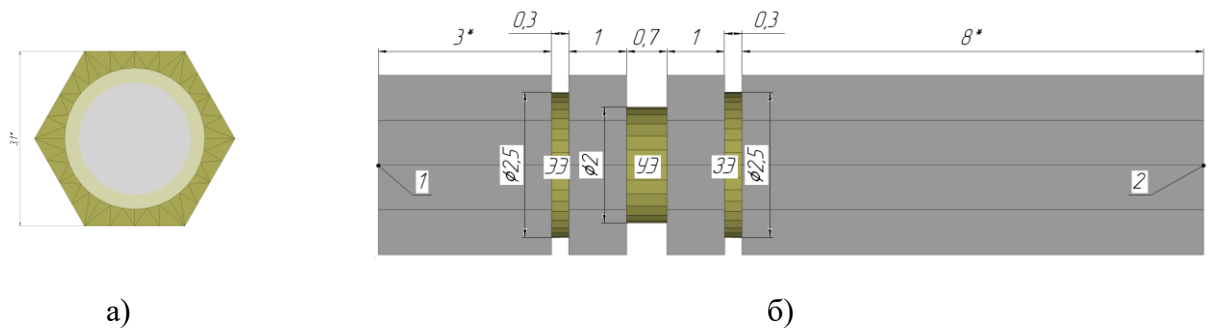


Рисунок 3.25 – Расчетная геометрия ячейки СУ

а) вид спереди со стороны ЭЭ; б) вид сбоку

Плотность ионного тока в области ГРК определялась по формуле:

$$j_i = \frac{I_{\text{п}}}{\sum \gamma S_{\text{отв.}}}, \quad (3.10)$$

где $S_{\text{отв.}}$ – площадь отверстий в ЭЭ, γ – кривизна плазменного мениска.

Данные по току использовались из эксперимента с варьированием напряжения на УЭ, которое находилось в диапазоне от -1000 В до 0.

Для определения вторичных процессов внутри СУ нужно знать концентрацию нейтральных. Эта величина задается в виде эквивалентного тока нейтральных атомов, который рассчитывается по формуле [25]:

$$I_a = \frac{\dot{m}_{\text{рт}}(1 - \beta)}{M_{\text{хе}}}. \quad (3.11)$$

Зная эквивалентный ток атомов в области ГРК, рассчитывалась плотность тока нейтральных атомов в области ГРК:

$$j_a = \frac{I_a}{\sum \gamma S_{\text{отв.}}} \quad (3.12)$$

Результаты расчета для ускоряющего напряжения 1,5 кВ и напряжения на УЭ -0,8 кВ представлены на рисунке 3.26.

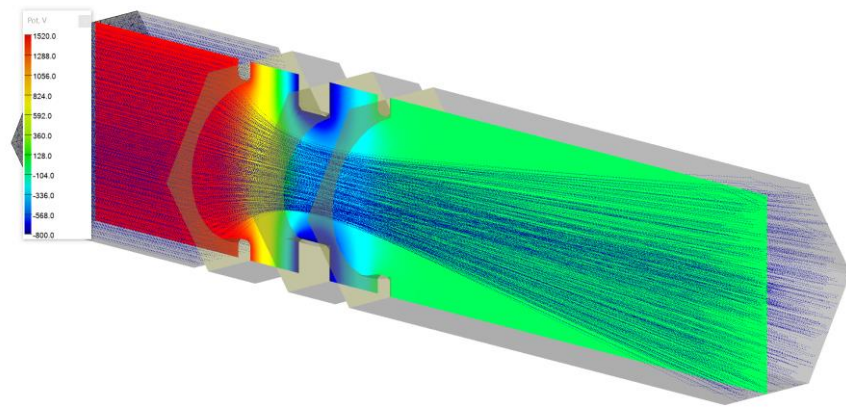


Рисунок 3.26 – Результаты расчета ячейки трехэлектродной СУ

На рисунке 3.27 представлено распределение потенциала вдоль оси ячейки и угловое распределение. Полуугол расходимости для данного режима составил 7,6°.

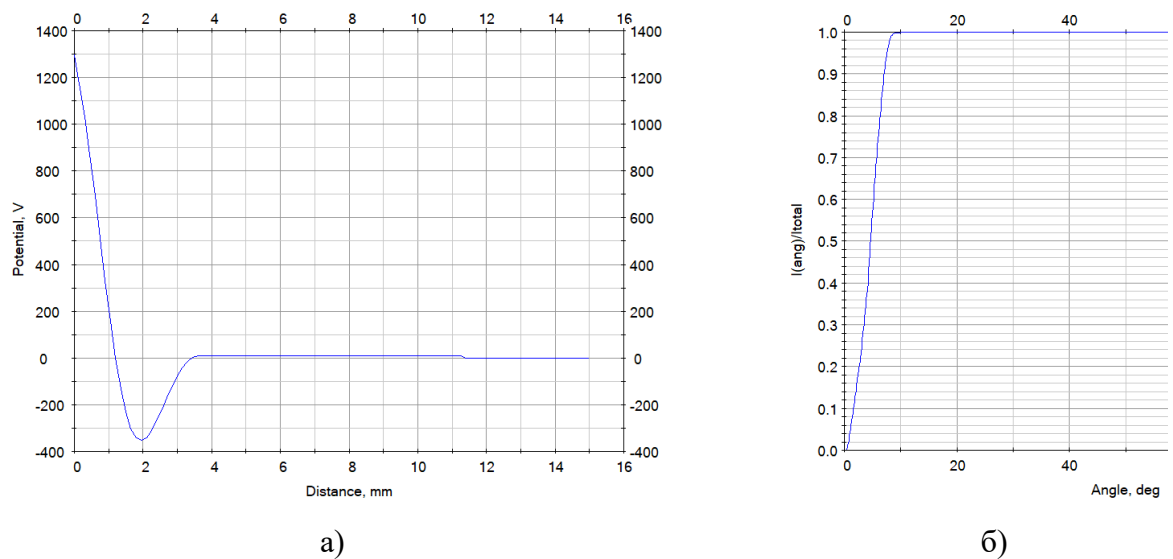


Рисунок 3.27 – Результаты расчета

а) Распределение потенциала вдоль оси ячейки; б) угловое распределение ионного пучка.

Для всей области работы определено значение плотности плазмы ГРК и плотность нейтральных атомов исходя из экспериментальных данных, результаты расчета извлекаемого тока ионного пучка от напряжения на УЭ представлены на рисунке 3.28.

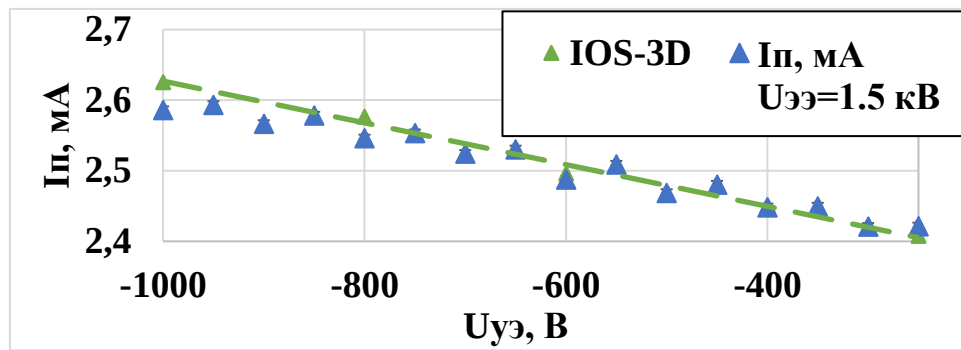


Рисунок 3.28 – Результаты расчета извлекаемого тока пучка от напряжения на УЭ и данные из эксперимента

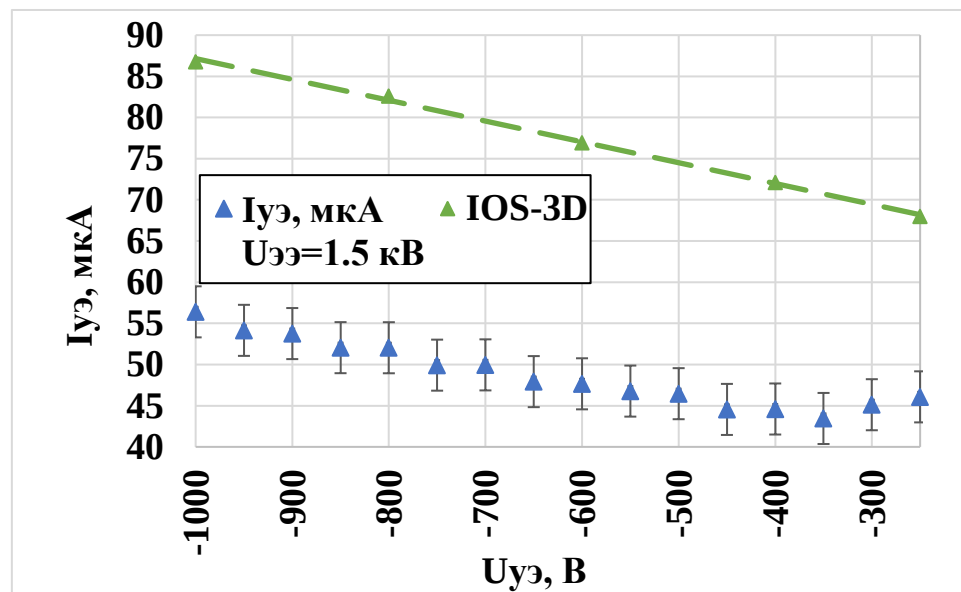


Рисунок 3.29 – Результаты расчетов суммарного тока на УЭ и экспериментальные данные

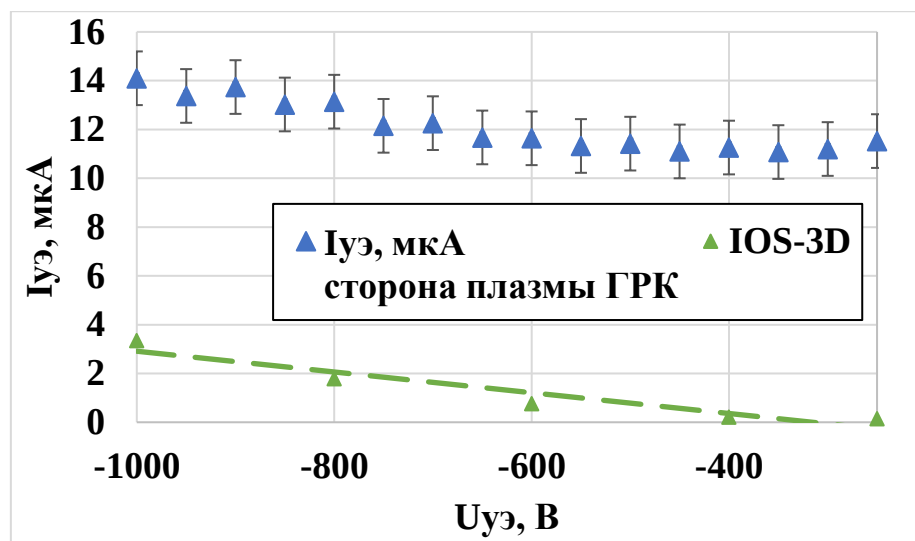


Рисунок 3.30 – Результаты расчетов тока на УЭ со стороны поверхности плазмы ГРК и экспериментальные данные

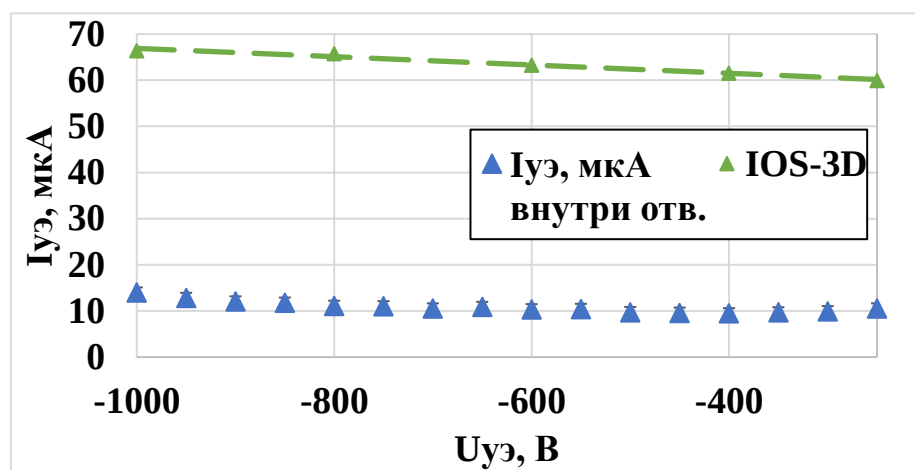


Рисунок 3.31 – Результаты расчетов тока на УЭ внутри отверстий и экспериментальные данные

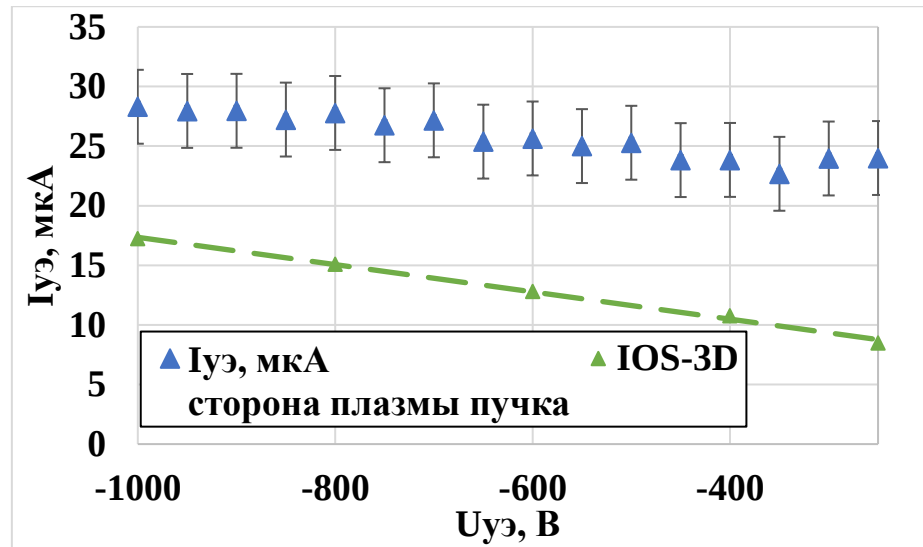


Рисунок 3.32 – Результаты расчетов тока на УЭ со стороны плазмы ионного пучка и экспериментальные данные

На рисунке 3.33 представлены результаты расчета извлекаемого тока пучка от напряжения на УЭ для трех- и четырехэлектродной СУ и данные из контрольной серии экспериментов. Плотность ионного тока составляла $j_i=41 \text{ А/м}^2$, что согласуется с экспериментальными данными, погрешность менее 5 %. Результаты расчета извлекаемого тока пучка показали полную сходимость с экспериментом.

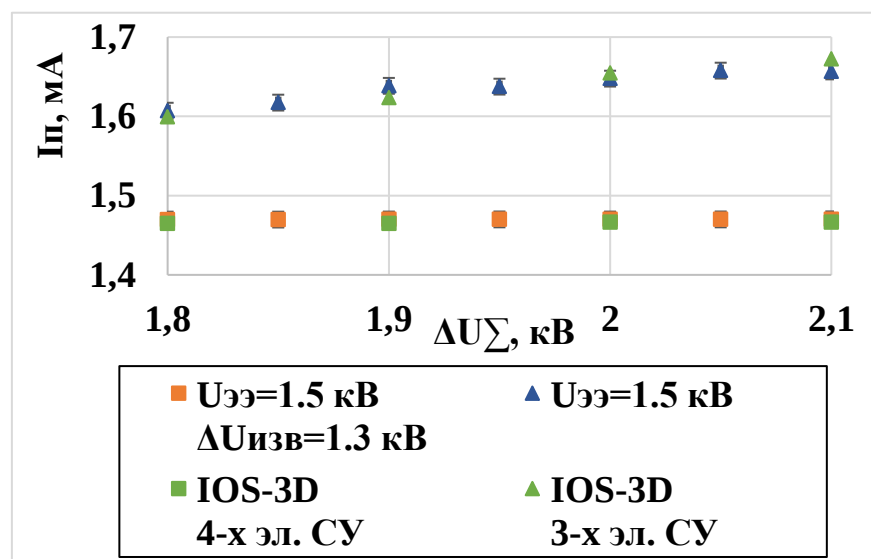


Рисунок 3.33 – Результаты расчета извлекаемого тока пучка от напряжения на УЭ для трех- и четырехэлектродной СУ и данные из эксперимента

3.2 Заключение по Главе 3

Проведено экспериментальное и расчётное исследование вторичных процессов ионообразования в трёх- и четырёхэлектродных СУ. При энергии ионов 1,5 кэВ в трёхэлектродной СУ доля вторичных ионов, приходящихся на поверхности УЭ, составила: 0,6 % – для поверхности, обращённой к ГРК; 0,5 % – внутри отверстий; 1,2% – для поверхности, обращённой к плазме пучка. Суммарный ток на УЭ в этом случае не превышал 2,3 % от тока пучка.

В эксперименте четырёхэлектродная СУ в составе КЛАН-53-3.4 обеспечила снижение тока перехвата на УЭ по сравнению с трёхэлектродной СУ, величина выигрыша составила от 50-83 % в зависимости от режима работы. Полученные данные позволяют утверждать о возможном увеличении ресурса ИД с четырёхэлектродными СУ за счёт существенного снижения вторичных токов на УЭ, определяющих интенсивность эрозии электрода, что в свою очередь определяет ресурс двигателя. На основании совокупности полученных экспериментальных данных можно заключить, что четырёхэлектродная СУ может быть рекомендована к применению в ИД.

В случае существующих трехэлектродных СУ для достижения сверхвысоких УИ потребуется варьирование сразу тремя параметрами: расходом рабочего тела, ВЧ мощностью и разностью потенциалов между ЭЭ и УЭ при сохранении максимальной эффективности извлечения и фокусировки ИП. При использовании четырёхэлектродной СУ возможно регулировать тягу и удельный импульс с изменением одного параметра, а именно разности потенциалов во втором межэлектродном зазоре, при сохранении разности потенциалов в первом межэлектродном зазоре и сохранении тока ионного пучка и его энергии.

Глава 4 Исследование лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения

4.1 Расчетная оценка применения четырёхэлектродной системы ускорения в составе лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя

Оценка применения четырёхэлектродной СУ проводилась расчетным методом для лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя ВЧИД с диаметром пучка 80 мм, которая была изучена авторами работ [6]. Опираясь на обширную базу экспериментальных данных по этой лабораторной модели, выполнены оценочные расчеты этого двигателя с применением четырёхэлектродной СУ. В данном разделе для расчета использовались экспериментальные данные работы [19].

4.1.1 Оценка интегральных характеристик высокочастотного ионного двигателя

Характерные для высокочастотного разряда экспериментальные зависимости ВЧ мощности от расхода рабочего тела по постоянному току ионного пучка, полученные для рассматриваемой в рамках данной работы лабораторной модели ВЧИД с диаметром пучка 80 мм, приведены на рисунке 4.1.

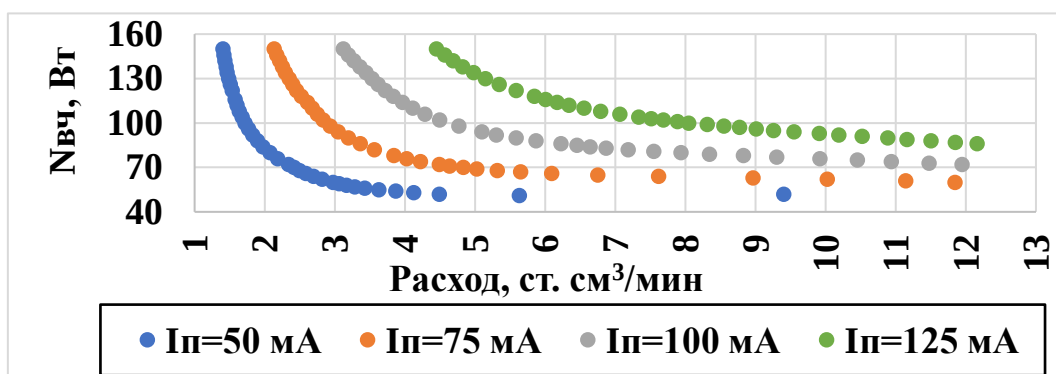


Рисунок 4.1 - Зависимость ВЧ мощности лабораторной модели ВЧИД от расхода ксенона при разных токах пучка [19].

Используемые для проведения расчётных оценок экспериментальные данные зависимости извлекаемого ионного тока пучка от расхода РТ при постоянной ВЧ мощности показаны на рисунке 4.2.

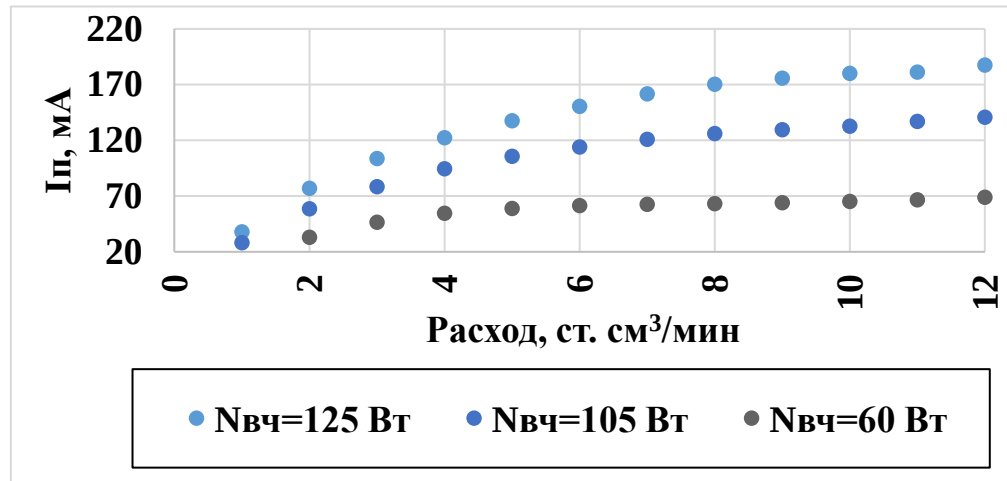


Рисунок 4.2 - Зависимость извлекаемого ионного тока от расхода РТ, при мощности ВЧ 60 Вт, 105 Вт и 150 Вт лабораторной модели с диаметром пучка 80 мм [19].

Одними из основных расчетных параметров ИД являются цена иона C_i , это параметр, определяющий эффективность вклада ВЧ мощности в разряд:

$$C_i = \frac{N_{\text{ВЧ}}}{I_{\text{п}}}, \quad (4.1)$$

где $N_{\text{ВЧ}}$ – ВЧ мощность, Вт; $I_{\text{п}}$ – ток извлекаемого ионного пучка, А.

Так же немало важен коэффициент использования рабочего тела β , который показывает степень вклада в тягу расхода рабочего тела, подаваемого в ГРК:

$$\beta = \frac{I_{\text{п}} M_{\text{Xe}}}{e \dot{m}}, \quad (4.2)$$

где M_{Xe} – масса иона ксенона, кг; $\dot{m}$ – массовый расход ксенона, кг/с.

Поэтому тягу ВЧИД обычно определяют только по ионной компоненте:

$$P = \dot{m}_i V_i. \quad (4.3)$$

При этом массовый расход ионов РТ $\dot{m}_i$ через СУ можно найти по известной величине извлекаемого тока ионного пучка I_i :

$$\dot{m}_i = \frac{I_i M_i}{e}, \quad (4.4)$$

где M_i – масса иона РТ, кг.

Скорость ионов V_i , которая зависит от значения заданного потенциала на эмиссионном электроде $U_{ээ}$, определить из следующего соотношения:

$$V_i = \sqrt{\frac{U_{ээ} 2e}{M_i}}. \quad (4.5)$$

Зная массовый расход ионов, можно оценить величину удельного импульса тяги:

$$I_{уд} = \frac{P}{\dot{m}_{РТ}} = \frac{\dot{m}_i V_i}{\dot{m}_{РТ}} = \beta V_i. \quad (4.6)$$

При этом полный (тяговый) КПД ВЧИД будет определяться как:

$$\eta_t = \frac{P^2}{2\dot{m}_{РТ} N}, \quad (4.7)$$

где $N = N_{ВЧ} + N_{п} + N_{кн}$ – полная потребляемая ВЧИД электрическая мощность, Вт; $N_{ВЧ}$ –приходящая от ВЧ генератора мощность, Вт; $N_{п} = I_{п} U_{ээ}$ – мощность, затрачиваемая на ускорение ионного пучка, Вт; $N_{кн}$ – мощность, потребляемая катодом-нейтрализатором, Вт (в рамках этого эксперимента $N_{кн} = 0$).

Плотность тяги ВЧИД, определяется следующим соотношением:

$$P_s = \frac{P}{S_{\text{эл}}}, \quad (4.8)$$

где $S_{\text{эл}}$ – площадь ЭЭ.

При проведении оценочных расчетов предполагалось, что суммарная мощность, выделенная с КА на двигатель, лежит в диапазоне от 300 Вт до 350 Вт. Зависимость тягового КПД от общей мощности двигателя представлена на рисунке 4.3. Режимы с напряжением на ЭЭ, составляющем 4000 В эмитируют четырехэлектродную СУ в составе ВЧИД-8 [2, 3, 4]. Результаты расчётных оценок интегральных характеристик двухступенчатой схемы ускорения ионов, а именно тяги, удельного импульса тяги, коэффициента использования рабочего тела и полного (тягового) КПД при различных значениях вкладываемой в плазменный разряд ВЧ-мощности и расходе рабочего газа представлены на рисунках 4.3- 4.8 [29].

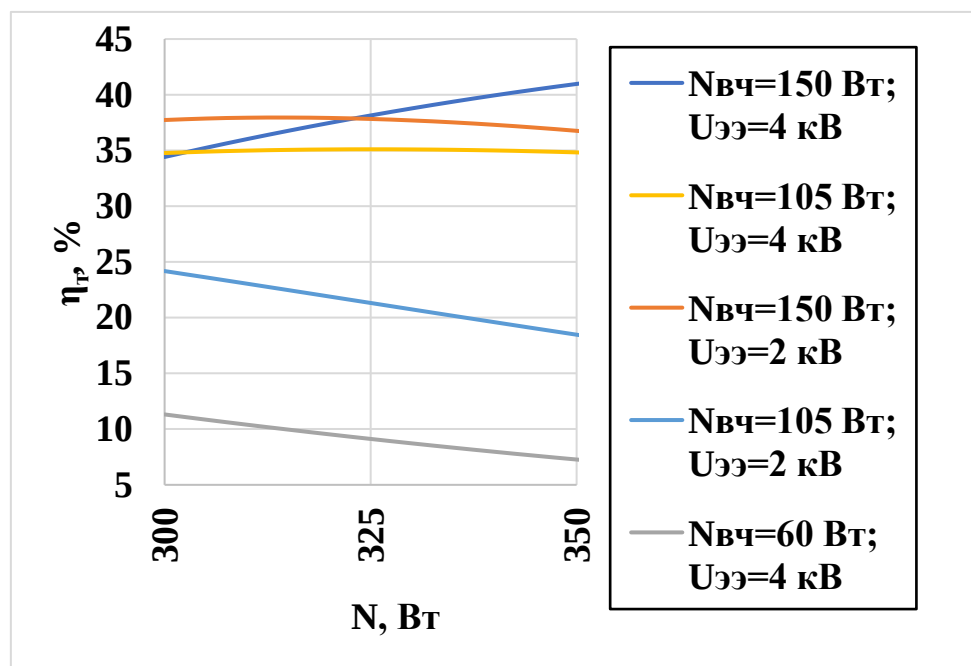


Рисунок 4.3 - Зависимость тягового КПД от общей мощности двигателя

В области наиболее высокого тягового КПД, а именно около 38% имеется точка пересечения двух режимов при постоянной ВЧ мощности $P_{ВЧ}=150$ Вт и ускоряющих напряжениях ($U_{ээ} = 2$ кВ и $U_{ээ} = 4$ кВ). Мощность, соответствующая оптимальной работе двигателя на двух режимах, составляет 323 Вт. Для дальнейших расчетов общая мощность двигателя была принята 325 Вт. Два рассматриваемых режима работы, лежат на пересечении с вертикальной линией на рисунках 4.4 - 4.8. По экспериментальным данным были построены зависимости ионного тока пучка от общей мощности двигателя, при фиксированной ВЧ мощности $P_{ВЧ}=150$ Вт и ускоряющих напряжениях ($U_{ээ}=2$ кВ и $U_{ээ}=4$ кВ). При принятой общей мощности двигателя ($P=325$ Вт), были определены токи ионного пучка для двух режимов работы. Графики зависимости извлекаемого тока ионного пучка от общей мощности двигателя представлены на рисунке 4.4 [29].

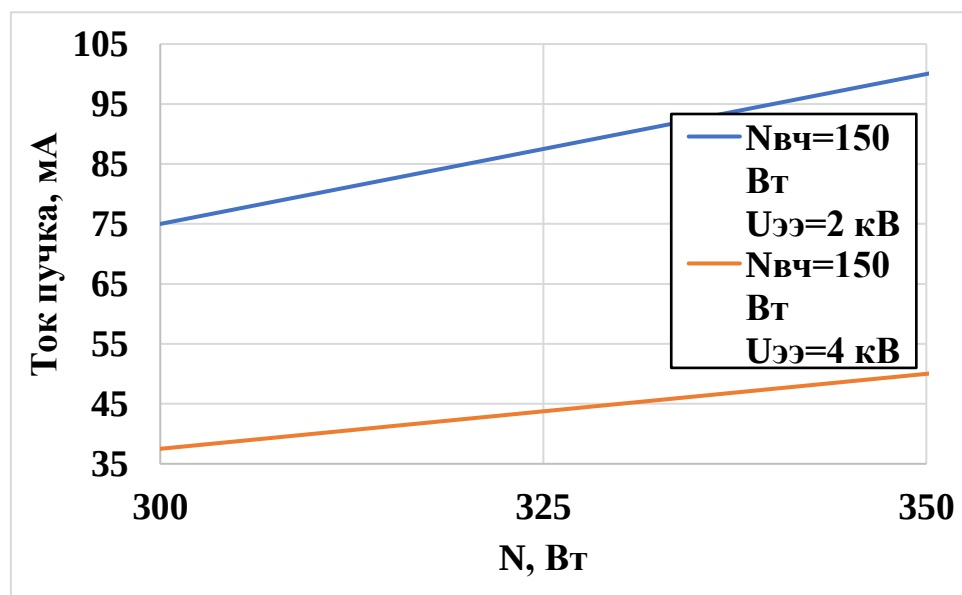


Рисунок 4.4 - Зависимость извлекаемого тока пучка от общей мощности двигателя

На первом режиме значение тока ионного пучка составляет порядка 88 мА, а на втором — 44 мА. Соответствующие этим режимам расходы РТ можно увидеть на представленной на рисунке 4.5 зависимости расхода ксенона от общей мощности двигателя [29].

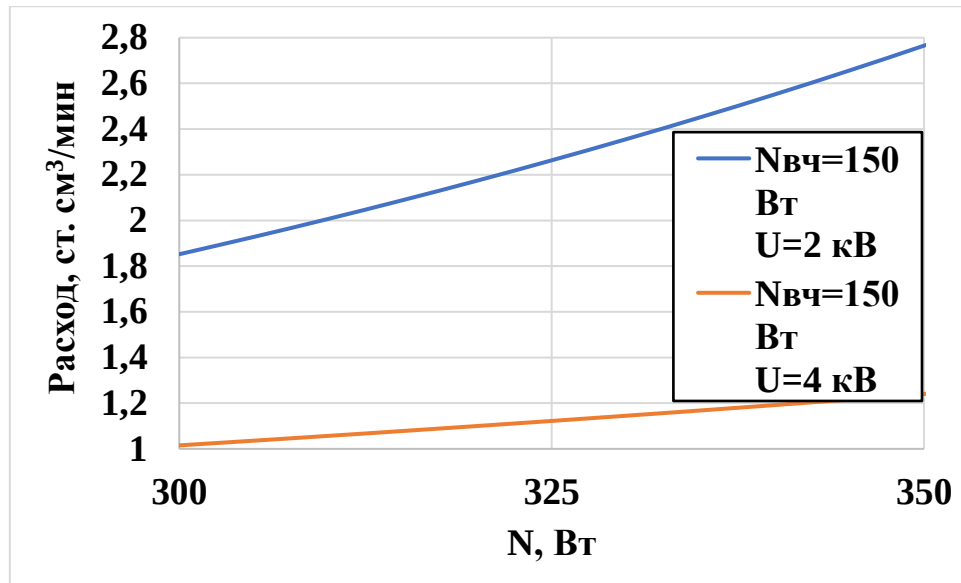


Рисунок 4.5 - Зависимость расхода рабочего тела от общей мощности двигателя

Расход РТ на первом режиме с ускоряющим напряжением 2 кВ составляет 2,26 ст. см³/мин, а на втором режиме с ускоряющим напряжением 4 кВ – 1,12 ст. см³/мин. Зависимость КиРТ от мощности двигателя представлена на рисунке 4.6.

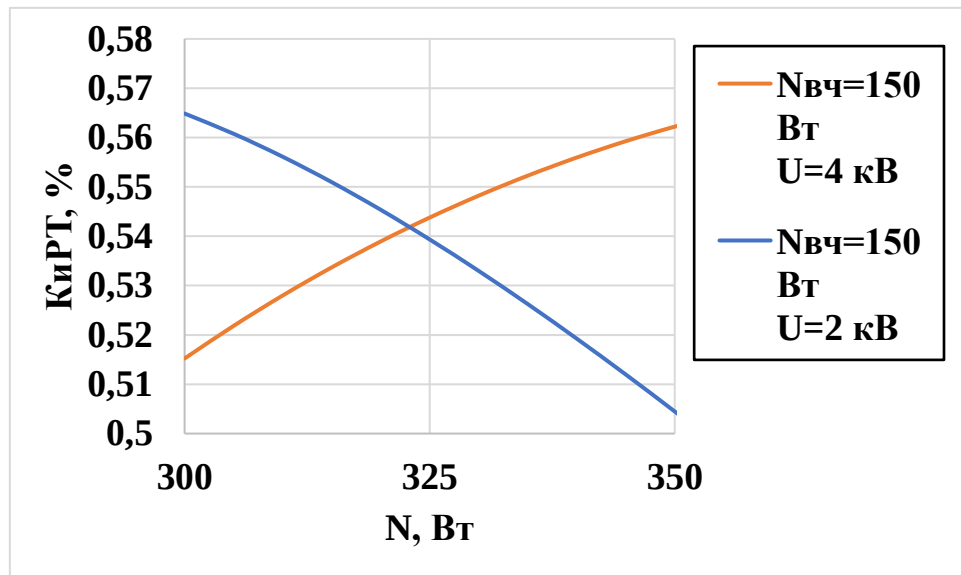


Рисунок 4.6 - Зависимость КИРТ от общей мощности двигателя

Полученная расчётная зависимость тяги от мощности двигателя представлена на рисунке 4.7.

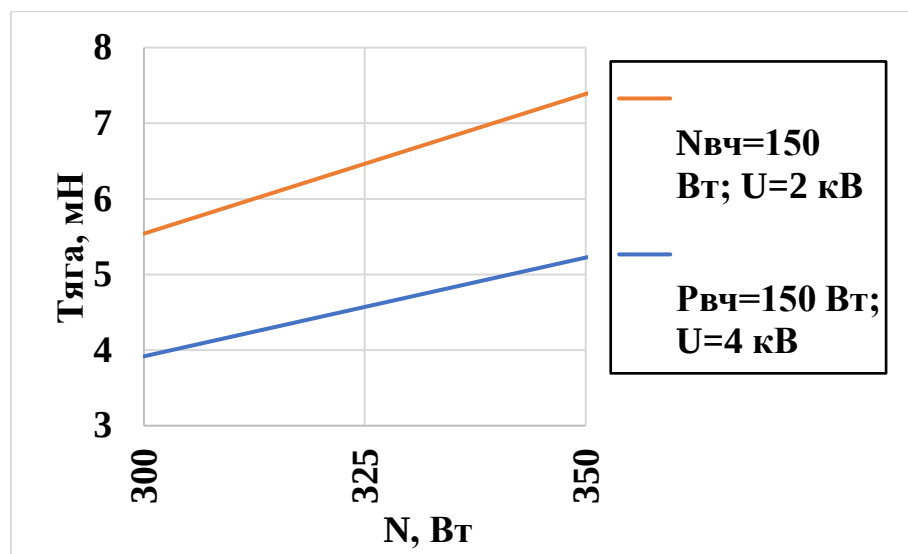


Рисунок 4.7 - Зависимость тяги от общей мощности двигателя

Согласно расчётам, тяга двигателя на первом режиме с ускоряющим напряжением 2 кВ составит 6,92 мН, а на втором с ускоряющим напряжением 4 кВ – 4,57 мН. Зависимость удельного импульса от мощности двигателя представлена на рисунке 4.8 [29].

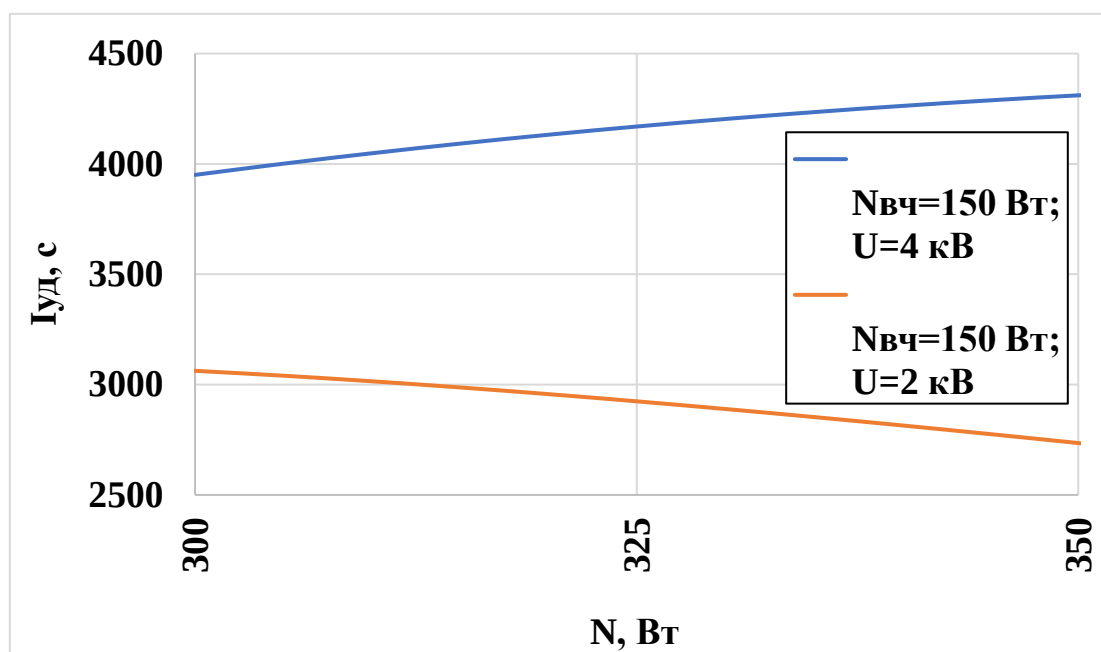


Рисунок 4.8 - Зависимость удельного импульса тяги от общей мощности двигателя

Обобщённые данные результатов расчетов для двух выбранных режимов работы двигателя сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Интегральные характеристики двухрежимного ВЧИД [1]

Параметр	Режим 1	Режим 2
N, Вт	325	
N _{вч} , Вт	150	
U _{ээ} , В	2000	4000
I _п , мА	88	44
Расход, ст. см ³ /мин (мг/с)	2,26 (0,22)	1,12 (0,10)
КиРТ	0,54	
F, мН	6,92	4,57
Удельный импульс, с	2924	4169
Тяговый КПД, %	38%	

4.1.2 Моделирование четырёхэлектродной системы ускорения

В данном разделе представлены результаты моделирования двух режимов работы двигателя и сравнение полученных данных для трех и четырёхэлектродной СУ. Параметры плазмы, которые были получены в ходе физико-математического моделирования ВЧ разряда в ГРК рассматриваемого ВЧИД и соответствующие выбранным двум режимам работы двигателя представлены в таблице 4.2 [29].

Таблица 4.2 Параметры плазмы лабораторного образца двухрежимного ВЧИД

Параметр:	Режим 1		Режим 2	
Область ГРК	Центральная	Периферийная	Центральная	Периферийная
T _e , эВ	3,78		2,84	
n _e × 10 ¹⁷ , 1/м ³	2,23	1,42	1,41	0,71
j _i , А/м ²	59,4	37,7	32,5	16,3

Геометрические параметры трех и четырёхэлектродной СУ лабораторного образца двухрежимного ВЧИД представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Геометрические параметры трех и четырёхэлектродной СУ лабораторного образца двухрежимного ВЧИД

Параметр:	Трёхэлектродная СУ	Четырёхэлектродная СУ
Диаметр отверстий ЭЭ, мм	2,5	
Диаметр отверстий ИЭ, мм	-	1,7
Диаметр отверстий УЭ, мм	1,7	
Диаметр отверстий ЗЭ, мм	2,5	
Толщина ЭЭ, мм	0,3	
Толщина ИЭ, мм	-	1
Толщина УЭ, мм	1,5	
Толщина ЗЭ, мм	1	
Межэлектродный зазор ЭЭ-ИЭ, мм	-	0,7
Межэлектродный зазор ЭЭ-УЭ, мм	0,7	-
Межэлектродный зазор ИЭ-УЭ, мм	-	0,7
Межэлектродный зазор УЭ-ЗЭ, мм	0,7	

Для проведения сравнительного анализа трех и четырёхэлектродной ускорительной системы, были использованы геометрические параметры СУ из работы. В рассматриваемой лабораторной модели ВЧИД замедляющий электрод был выполнен в виде кольцевого фланца, поэтому траекториями ионов, которые выпадают на ЗЭ можно пренебречь. На ресурс двигателя в основном влияет износ УЭ, который может быть подвержен эрозии как от первичных ионов, так и от ионов перезарядки. По углу расходимости потока можно качественно оценить долю первичного ионного пучка, выпадающую на УЭ [29].

На первом режиме работы с повышенной тягой, двигатель работает в близком к номинальному режиме, поэтому форма плазменного мениска и полуугол расходимости близки к оптимальным [77]. Для каждого режима расчет проводился для центральной и периферийной области ГРК, исходя из учета неравномерности

плазмы. Траектории ионного пучка в трехэлектродной СУ для первого режима представлены на рисунке 4.9 [29].

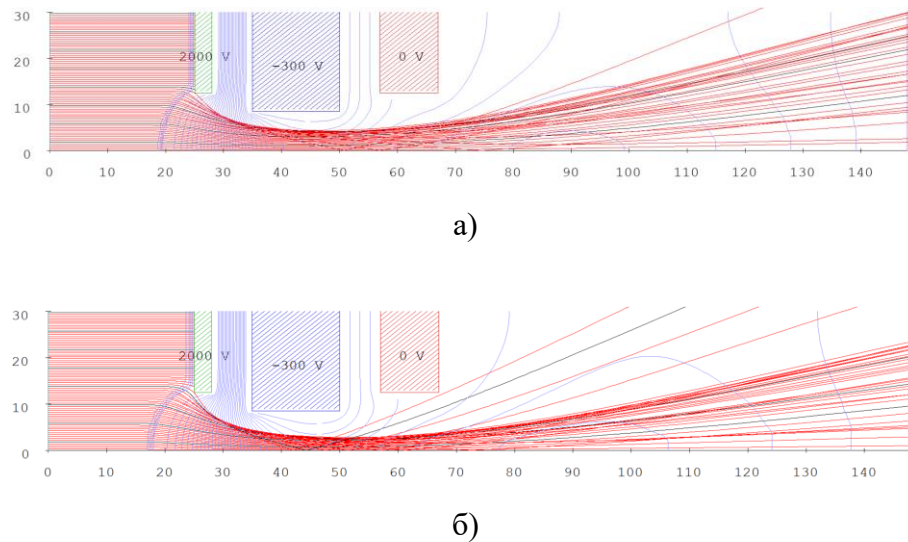
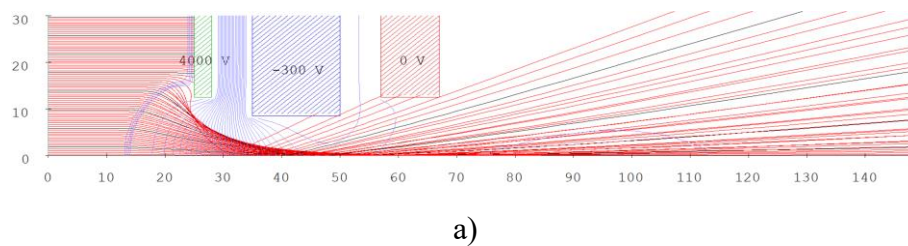


Рисунок 4.9 - Траектории ионов в трехэлектродной СУ на Режиме №1

а) центральная область ГРК; б) периферийная область ГРК.

В случае перехода на такой конфигурации СУ в режим повышенного удельного импульса (Режим №2 с ускоряющим потенциалом 4 кВ) будет происходить значительное уменьшение радиуса плазменного мениска, а следовательно, сильная расфокусировка ионного пучка из-за совместного снижения плотности плазмы (на втором режиме извлекаемый ионный ток приблизительно в 2 раза меньше) и увеличения напряженности электрического поля. Траектории ионного пучка в трехэлектродной СУ для второго режима представлены на рисунке 4.11.



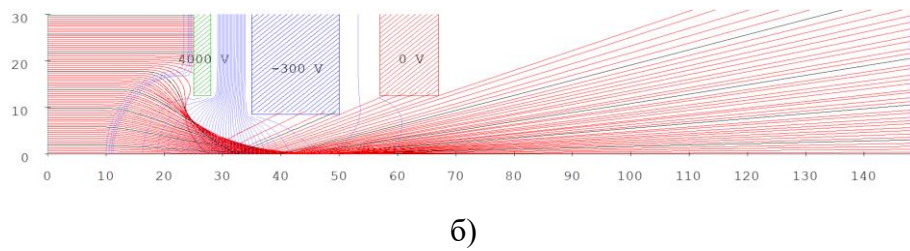
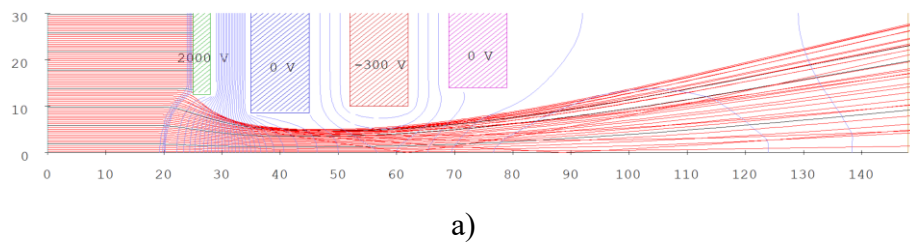


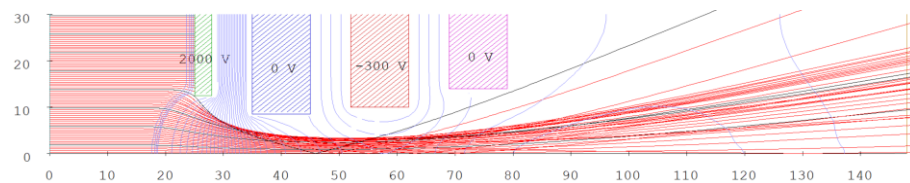
Рисунок 4.10 - Траектории ионов в трехэлектродной СУ на Режиме №2.

а) центральная область ГРК; б) периферийная область ГРК.

На первом режиме работы в составе четырёхэлектродной СУ предполагается, что ИЭ будет находиться под нулевым потенциалом. Этот режим будет аналогом номинального режима работы трехэлектродной СУ (Режима №1). Траектории ионного пучка в четырёхэлектродной СУ для первого режима представлены на рисунке 4.11 [29].



а)



б)

Рисунок 4.11 - Траектории ионов в четырёхэлектродной СУ на режиме № 1:

а) центральная область ГРК; б) периферийная область ГРК.

Согласно расчётам при переходе на четырехэлектродную СУ полуугол расходимости уменьшится с $\sim 26^\circ$ до $\sim 16,3^\circ$.

На втором режиме четырехэлектродная СУ позволяет перераспределить 4 кВ ускоряющего напряжения, сохранив соответствующую номинальному режиму работы извлекающую разность потенциалов на уровне 2 кВ. Это обеспечивает

сохранение формы плазменного мениска, близкой к форме при номинальном режиме работы, что улучшает фокусировку (полуугол расходимости снижается с $\sim 32,6^\circ$ до $\sim 20,7^\circ$). Траектории ионного пучка в четырёхэлектродной СУ для второго режима представлены на рисунке 4.12 [29].

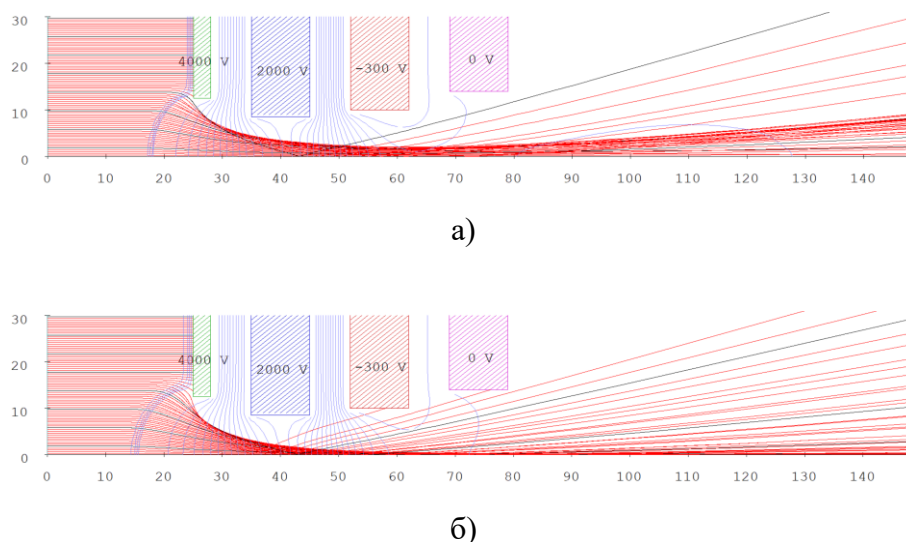


Рисунок 4.12 - Траектории ионов в четырёхэлектродной СУ на режиме № 2:

а) центральная область ГРК; б) периферийная область ГРК.

Результаты расчетов ионного пучка для трех и четырёхэлектродной СУ представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Результаты расчетов ионного пучка для трех- и четырёхэлектродной СУ

Параметр	Режим 1		Режим 2	
Трехэлектродная СУ				
Область ГРК	Центральная	Периферийная	Центральная	Периферийная
$\alpha(95\%)^\circ$	26	30	31,8	33,5
Четырехэлектродная СУ				
Область ГРК	Центральная	Периферийная	Центральная	Периферийная
$\alpha(95\%)^\circ$	16,3	26,2	19,3	22,8

Выполненное на основе экспериментальных данных ВЧИД с диаметром пучка 80 мм расчетное исследование четырёхэлектродной СУ показало возможность работы двигателя на двух режимах с постоянной потребляемой общей

мощностью 325 Вт. По оценкам на рассмотренной конфигурации ВЧИД на режиме повышенной тяги можно ожидать тягу на уровне 6,92 мН и УИ порядка 2924 с, а на режиме повышенного удельного импульса можно ожидать тягу 4,57 мН и УИ 4169 с. Общий КПД лабораторной модели при этом на двух режимах будет составлять около 38%. Показано явное преимущество в обеспечении лучшей фокусировки ионного пучка в четырёхэлектродной СУ. Полуугол расходимости в двух режимах снизился примерно на 35%. Это дает основание продолжить исследования в части расчетной и экспериментальной отработки двухрежимного ВЧИД с четырёхэлектродной СУ [29].

4.2 Расчетное и экспериментальное исследования лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения

Целью данного исследования является экспериментальная отработка режимов лабораторной модели ВЧИД с четырёхэлектродной СУ. Научный задел применения такой СУ в составе ИД был получен при экспериментальных исследованиях лабораторной модели двигателя КЛАН-53-3.4. Для проведения эксперимента применялся полноразмерный лабораторный образец высокочастотного ионного двигателя ВЧИД-15-4 с диаметром ионного пучка 150 мм и мощностью до 2,5 кВт, для которого, в рамках настоящей работы, была разработана и изготовлена четырехэлектродная СУ [26, 29].

4.2.1 Моделирование параметров плазмы в газоразрядной камере и конфигурации ионного пучка

Для оценки параметров плазмы ГРК лабораторной модели ВЧИД с диаметром пучка 150 мм была использована математическая модель автора работы [26, 27]. Для расчёта использовалась осесимметричная двумерная постановка задачи, которая решалась в программном пакете COMSOL Multiphysics [39]. Процесс моделирования можно при этом условно разделить на следующие этапы:

- Построение упрощённой геометрии основных элементов двигателя (РК, индуктора, газораспределителя, СУ).
- Внесение с учётом принятых допущений расчётных соотношений, описывающих рассматриваемые процессы в плазме (включая начальные и граничные условия).
- Построение расчётной адаптивной сетки конечных элементов.
- Проведение расчётов.

Начальными условиями, необходимыми для расчёта, являются: частота $f_{ВЧ}$ и сила тока $I_{инд}$ в индукторе, температура поверхности внутренней стенки РК T_w , массовый расход РТ $\dot{m}$ и прозрачность электродов СУ ($\sigma_{ээ}$ – эмиссионного и $\sigma_{уэ}$ – ускоряющего) [17]. Кроме того, задаются начальные значения температуры T_e и концентрации электронов n_e , а также концентрация атомов ксенона n_a . В рамках модели решалось пять связанных подзадач [26]:

1. Расчёт распределения электромагнитного поля в области РК.
2. Нахождение распределения дополнительного постоянного магнитного поля.
3. Расчёт распределения концентрации атомов ксенона по объёму РК.
4. Получение распределения концентрации и эффективной температуры электронов в РК.

Входные данные представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Входные данные для расчета

ВЧИД-15-4	
Расход рабочего тела, мг/с	0,7
Ток в индукторе, А	2
Прозрачность ЭЭ	0,6
Прозрачность УЭ	0,45

Результаты расчетов представлены на рисунках. Температуры электронов по объёму ГРК ВЧИД-15-4 представлены на рисунке 4.13.

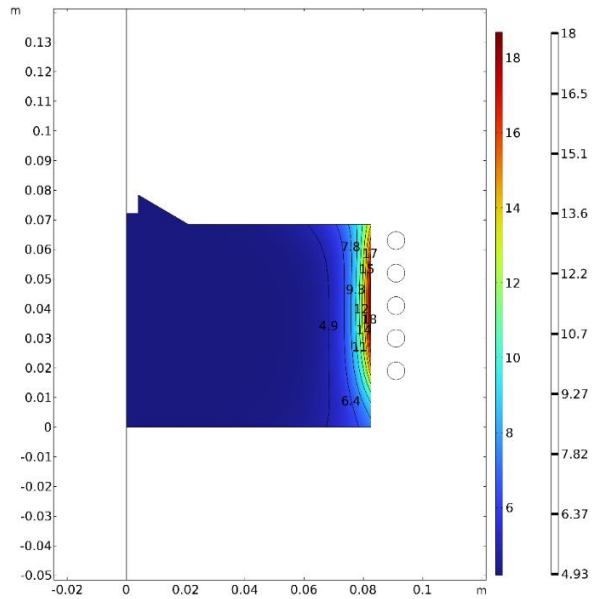


Рисунок 4.13 – Температура электронов по объёму ГРК

Распределение концентраций частиц по газоразрядной камере ВЧИД-15-4 представлено на рисунке 4.14.

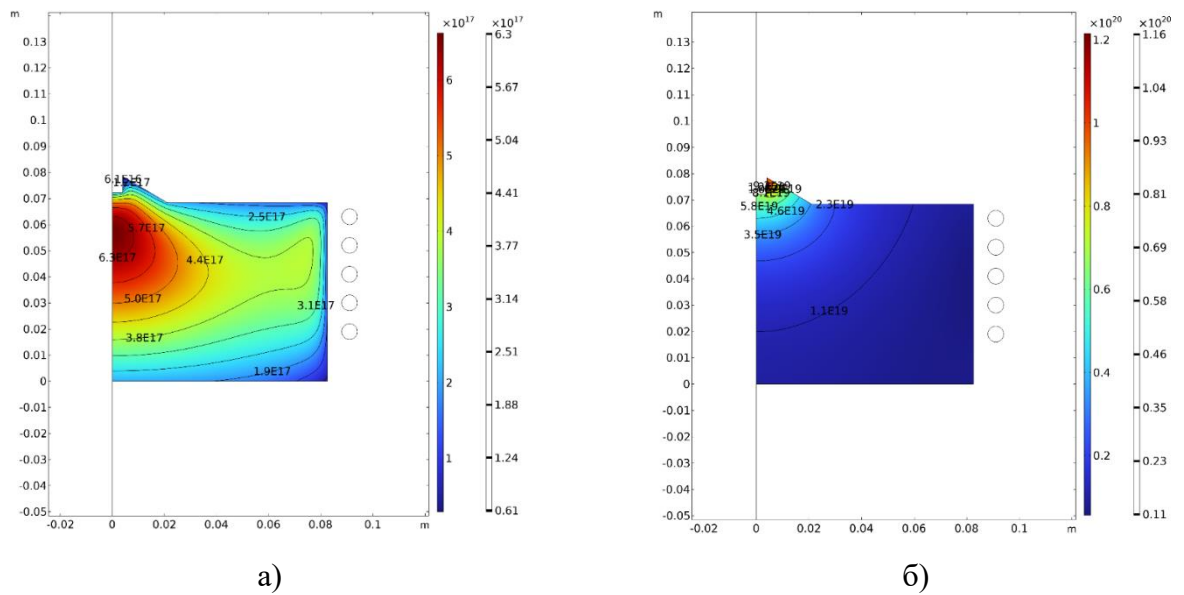


Рисунок 4.14 – Распределение ионов и нейтральных атомов по объёму ГРК

а) концентрации ионов по объёму ГРК; б) концентрации нейтральных атомов по объёму ГРК.

Концентрация ионов в области близлежащей к ЭЭ составляет $1,9-3,8 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^2$, эти значения хорошо соотносятся с экспериментальными данными и

совпадают с реальными значениями плотностей тока на ЭЭ [16]. На основе полученных расчетных диапазонов по плотностям тока был проведен анализ трех- и четырёхэлектродной систем ускорения с целью определения верхних и нижних границ по первеансу ионного пучка. Проведено моделирование трех- и четырёхэлектродной системы ускорения ВЧИД-15-4 для выбора экспериментальных режимов работы. В работе был произведен сравнительный расчет трех- и четырёхэлектродной СУ ВЧИД-15-4 для оценки конфигурации ионного пучка на четырех режимах работы двигателя. Концентрация плазмы на всех режимах работы задавалась равной $2 \times 10^{17} \text{ 1/м}^3$, что по примерным оценкам соответствует предельному рассматриваемому току пучка 0,5 А. а температура электронов порядка 3 эВ. На рисунках 4.15 - 4.18 представлены результаты численного моделирования ячейки СУ ВЧИД-15-4. На рисунке 4.15 представлен расчет ячейки четырёхэлектродной СУ экспериментального режима с повышенным удельным импульсом, ускоряющее напряжение 4 кВ.

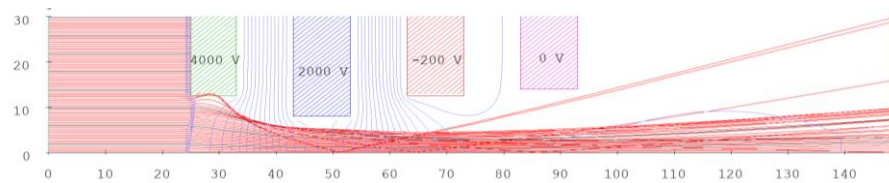


Рисунок 4.15 - Результаты расчета четырёхэлектродной СУ ВЧИД-15-4 в режиме 4 кВ

На рисунке 4.16 четырехэлектродная ячейка СУ работает в режиме «трехэлектродной», то есть потенциал ИЭ задан равным нулю. При этом наблюдается прогиб плазменного мениска в сторону ИЭ, что связано с недостаточной напряжённостью электрического поля в силу увеличения межэлектродного зазора с 1 мм до 3 мм. Однако прямого перехвата тока пучка на УЭ не обнаружено. Траекториями ионов попадающие на ВЭ можно пренебречь, так как ВЭ выполнен в виде кольцевого фланца.

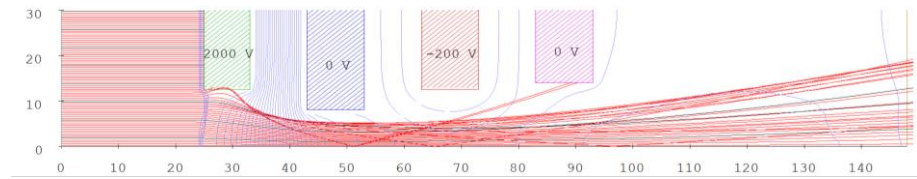


Рисунок 4.16 - Четырехэлектродная СУ ВЧИД-15-4 в режиме 2 кВ

На рисунке 4.17 представлен расчет ячейки трехэлектродной СУ экспериментального режима с повышенным удельным импульсом, ускоряющее напряжением 4 кВ.

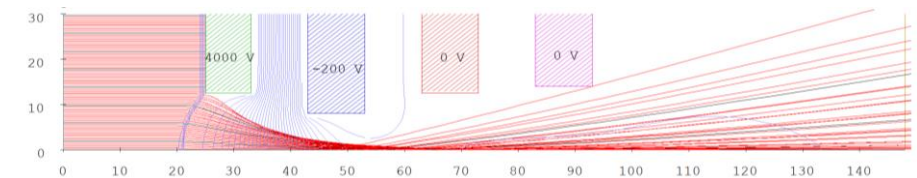


Рисунок 4.17 - Трехэлектродная СУ ВЧИД-15-4 в режиме 4 кВ

На рисунке 4.18 представлен классический режим работы трехэлектродной СУ, с ускоряющим напряжением 2 кВ.

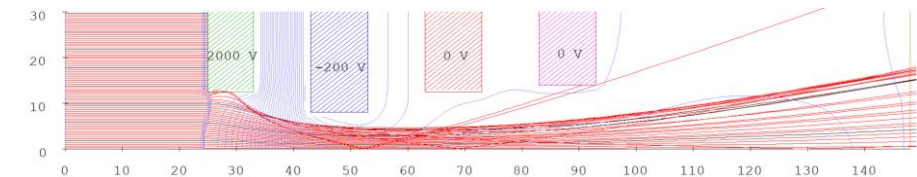


Рисунок 4.18 - Трехэлектродная СУ ВЧИД-15-4 в режиме 2 кВ

Ориентируясь на полученные данные, были выполнены аналогичные расчеты для ВЧИД-15-4. На рисунке 4.19 представлена зависимость полуугола расходимости $\alpha(95\%)^\circ$ ионного пучка для трех- и четырёхэлектродной СУ двигателя ВЧИД-15-4 от приведенного первеанса, рассчитанные в программе IOS - 3D [38].

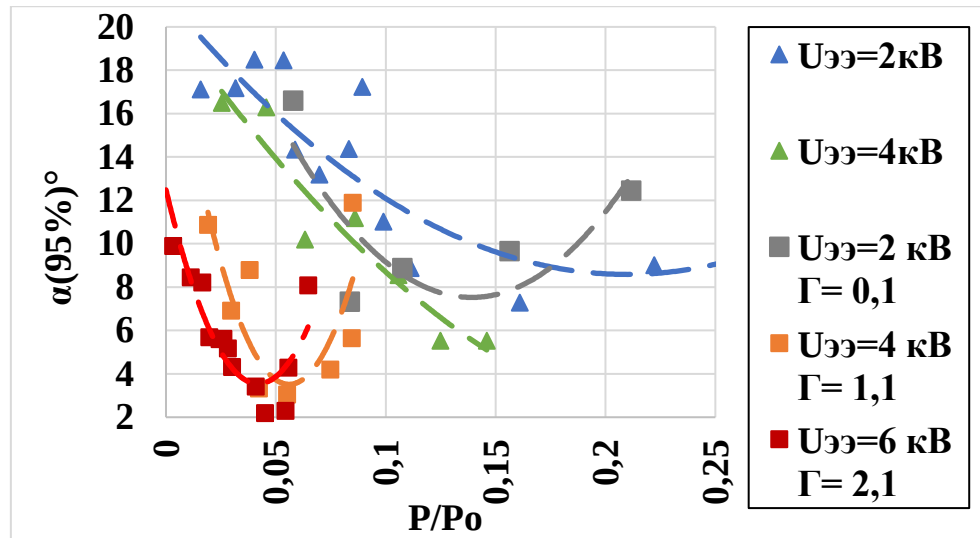


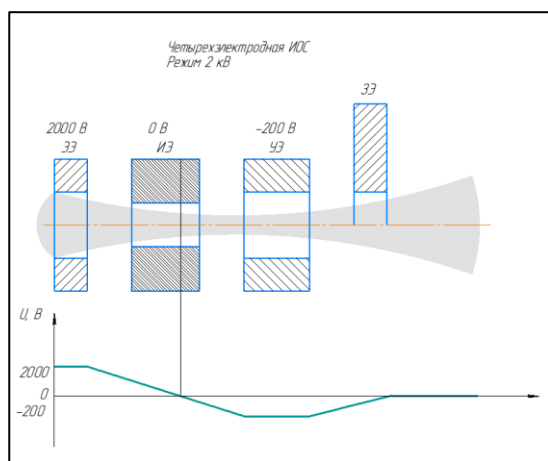
Рисунок 4.19 – Зависимость полуугла расходимости от приведенного первеанса ионного пучка для ВЧИД-15-4

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что зависимость полуугла расходимости от приведенного первеанса у классической одноступенчатой трехэлектродной системы ускорения системы имеет слабую зависимость от приведенного первеанса. Диапазон регулирования четырехэлектродной имеет более выраженный экстремум по минимальному полууглу расходимости. Минимальный расчетный полуугол расходимости для режима повышенного удельного импульса в четырехэлектродной СУ составил $2,8^\circ$ для значений $\Gamma=1-2$, энергия пучка при этом составляла 4 кэВ. Минимальный полуугол расходимости для номинального режим с энергией пучка 2 кэВ составил 9° . По результатам расчетов определено два режима при которых возможно эффективная работа четырехэлектродной СУ. Первый режим является аналогом режима трехэлектродной системы ускорения при энергии пучка порядка 2 кВ. Второй режим при энергии 4 кВ и выше, что невозможно обеспечить на трехэлектродной СУ. Расчетным путем определено, что главное преимущество четырехэлектродной СУ заключается в возможности работать при значительно меньших полууглах расходимости при извлекающей разности потенциалов 2 кВ в первой ступени и последующего ускорения до повышенных удельных импульсов

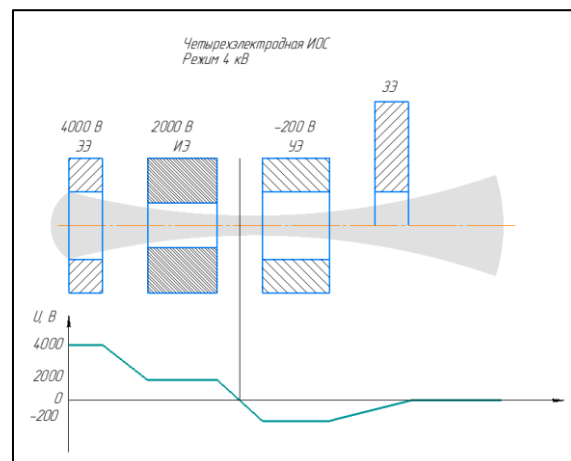
во второй ступени. Оценочные расчеты дали основание на экспериментальную отработку четырёхэлектродной СУ на четырех режимах работы.

4.2.2 Экспериментальное исследование лабораторной модели средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения

В рамках экспериментальных исследований были получены интегральные характеристики по постоянному току пучка лабораторной модели высокочастотного двигателя ВЧИД-15-4 с четырёхэлектродной системой ускорения при ее работе на ксеноне. Целью исследования была апробация работы четырёхэлектродной СУ в составе ВЧИД средней мощности и получение полного спектра характеристик двигателя. Эксперимент проходил в три этапа. Первый этап включал в себя отработку СУ по традиционной трехэлектродной схеме. Такая схема была реализована путем заземления четвертого электрода. На втором этапе был использован дополнительный источник питания в цепи ИЭ, на которой поддерживался нулевой потенциал, как показано на рисунке 4.20 а. Этот режим являлся аналогом трехэлектродной схемы. Третий этап экспериментального исследования заключался в испытании четырёхэлектродной СУ в режиме повышенного удельного импульса с напряжением на ЭЭ 4 кВ и напряжением на ИЭ 2 кВ, как показано на рисунке 4.20 б. Напряжение на УЭ во всех частях эксперимента было -200В.



а)



б)

Рисунок 4.20 - Схема режимов работы СУ

а) – режим дросселирования тяги; б) – режим повышенного УИТ.

Фотография лабораторного образца ВЧИД-15-4 с четырёхэлектродной системой ускорения, работающего в вакуумной камере представлена на рисунке 4.21.



Рисунок 4.21 – ВЧИД-15-4 в вакуумной камере во время работы

Интегральные характеристики по постоянному ионному току регистрировались начиная с максимальной ВЧ мощности и минимального расхода рабочего тела. Понижая ВЧ мощность и повышая расход для сохранения постоянного извлекаемого ионного тока пучка (тока в цепи ЭЭ), дополнительно производились измерения тока в цепи ИЭ и УЭ. Интегральные характеристики ВЧИД-15-3 с СУ, работающей в трехэлектродном режиме при ускоряющем напряжении 2 кВ представлены на рисунке .22, а при ускоряющем напряжении 4 кВ – на рисунке 4.23.

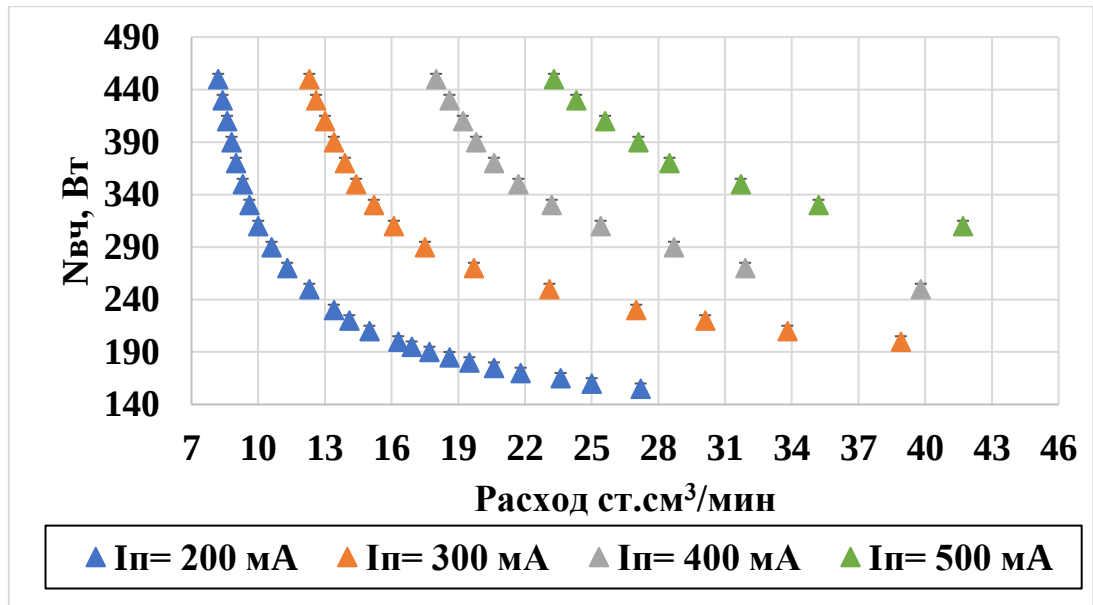


Рисунок 4.22 - Интегральные характеристики ВЧИД-15-4 с трехэлектродной СУ, работающей в трехэлектродном режиме при напряжении на ЭЭ 2 кВ

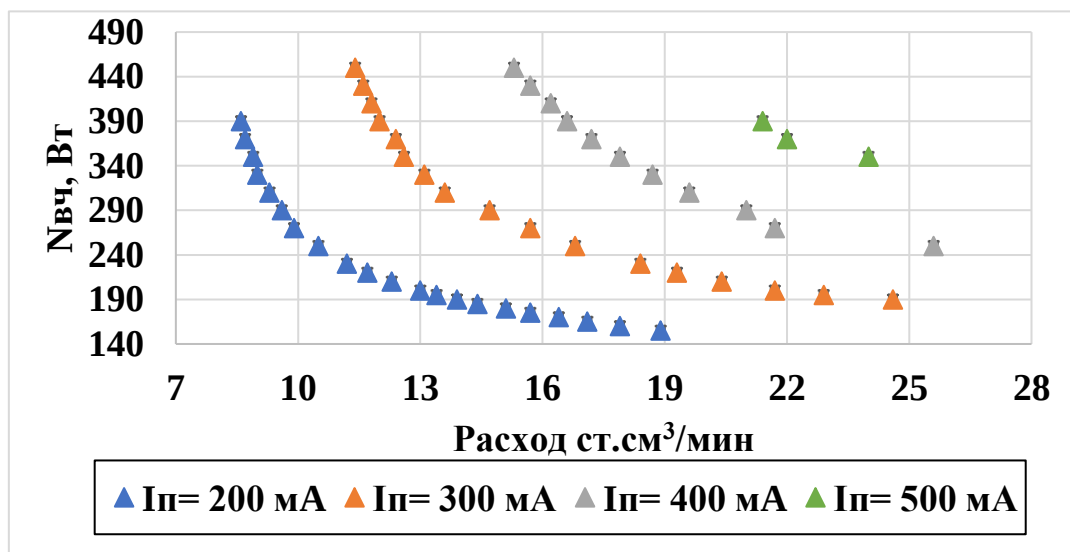


Рисунок 4.23 - Интегральные характеристики ВЧИД-15-4 с СУ, работающей в трехэлектродном режиме при напряжении на ЭЭ 4 кВ

При извлекаемом ионном токе свыше 400 мА, наблюдалась не стабильная работа трехэлектродной СУ, диапазон работы двигателя был ограничен расходами от 21 до 24 ст.см³/мин.

Интегральные характеристики ВЧИД-15-4 с СУ, работающей в четырехэлектродной режиме при ускоряющем напряжении 2 кВ представлены на рисунке 4.24, а при напряжении 4 кВ – на рисунке 4.25. Режим с ускоряющим напряжением 2 кВ был организован следующим образом. ЭЭ находился под потенциалом 2 кВ, а на источнике питания ИЭ устанавливалось нулевое значение напряжения, УЭ находился под потенциалом – «минус» 200 В. Целью исследования режима была демонстрация возможности работы четырёхэлектродной СУ в режиме дросселирования тяги, то есть при организации ускоряющей разности потенциалов между ЭЭ и УЭ. При этом межэлектродный зазор равнялся расстоянию между ЭЭ и УЭ и составлял 3 мм. При работе на ускоряющем напряжении 2 кВ двигатель работал стабильно на токах ионного пучка от 200 до 300 мА. Переход на токи свыше 300 мА выполнить не удалось, так как наблюдалось замыкание цепей ЭЭ и ИЭ, что может свидетельствовать о проникновении плазмы ГРК в межэлектродный между ЭЭ и УЭ из за недостаточной напряженности электрического поля в области ЭЭ, что влекло за собой прогиб плазменного мениска в область ИЭ. Режим с напряжением 4 кВ на ЭЭ и 2 кВ на ИЭ демонстрирует работу двухступенчатой четырёхэлектродной СУ с разделенными зонами извлечения и ускорения ИП, в составе лабораторной модели двигателя средней мощности ВЧИД-15-4.

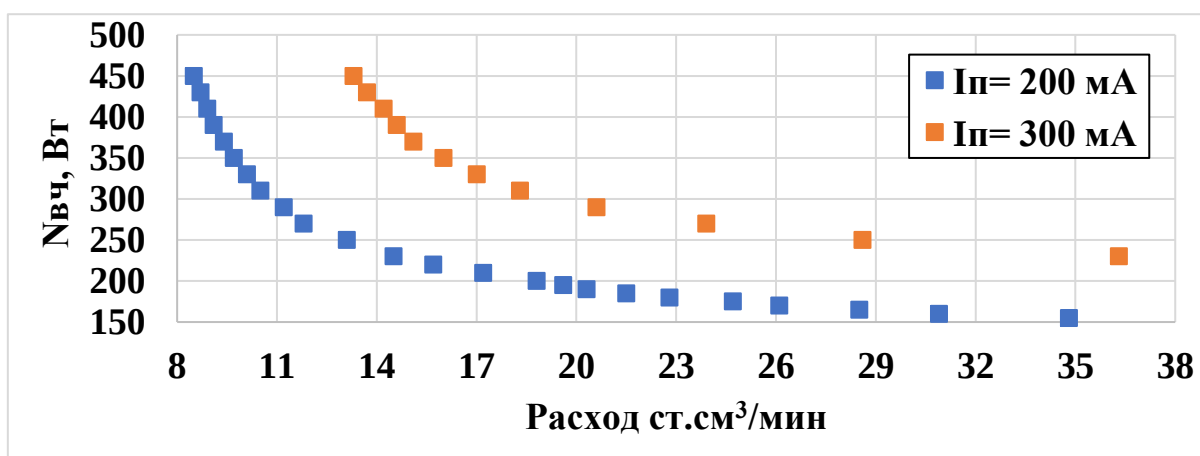


Рисунок 4.24 – Интегральные характеристики ВЧИД-15-4 с трехэлектродной СУ, при $U_{ЭЭ}=2$ кВ, $U_{ИЭ}=0$, $\Gamma=0,1$

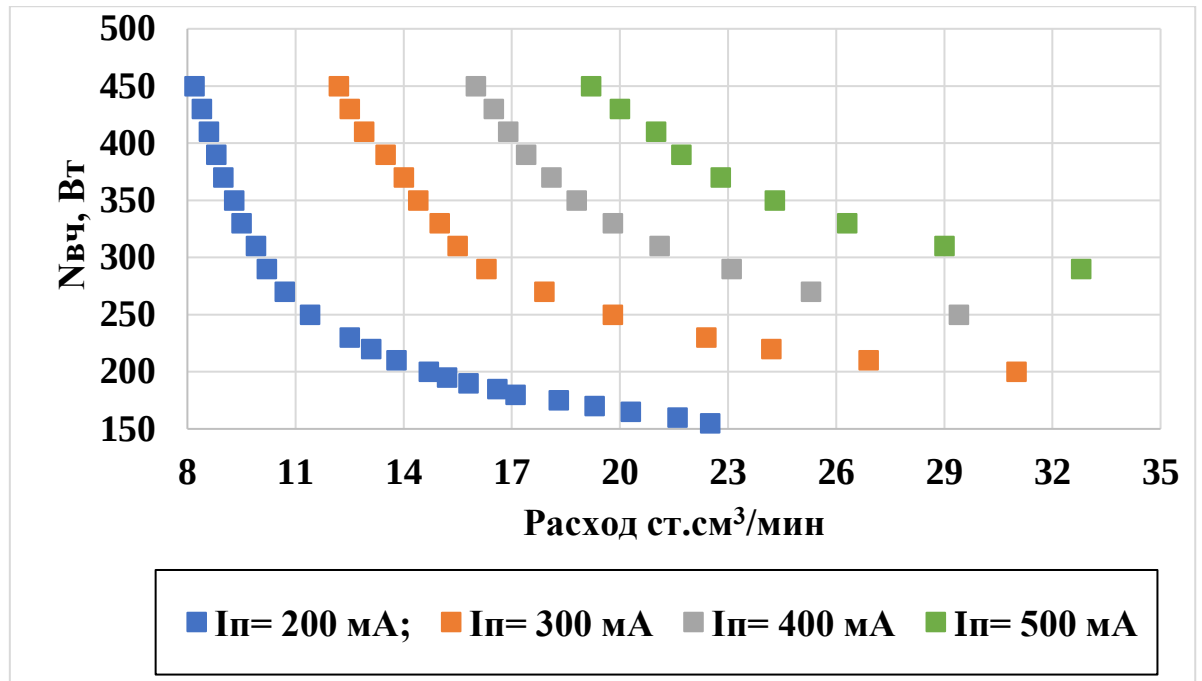


Рисунок 4.25 - Интегральные характеристики ВЧИД-15-4 с четырёхэлектродной СУ, при $U_{ээ}=4$ кВ, $U_{иэ}=2$ кВ, $\Gamma=1,1$

При работе на напряжении 4 кВ наблюдалась устойчивая работа двигателя во всём диапазоне извлекаемых токов. Для регистрации возможных токов на ИЭ в его цепи был установлен миллиамперметр, во всех исследованных режимах ток на ИЭ находился на нулевом уровне. Это обусловлено тем, что СУ работала в оптимальном расчетном режиме, а межэлектродные зазоры были рассчитаны правильно и составляли 1 мм. При выходе на режим с ионным током равным 500 мА при расходе ксенона от 21 до 32 ст. см³/мин., наблюдалась гораздо более стабильная работа по сравнению с работой на таком же режиме на трехэлектродной СУ. Это могло быть связано с тем, что разница потенциалов 4 кВ перераспределена между ЭЭ, ИЭ и УЭ, в то время как на трехэлектродной СУ 4 кВ распределены в межэлектродном зазоре между ЭЭ и УЭ. В данной работе не проводилась оптимизация параметров ГРК, поэтому цена ампера составляет $C_i=350-450$ А/м² при $I_p=500$ мА, с учетом потерь в согласующем устройстве порядка 50%. При этом КиРТ составил порядка 30%, поскольку использовалась цилиндрическая ГРК высотой всего 64 мм, чего оказалось недостаточно для высоких значений КиРТ.

4.2.3 Измерение энергетического спектра ионного пучка извлекаемого из четырёхэлектродной системы ускорения

Измерение энергии ионов в плазменной струе осуществляется зондом-энергоанализатором, по методике [13]. Принципиальная схема зонда представлена на рисунке 4.26

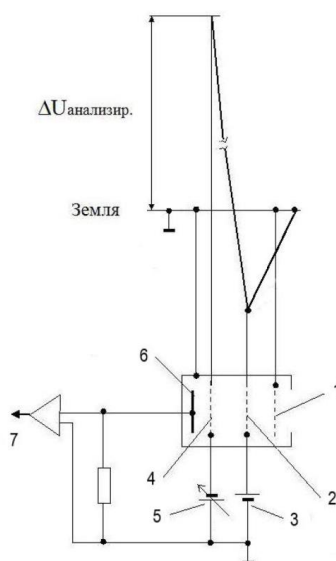


Рисунок 4.26 – Схема зонда энерго-анализатора

Принцип его действия заключается в следующем. Струя плазмы попадает в отверстие приемной диафрагмы, проходит экранирующую сетку 1, относительно которой задаются все потенциалы в датчике (в данной поставке экранирующая сетка заземлена). Экранирующая сетка служит также для уменьшения влияния потенциалов электродов зонда на окружающую плазму. Далее поток проходит отсечную сетку 2, на которой с помощью источника электропитания 3 задается отрицательный потенциал. На отсечной сетке происходит торможение и разворот электронов. Параметры ячейки отсечной сетки выбираются таким образом, чтобы слой объемного заряда, тормозящего электроны, заполнял все пространство отверстия. На анализирующей сетке 4 происходит торможение ионов. Только ионы с энергией выше задерживающего потенциала $\Delta U_{\text{анализир}}$, который создается с

помощью генератора 5 задерживающего напряжения пилообразной формы, проходят сквозь ячейки анализирующей сетки и попадают на коллектор 6. Ток коллектора усиливается усилителем 6 выходного сигнала и выводится на внешний регистрирующий прибор. Для уменьшения влияния кинетической ион - электронной эмиссии на поверхности коллектора закреплен диск из танталовой фольги. Фотография с экспериментом по зондовой диагностике ИП представлена на рисунке 4.27.

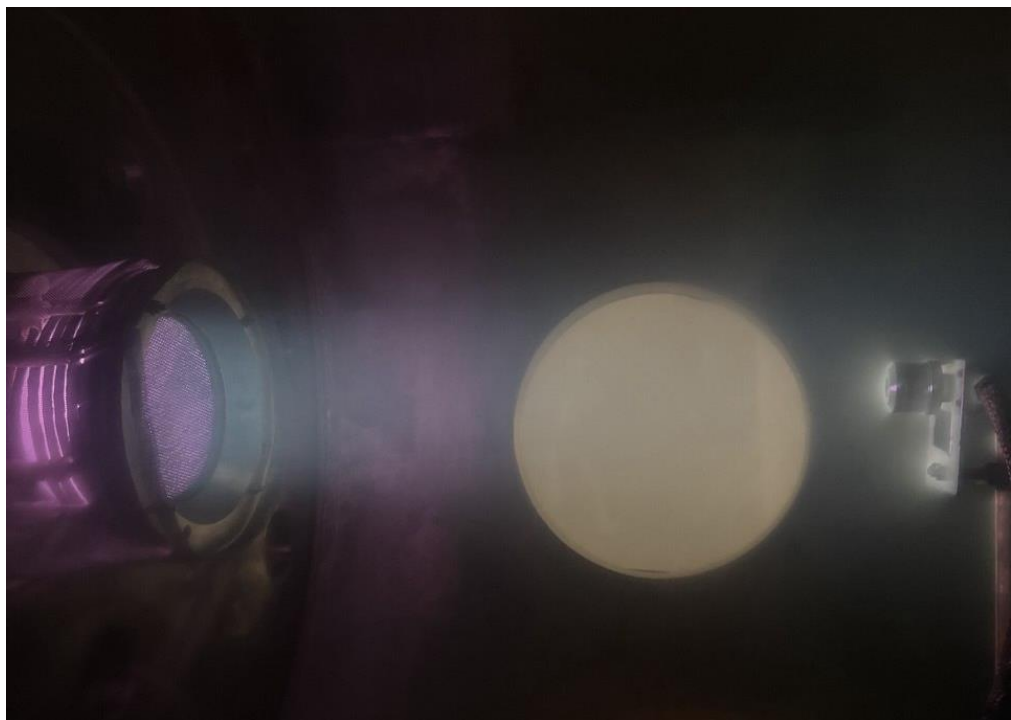


Рисунок 4.27 – ВЧИД-15-4 с четырёхэлектродной СУ во время диагностики ИП

Последовательность работы с зондом проходила в следующем порядке:

1. Ввод зонда в ионный пучок с помощью штанги перемещения;
2. Подключение к БЭП и подача пилообразного напряжения на ЭА;
3. Регистрация характеристик струи в месте расположения зонда, а именно фиксация кривой изменения тока на коллектор ЭА в зависимости от величины пилообразного напряжения, а также зафиксировать ток на ПЗ (при помощи осциллографа или внешней системы управления);

4. Отключение пилообразное напряжение и отключение зонда от БЭП;
5. Выведение зонда из струи.

По результатам измерений построить кривую зависимости тока на коллектор от задерживающего напряжения на анализирующей сетке - «тормозную характеристику» зонда, которая показана на рисунке 4.28. Для фильтрации сигнала был применен фильтр Баттерворта [26].

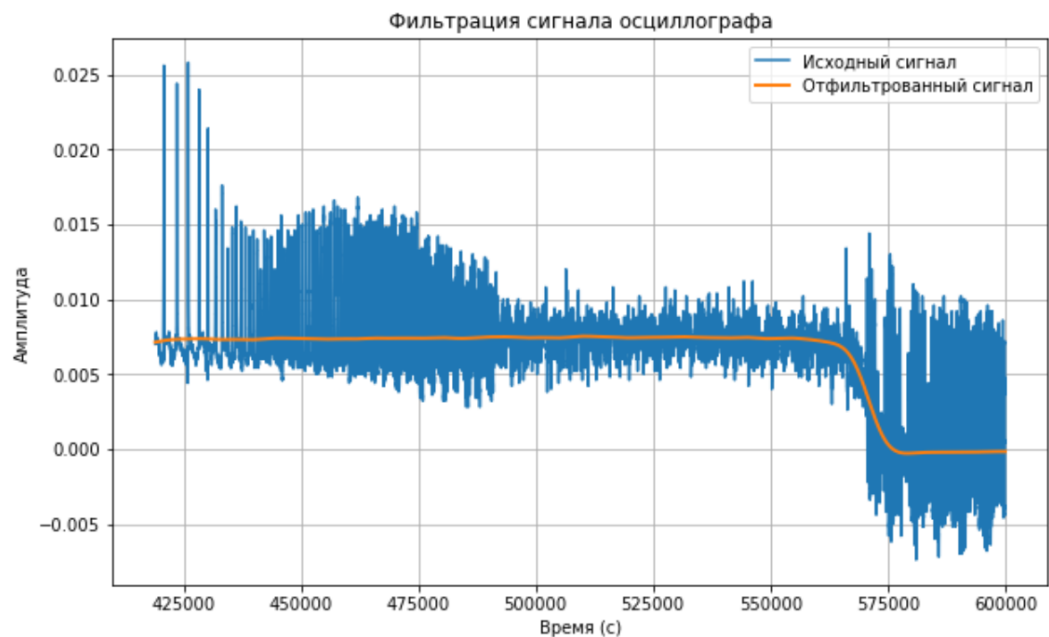


Рисунок 4.28 - Тормозная характеристика

Дальнейшую обработку данной зависимости проводить методом графического дифференцирования с использованием соотношения:

$$\frac{dN}{dE} = \left[\frac{\frac{dj}{dU_{i+1}}}{\sqrt{U_{i+1}}} + \frac{\frac{dj}{dU_i}}{\sqrt{U_i}} \right] (U_{i+1} - U_i)/2, \quad (4.9)$$

где $\frac{dN}{dE}$ - вероятность нахождения числа частиц при данной энергии;

$\frac{dj}{dU_i}$ - приращение тока в окрестности точки дифференцирования;

U_i – измеренное напряжение;

i – номер точки, для которой проводится вычисления.

В результате вычислений получается спектр распределения частиц по энергиям.

Целью данной диагностики являлось определение энергии и ИП извлекаемого из четырёхэлектродной СУ при двух режимах работы двигателя. Особенный интерес представлял режим работы четырёхэлектродной СУ при пониженном напряжении, составляющем 2 кВ, который соответствует режиму работы трехэлектродной СУ. При этом режиме потенциал на ИЭ задавался равным нулю. Результаты обработки сигнала с зонда энергоанализатора диагностики пучка четырёхэлектродной СУ в режиме с нейтрализацией извлекаемого пучка представлены на рисунках 4.29, 4.30.



Рисунок 4.29 – Четырёхэлектродная СУ на режиме 4 кВ



Рисунок 4.30– Четырехэлектродная СУ на режиме 2 кВ

Результаты обработки сигнала с зонда энергоанализатора диагностики пучка трехэлектродной СУ в режиме нейтрализации извлекаемого пучка представлены на рисунках 4.31, 4.32.



Рисунок 4.31 – Трехэлектродная СУ на режиме 4 кВ



Рисунок 4.32 – Трехэлектродная СУ на режим 2 кВ

По результатам диагностики можно сделать вывод о соответствии заданных режимов реальным значениям энергий заряженных частиц в ИП, погрешность результатов составляет не более 5%.

4.2.4 Сравнительный анализ результатов эксперимента

Первым этапом сравнения двух СУ является сопоставление их характеристик по критерию равенства напряжения $U_{\text{ЭЭ}}$ в обеих конфигурациях, то есть при одинаковой энергии ионного пучка. При таком сравнении необходимо учитывать, что ток извлекаемого ионного пучка определяется разностью потенциалов в извлекающей зоне СУ: для четырёхэлектродной СУ она располагается между ЭЭ и ИЭ, тогда как для трёхэлектродной – между ЭЭ и УЭ. Таким образом, при одинаковых напряжениях на ЭЭ в обеих СУ извлекающая разность потенциалов $\Delta U_{\text{изв}}$ у трёхэлектродной СУ будет в два раза больше чем в четырёхэлектродной (4,2 кВ и 2 кВ для трёх- и четырёхэлектродной СУ). На рисунках 4.33 - 4.36

представлены интегральные характеристики для указанных выше режимов работы обеих СУ.

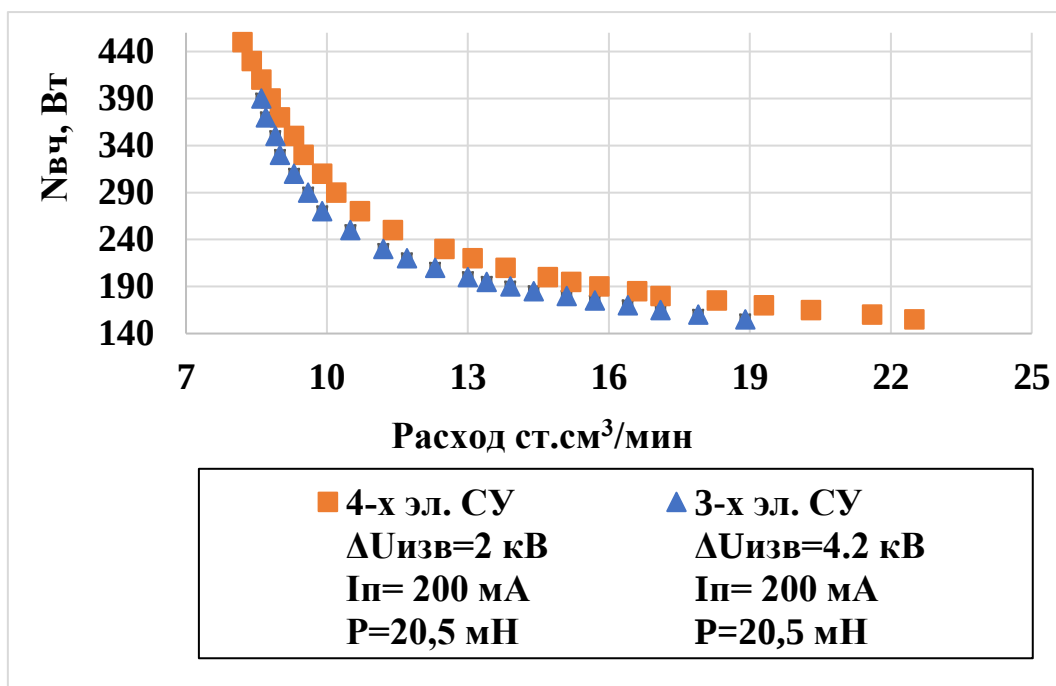


Рисунок 4.33 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 200 мА

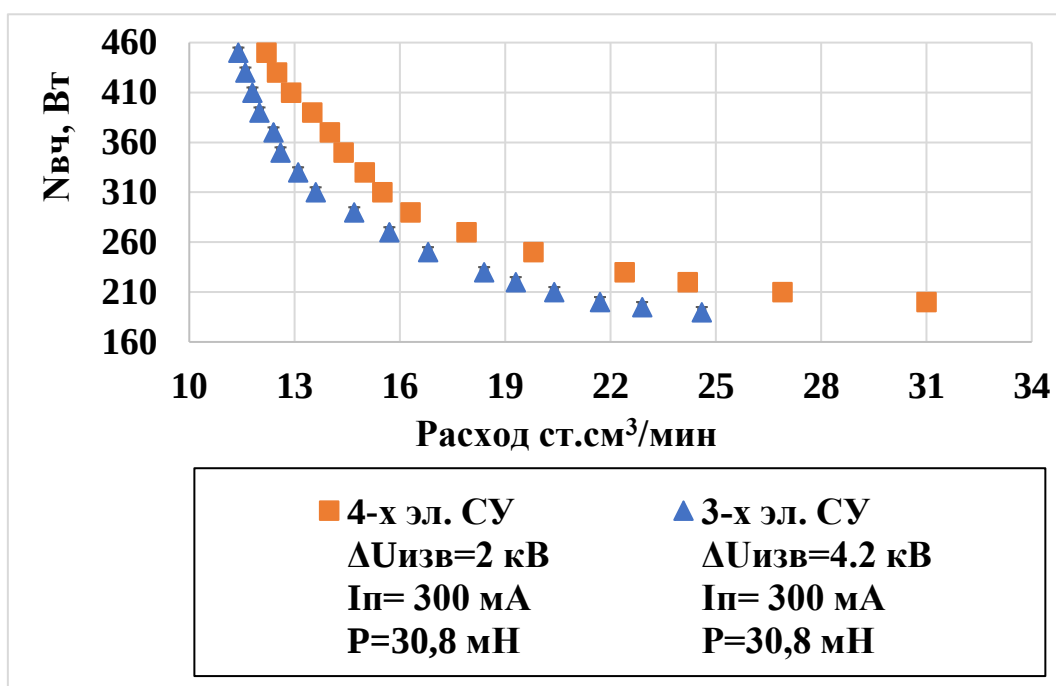


Рисунок 4.34 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 300 мА

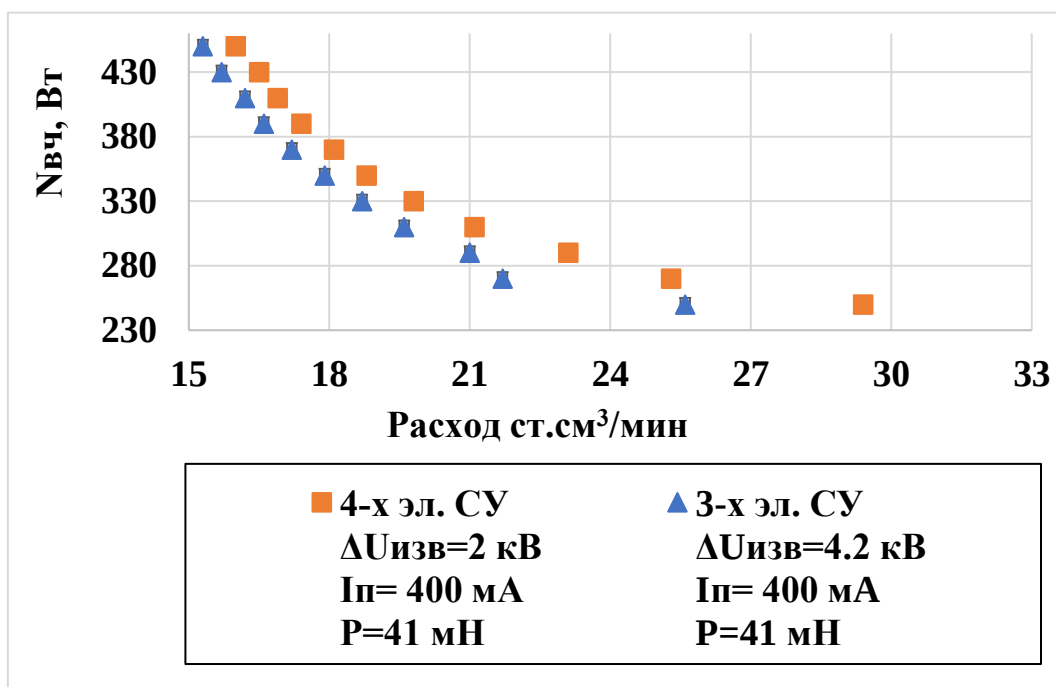
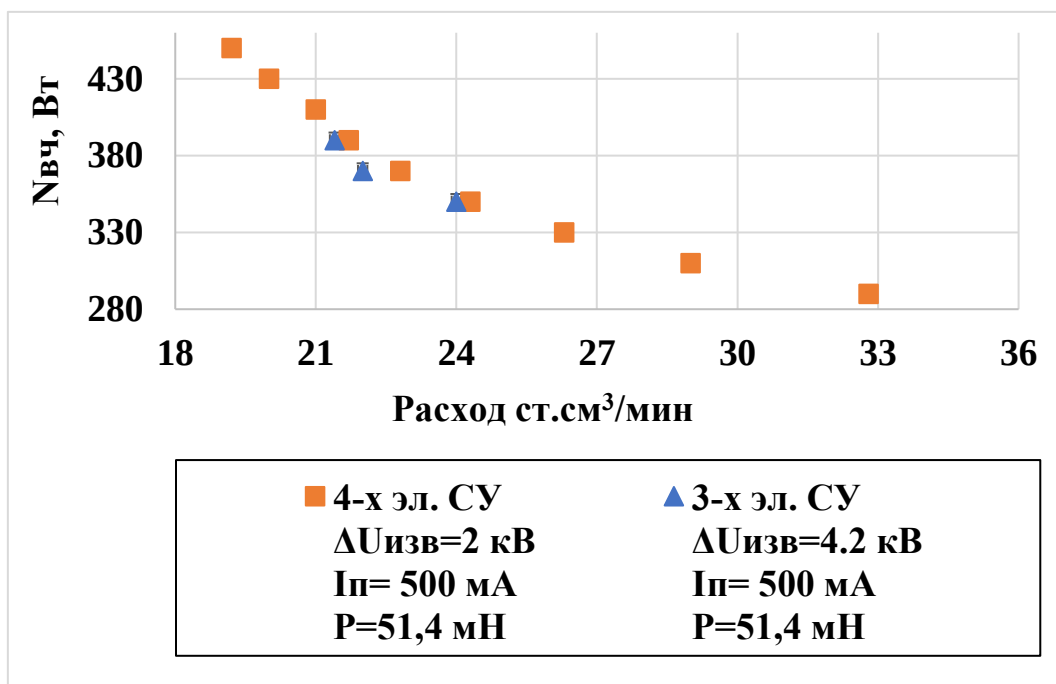


Рисунок 4.35 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 400 мА



Как и следовало ожидать, опираясь на серию экспериментов, представленных в главе 3, для обеспечения одинаковых условий извлечения тока ионного пучка в обеих СУ требуется равная извлекающая разность потенциалов. С учетом этого вывода при одинаковых расходах рабочего тела разница во вкладываемой мощности составляет для трёхэлектродной СУ на 3–11 % меньше, чем для четырёхэлектродной в силу вдвое большего значения $\Delta U_{\text{изв}}$. Указанное различие обусловлено разными значениями $\Delta U_{\text{изв}}$ для сравниваемых СУ: 4 кВ для трёхэлектродной СУ и 2 кВ для четырёхэлектродной.

Вторым этапом сравнения двух СУ является сравнение по критерию равных $\Delta U_{\text{изв}}$. Полученные экспериментальные результаты были проанализированы посредством сравнения интегральных характеристик по постоянному току ВЧИД-15-4 по критерию одинакового значения $\Delta U_{\text{изв}}$, то есть одинаковых значениях извлекающей разности потенциалов для трёх- и четырёхэлектродных СУ. В четырёхэлектродной СУ извлечение ионного пучка осуществляется в межэлектродном зазоре между ЭЭ и ИЭ, тогда как в трёхэлектродной — между ЭЭ и УЭ. Потенциал на УЭ в обоих вариантах СУ задавался равным –200 В, поэтому при напряжении на ЭЭ, равном 2 кВ, извлекающая разность потенциалов в трёхэлектродной СУ составляла 2,2 кВ. Аналогично, при напряжении на ЭЭ, равном 4 кВ, и напряжении на ИЭ, равном 2 кВ, в четырёхэлектродной СУ извлекающая разность потенциалов составляла 2 кВ. То есть в трёхэлектродной СУ $\Delta U_{\text{изв}}$ было задано на 200 В выше. Результаты сравнения представлены в виде характеристик при постоянном токе ИП представлены на рисунках 4.37 - 4.40.

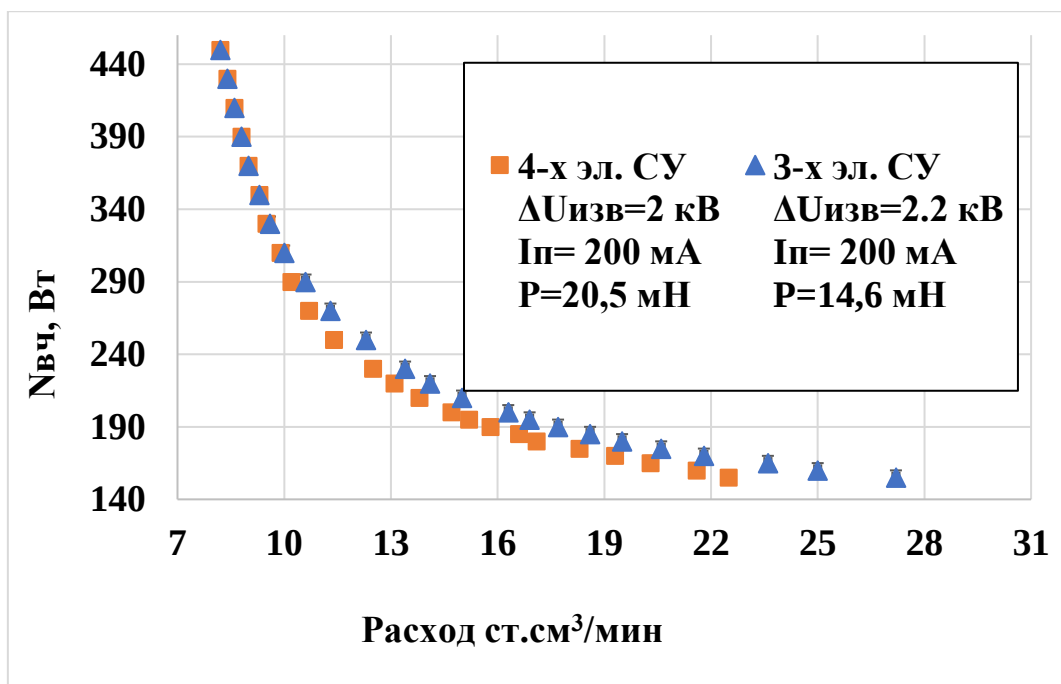


Рисунок 4.37 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 200 мА

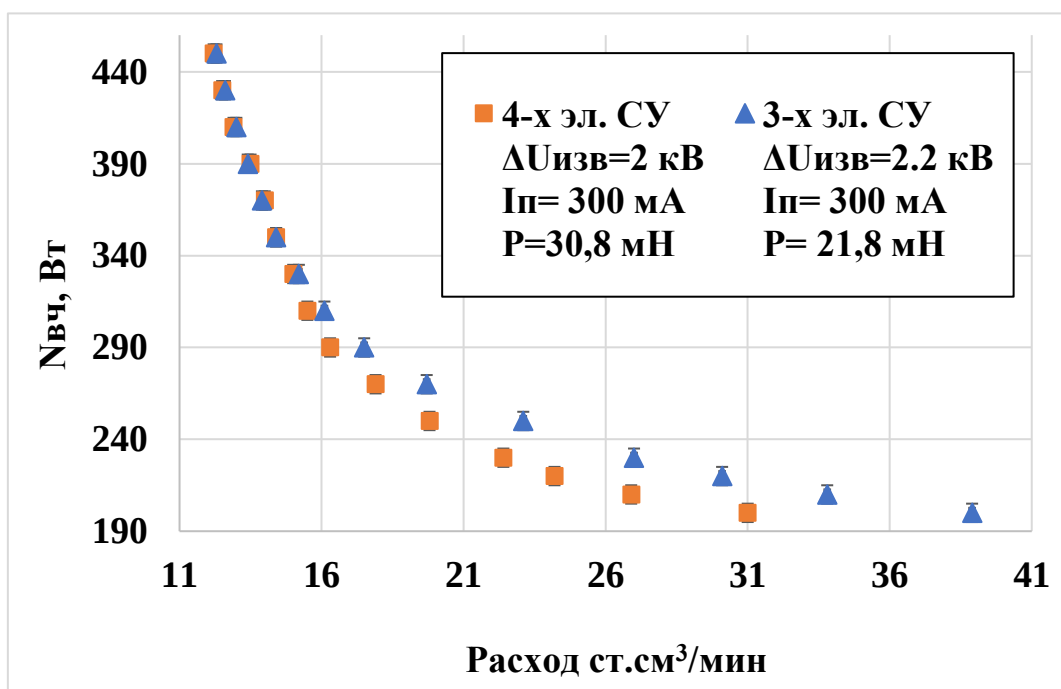


Рисунок 4.38 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 300 мА

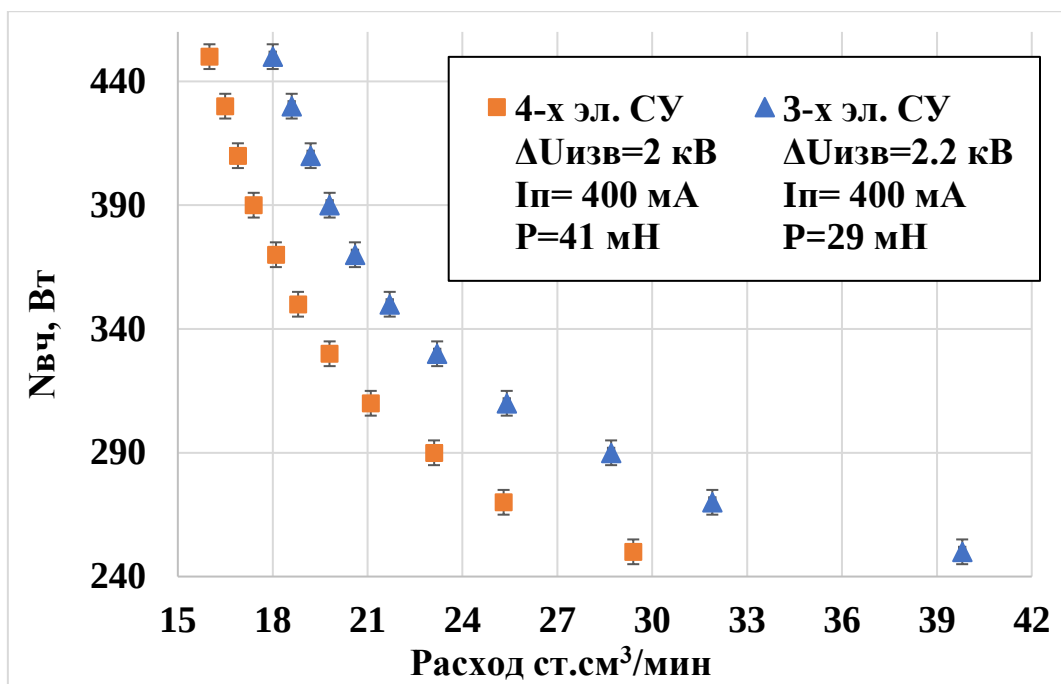


Рисунок 4.39 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 400 мА

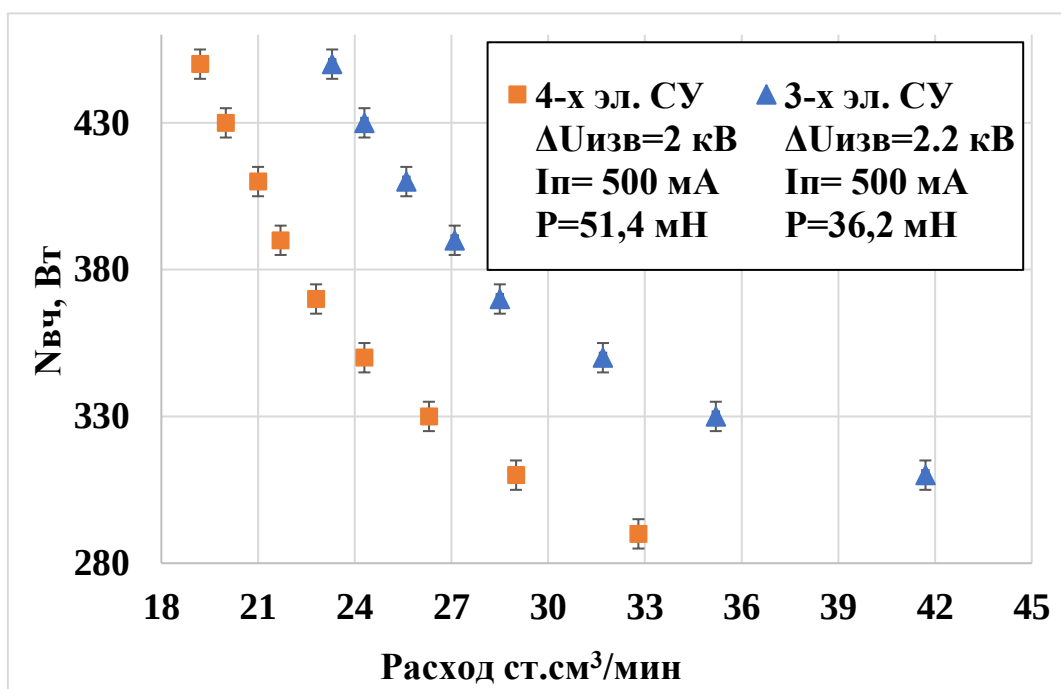


Рисунок 4.40 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 500 мА

Сравнение режима дросселирования тяги на четырёхэлектродной СУ с номинальным режимом трехэлектродной СУ представлено на рисунках 4.41, 4.42.

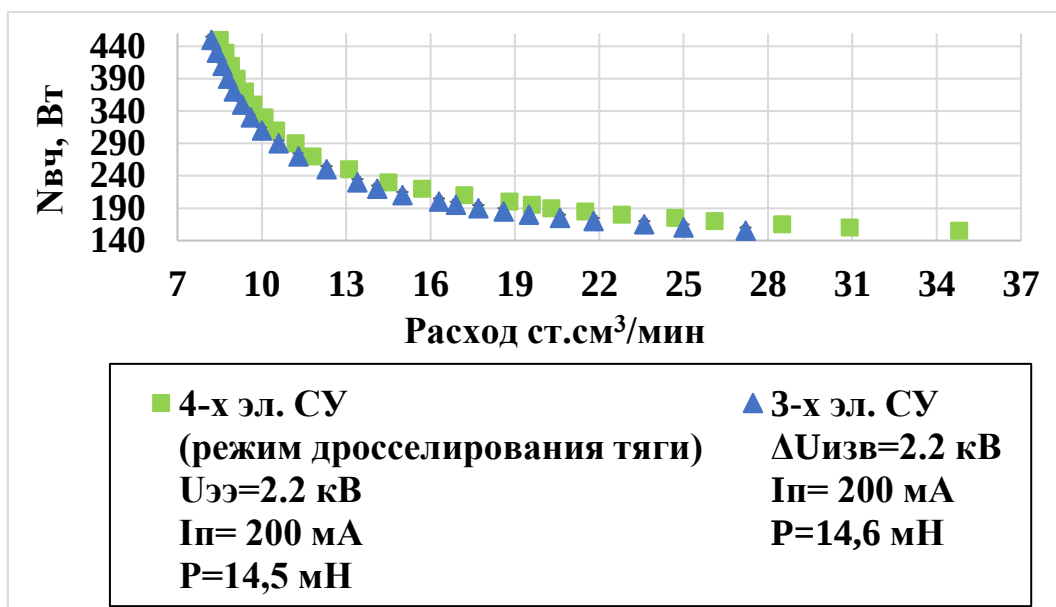


Рисунок 4.41 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 200 мА

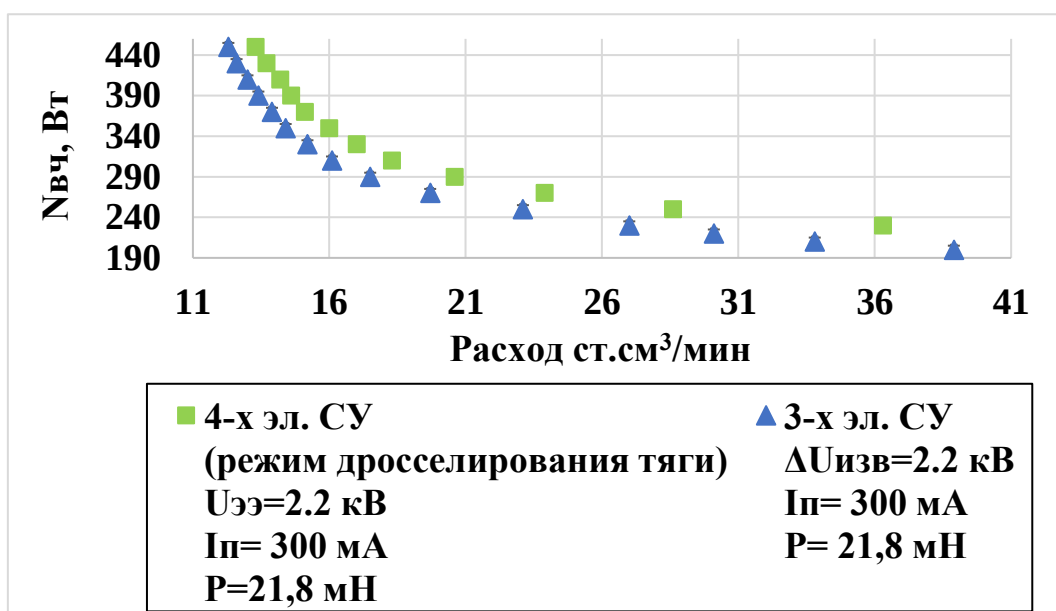


Рисунок 4.42 – Зависимость вкладываемой ВЧ мощности от расхода рабочего тела для тока пучка 300 мА

Сравнение токов перехвата на УЭ у трех- и четырехэлектродной СУ с одинаковыми значениями извлекающего напряжения $\Delta U_{изв}$ представлены на рисунках 4.43 - 4.46. Суммарный ток перехвата не превышал 1 - 2% от тока ионного пучка.

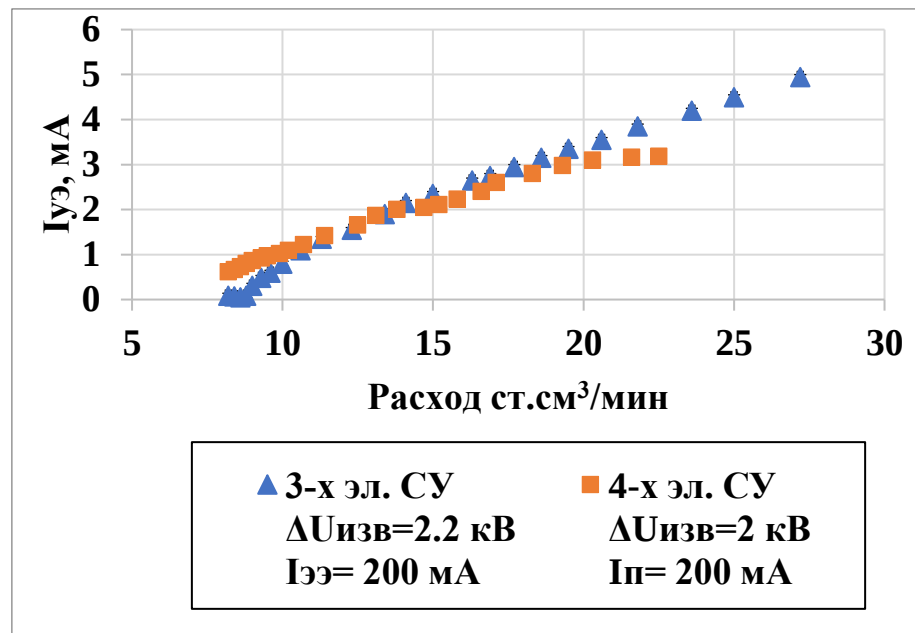


Рисунок 4.43 – Зависимость тока перехвата на УЭ от расхода рабочего тела

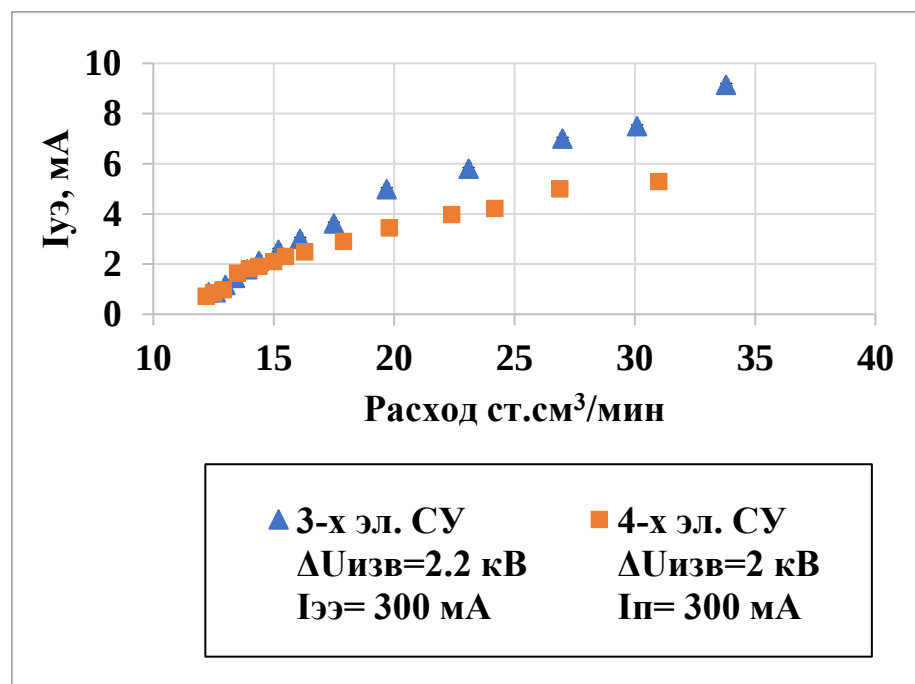


Рисунок 4.44 – Зависимость тока перехвата на УЭ от расхода рабочего тела

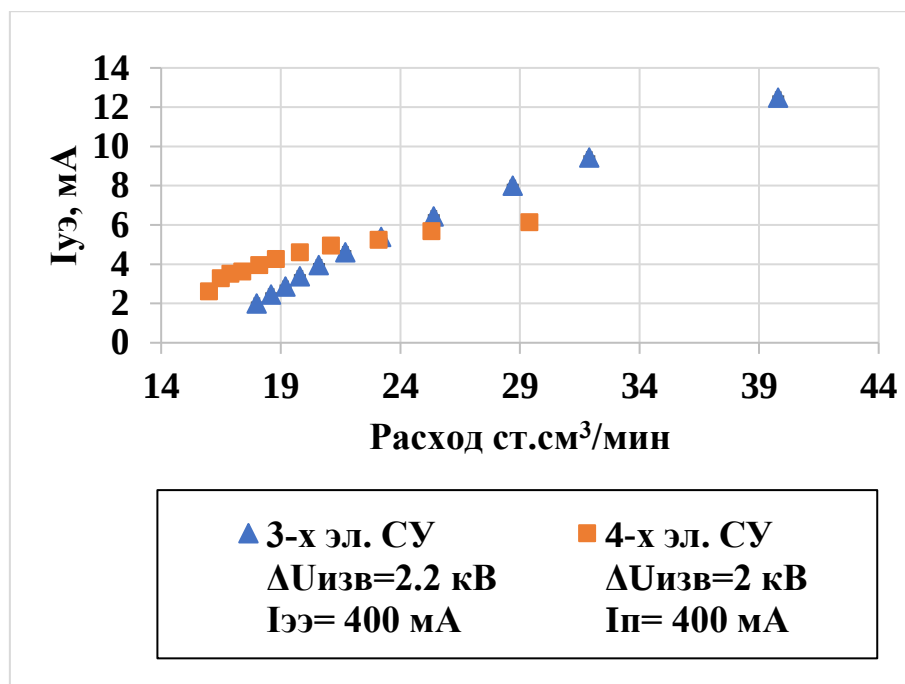


Рисунок 4.45 – Зависимость тока перехвата на УЭ от расхода рабочего тела

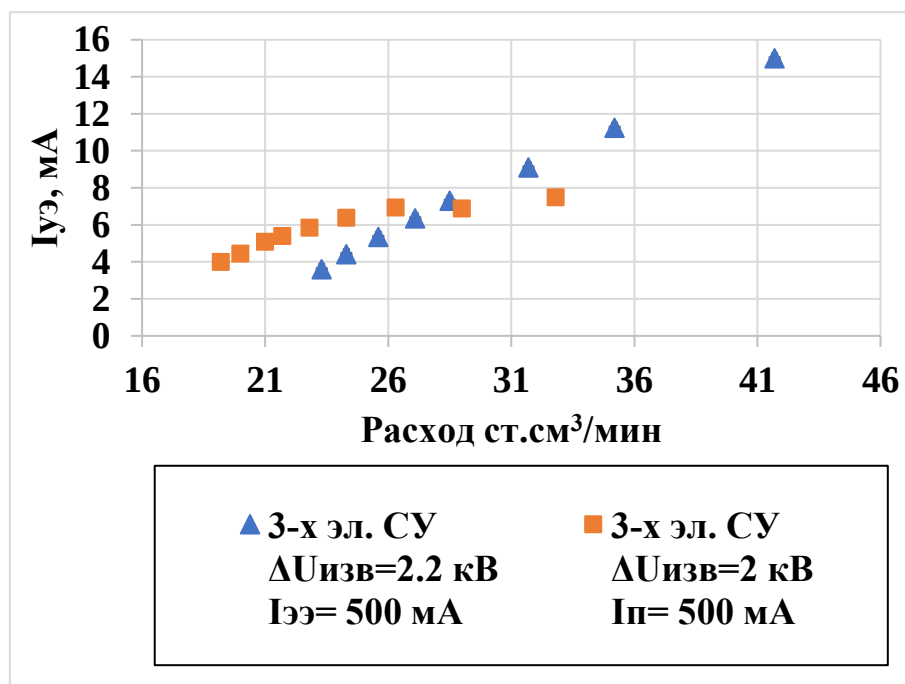


Рисунок 4.46 – Зависимость тока перехвата на УЭ от расхода рабочего тела

Сравнение токов для режима дросселирования тяги четырехэлектродной СУ с трехэлектродной СУ в номинальном режиме представлены на рисунках 4.47, 4.48.

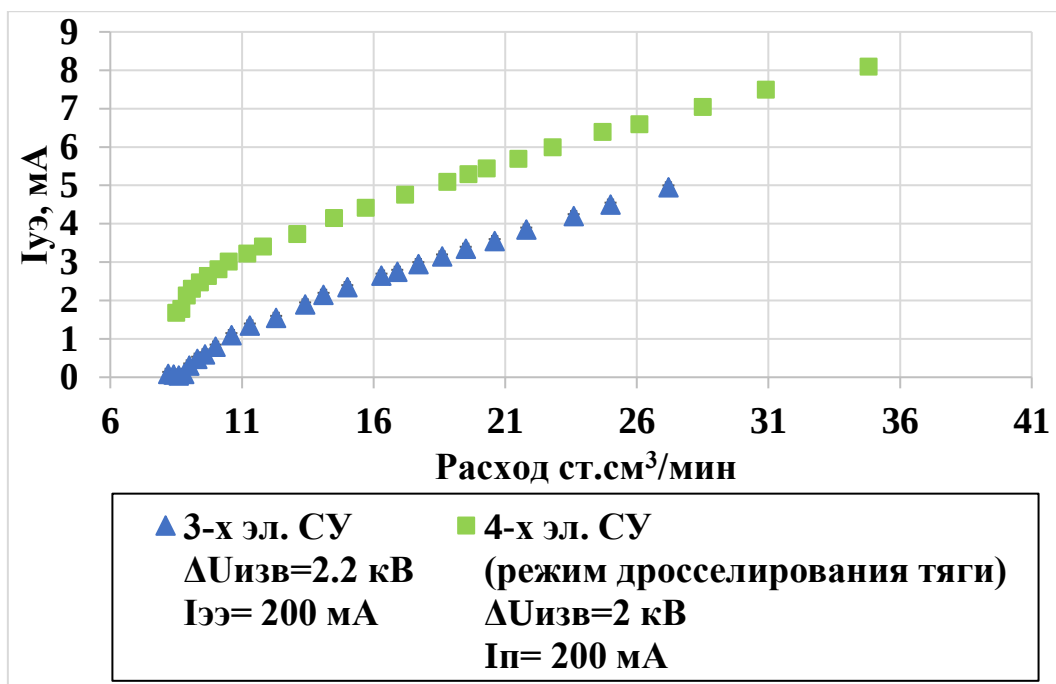


Рисунок 4.47 – Зависимость тока перехвата на УЭ от расхода рабочего тела

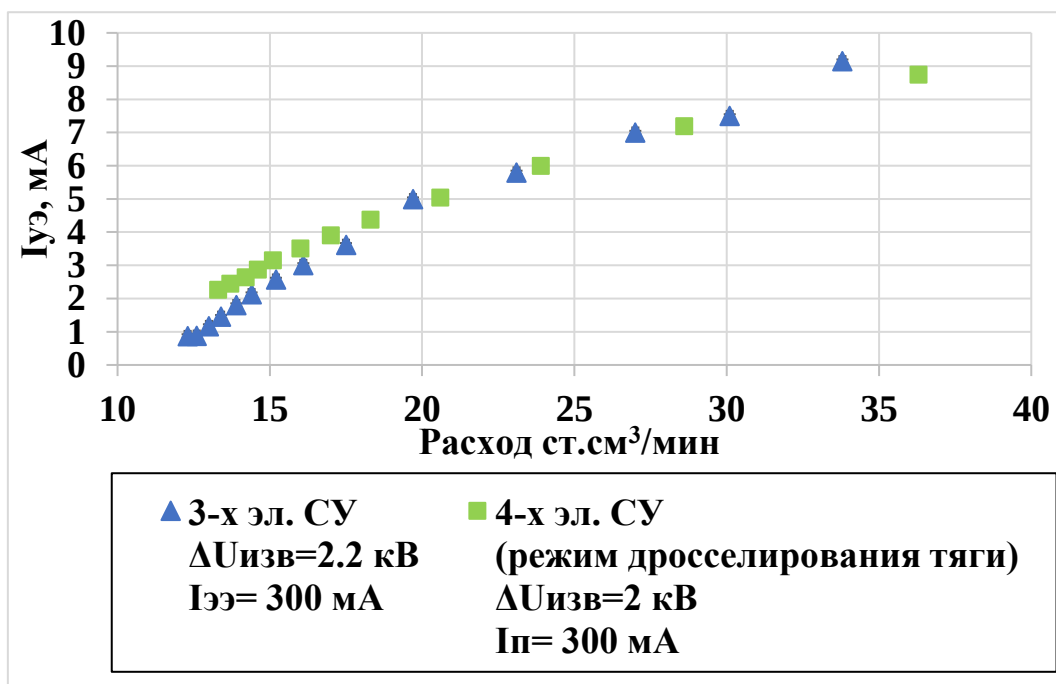


Рисунок 4.48 – Зависимость тока перехвата на УЭ от расхода рабочего тела

На рисунке 4.49 представлена диаграмма процентного отношения ток перехвата на УЭ для трех- и четырехэлектродной СУ.

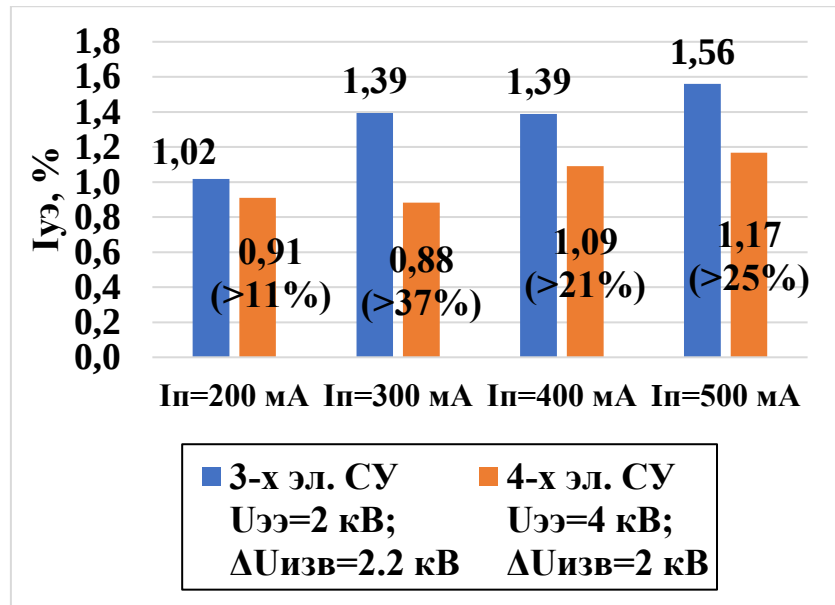


Рисунок 4.49 – Процентное отношение ток перехвата на УЭ для трех- и четырехэлектродной СУ

Для токов ионного пучка 200-500 мА разница в значениях тока на УЭ между трёх- и четырёхэлектродной СУ составила 11-25% в сторону уменьшения для четырёхэлектродной СУ. Это свидетельствует о лучшей фокусировке ИП и об уменьшении вторичных токов, возникающих в процессе перезарядки ионов. Этот факт дает основание прогнозировать увеличение ресурса двигателя при использовании четырехэлектродной СУ.

По результатам расчётных оценок и экспериментальных данных можно заключить, что применение четырёхэлектродной СУ способствует повышению плотности тяги за счёт дополнительной степени свободы в регулирования ускоряющей разности потенциалов. Полученные данные качественно соотносятся с опубликованными результатами других авторов [33]. Плотность тяги лабораторного образца ВЧИД-15-4 составила 0,29 мН/см², в то время как плотность тяги летного образца ИД ХИРС-25 с трехэлектродной СУ составляет от 0,163 до 0,338 мН/см². Для данного типоразмера ИД это предельное значение, так как прозрачность электродов уже выведена на предельную технологичность и не может быть увеличена, а предельно достижимая плотность плазмы ограничена

предельной мощностью разряда. Концепция четырёхэлектродной СУ заключается в повышении плотности тяги путем увеличения ускоряющей разности потенциалов во втором межэлектродном зазоре, что невозможно сделать в классической трехэлектродной СУ. Таким образом интеграция четырёхэлектродной СУ в уже существующие ИД позволит повысить плотность тяги путем увеличения ускоряющего напряжения с 900 В – 2 кВ в существующих ИД до 4 кВ и выше. Например, такое решение позволит увеличить плотность тяги XIPS-25 до 0,617 мН/см² при ускоряющем напряжении 4 кВ.

В таблице 4.6 представлено сравнение полученных экспериментальных данных в рамках данной работы на лабораторной модели ВЧИД-15-4 с результатами ранее опубликованными данными для исходной конфигурации двигателя ВЧИД-15 с трехэлектродной СУ.

Таблица 4.6 – Характеристики ВЧИД-15 и ВЧИД-15-4

Двигатель:	Мощность, кВт	Тяга, мН	Удельный импульс, с	Плотность тяги, мН/см ²
ВЧИД-15 [33]	0,9	28	2319	0,16
ВЧИД-15-4	2,2	51	2854	0,29

На рисунках 4.50, 4.51, 4.52 представлены диаграммы с интегральными характеристиками исходной конфигурации двигателя ВЧИД-15 с трехэлектродной СУ (синий маркер) и его модернизированной версии ВЧИД-15-4 с четырехэлектродной СУ (салатовый и оранжевый маркер). Салатовым маркером выделен режим дросселирования тяги, оранжевым маркером выделен режим повышенного удельного импульса для двигателя ВЧИД-15-4.

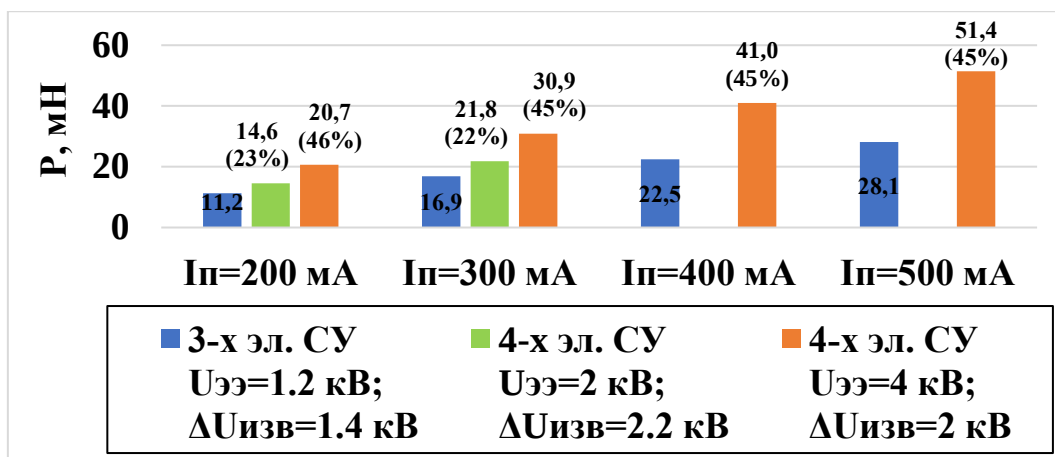


Рисунок 4.50 – Диаграмма прироста тяги

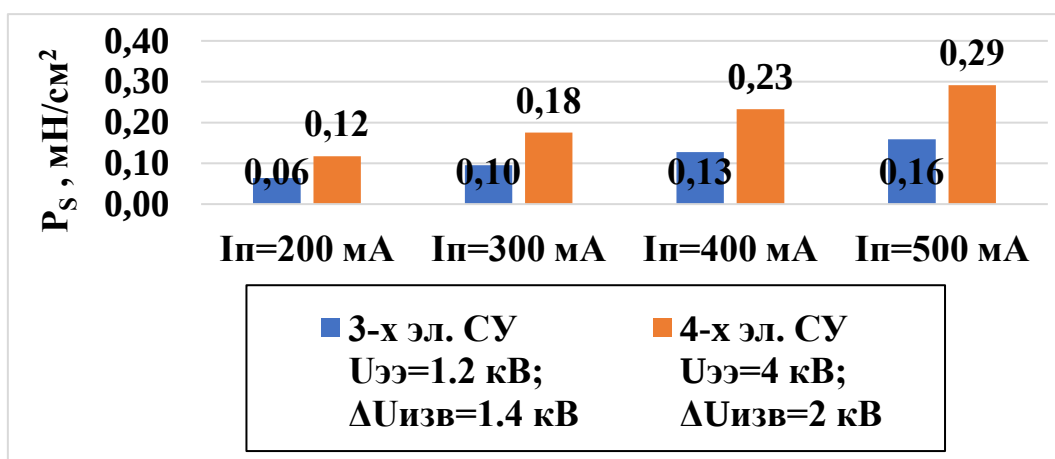


Рисунок 4.51 – Диаграмма плотности прироста тяги

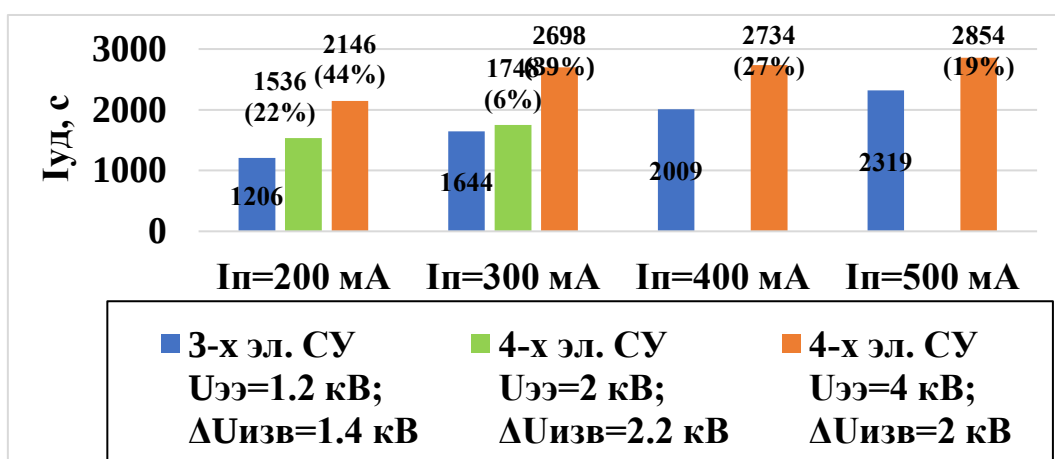


Рисунок 4.52 – Диаграмма прироста УИ

В результате экспериментальной отработки ВЧИД-15-4 удалось получить рост интегральных характеристик двигателя с четырёхэлектродной СУ по сравнению с ВЧИД-15 с трехэлектродной СУ.

4.3 Расчётная оценка характеристик перспективного высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения

С целью оценки возможных характеристик перспективного ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения, который можно будет использовать в миссиях, где требуются удельные импульсы свыше 7500 с был проведён ряд расчётов. За основу расчёта были взяты экспериментальные данные (извлекающая разность потенциалов, ток ионного пучка, параметры ВЧ разряда) двигателя с диаметром ионного пучка 160 мм [49], разработанного в НИИ ПМЭ МАИ. Исходя из этих данных была смоделирована четырёхэлектродная СУ, геометрические параметры ячейки СУ такого двигателя представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Параметры СУ перспективного ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения

Параметр:	Значение:
Диаметр отверстия ЭЭ, мм	2,5
Диаметр отверстия ИЭ, мм	1,6
Диаметр отверстия УЭ, мм	2,5
Межэлектродный зазор ЭЭ-ИЭ, мм	0,8
Межэлектродный зазор ИЭ-УЭ, мм	1,5
Межэлектродный зазор УЭ-ВЭ, мм	1
Толщина ЭЭ, мм	0,3
Толщина ИЭ, мм	1
Толщина УЭ, мм	1

Используя характерные для данного двигателя значения концентрации плазмы ($2 \times 10^{17} \text{ 1/м}^3$) и температуры электронов ($\sim 3 \text{ эВ}$) в программном продукте [40], была рассчитана конфигурация ионного пучка в единичной ячейке СУ. По

сравнению с лабораторным образцом, на котором проводились экспериментальные исследования, толщина ЭЭ была уменьшена с 0,8 мм до 0,3 мм, что позволило увеличить извлекаемый ток с единичной ячейки с $2,78 \times 10^{-4}$ А до $3,35 \times 10^{-4}$ А. Извлекающая разность потенциалов на обоих режимах составляет 2 кВ. Результаты моделирования ионного пучка представлены на рисунках 4.53 – 4.54.

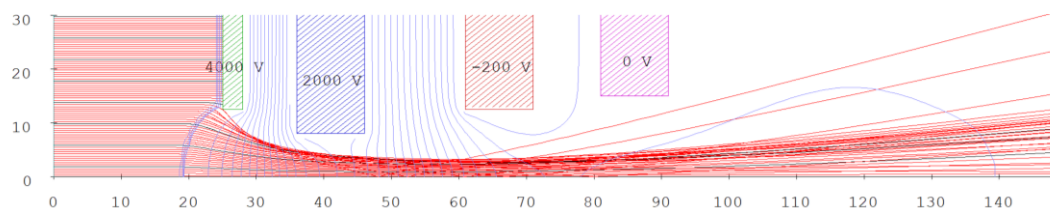


Рисунок 4.53 - Режим с энергией ИП 4 кэВ и ускоряющей разностью потенциалов 2,2 кВ

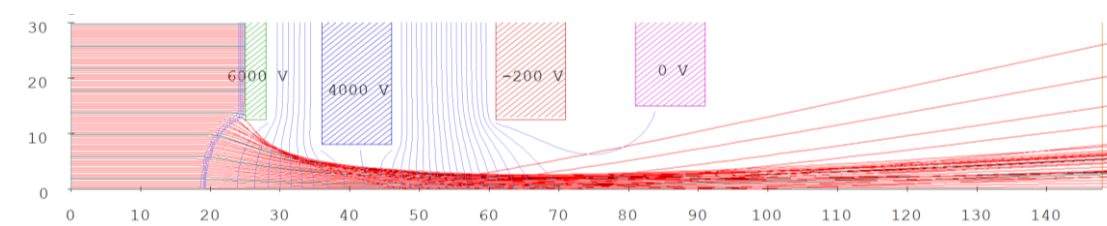


Рисунок 4.54 - Режим с энергией ИП 6 кэВ и ускоряющей разностью потенциалов 4,2 кВ

Характеристики перспективного ВЧИД представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Характеристики перспективного ВЧИД

Параметр:	Перспективный ВЧИД		
Диаметр пучка, мм	160		
Ток пучка, А	1,2		
Мощность, кВт	2,8	2,8	2,8
Удельный импульс, с	4400	4400	4400
Тяга, мН	87	87	87
КПД, %	67	67	67
КИРТ, %	0,8		
Энергия пучка, кэВ	2	2	2

Наглядно положение характеристик перспективного ВЧИД среди существующих ИД представлено на графике зависимости удельного импульса от тяги на Рисунок 4.55.

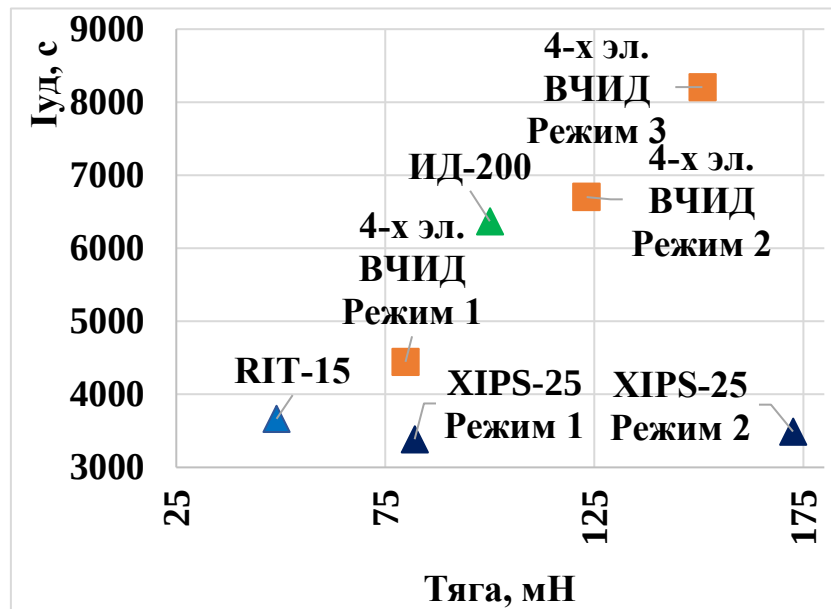


Рисунок 4.55 – Положение перспективного ВЧИД среди существующих ИД

4.4 Заключение по Главе 4

В рамках проведенных исследований для двух конфигураций СУ лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя с диаметром пучка 150 мм были получены экспериментальные зависимости ВЧ мощности, вкладываемой в разряд, от расхода рабочего тела при постоянных токах пучка в диапазоне от 200 мА до 500 мА. При работе с ускоряющим потенциалом 4 кВ на режимах с высоким значением извлекаемого ионного тока пучка четырехэлектродная СУ показала значительно более устойчивую работу, чем трехэлектродная СУ. Проведенная зондовая диагностика ионного пучка, извлекаемого из лабораторной модели ВЧИД с четырёхэлектродной СУ, подтвердила полное соответствие энергии ионов в пучке приложенному ускоряющему потенциалу как при 2 кВ, так и при 4 кВ. Проведённые оценочные

расчеты элементарной ячейки СУ перспективного ИД с четырёхэлектродной СУ показали возможность работы с удельным импульсом тяги 7500 с и выше.

На основании результатов проведенной работы можно сформулировать следующие рекомендации по проектированию ИД с повышенным удельным импульсом и четырёхэлектродной СУ:

- геометрические параметры электродов СУ должны быть оптимизированы под номинальные значения извлекаемой плотности тока с учётом используемого рабочего тела с целью обеспечения наибольшей эффективности фокусировки ионного пучка и снижения тока перехвата;
- отверстия в ЭЭ, ИЭ и УЭ рекомендуется выполнять, используя геометрические соотношения, представленные в работе;
- толщина ЭЭ должна быть минимально возможной с учётом технологических возможностей изготовления и необходимости обеспечения требуемой устойчивости при термических нагрузках;
- выбирать величину межэлектродных зазоров при оптимизации геометрических параметров четырёхэлектродной СУ рекомендуется с учётом материала электродов и соответствующей пробойной прочности межэлектродных промежутков;
- разность потенциалов на первом межэлектродном промежутке должна обеспечивать максимальную эффективность извлечения ионного тока из плазмы разрядной камеры ИД.

Заключение

При достижении поставленных в диссертации задач были получены следующие результаты:

1. Экспериментально показано, что ток ионного пучка в четырёхэлектродной системе ускорения определяется извлекающей разностью потенциалов в первом межэлектродном зазоре, при этом изменение ускоряющей разности потенциалов во втором межэлектродном зазоре не влияет на величину тока ионного пучка.

2. На лабораторной модели ВЧИД средней мощности с диаметром ионного пучка 150 мм при переходе с исходной трехэлектродной на четырехэлектродную систему ускорения при сохранении тока ионного пучка 500 мА повышены плотность тяги с $0,16 \text{ мН/см}^2$ до $0,29 \text{ мН/см}^2$ и удельный импульс тяги с 2320 с до 2855 с. При этом рост мощности двигателя с 0,9 до 2,2 кВт достигается за счет увеличения ускоряющей разности потенциалов.

3. Экспериментально подтверждена возможность работы высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения на двух режимах по тяге и удельному импульсу с энергией ионного пучка 2 и 4 кэВ, а также возможность регулирования тока ионного пучка путем изменения извлекающей разности потенциалов при сохранении энергии ионного пучка.

4. В четырёхэлектродной системе ускорения ток ионов перехвата на ускоряющий электрод, вызывающий его эрозию, снижен в среднем на 50-60%. На извлекающем электроде величина тока ионов перехвата близка к нулю. Это позволяет увеличить ресурс двигателя при переходе на четырехэлектродную систему ускорения.

Список используемых сокращений

БИП	блок питания ионного пучка
БНН	блок питания накала нейтрализатора
БПК	блок питания поджига катода
БПР	блок питания поджига разряда
БСН	блок смещения накала
БУЭ	блок питания ускоряющего электрода
ВЧ	высокочастотный
ВЧГ	высокочастотный генератор
ВЧИД	высокочастотный ионный двигатель
ГРК	газоразрядная камера
ЗЭ	замедляющий электрод
ИОС	ионно—оптическая система
ИД	ионный двигатель
ИДПТ	ионный двигатель постоянного тока
ИИ	ионный источник
ИП	ионный пучок
ИЭ	извлекающий электрод
КН	катод нейтрализатор
КПД	коэффициент полезного действия
СПГ	система подачи газа
СПД	стационарный плазменный двигатель
СУ	система ускорения
УИ	удельный импульс
УЭ	ускоряющий электрод
ХПК	холодный полый катод
ЭРД	электроракетный двигатель
ЭЭ	эмиссионный электрод

Список литературы

1. Абгарян В.К., Демченко Д.С., Мельников А.В., Пейсахович О.Д. Высокочастотный ионный двигатель с магнитным экранированием стенок разрядной камеры // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2024. — Т. 88, № 4. — С. 584–590. — DOI: 10.31857/S0367676524040091.
2. Абгарян В.К., Мельников А.В., Купреева А.Ю., Пейсахович О.Д. Оптимизация геометрии конструкции высокочастотных двигателей и ионных источников // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2023. — № 5. — С. 103–112. — DOI: 10.31857/S1028096023050023. — 10 с.
3. Абгарян В.К., Могулкин А.И., Мельников А.В., Пейсахович О.Д., Хартов С.А. Исследования высокочастотного ионного двигателя с четырехэлектродной системой ускорения // Тепловые процессы в технике. — 2025. — № 9. — С. 55–81. — 27 с.
4. Анамова Р.Р., Леонова С.А., Хотина Г.К., Пейсахович О.Д. Технология конструирования листовых изделий сложной формы в системе геометрического моделирования SolidWorks // Справочник. Инженерный журнал. — 2023. — № 5. — С. 24–39. — DOI: 10.14489/hb.2023.05.pp.024-039. — 16 с.
5. Антропов, Н. Н., Ахметжанов, Р. В., Богатый, А. В. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2016. — № 2. — С. 4–14.
6. Ахметжанов, А. В., Богатый, Р. А., Гришин, ... Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя // Космическая техника и технологии. — 2019. — № 4(27). — С. 45–55.
7. Ахметжанов, Р. В., Богатый, А. В., Дронов, П. А. Высокочастотный ионный двигатель малой мощности // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнёва. — 2015. — Т. 16, № 2. — С. 378–385.

8. Важенин, Н. А., Обухов, В. А., Плохих, А. П., Попов, Г. А. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 432 с. — ISBN 978-5-9221-1410-3.
9. Григорян, В. Г. Системы ускорения электростатических ДЛА : учеб. пособие. — М. : МАИ, 1984. — 35 с.
10. Гусев, Ю. Г., Пильников, А. В., Суворов, С. Е. Сравнительный анализ выбора ЭРДУ большой мощности и перспективы их применения в системах межорбитальной транспортировки и для исследования дальнего космоса // Космическая техника и технологии. — 2019. — № 4(27). — С. 45–55.
11. Елаков А.Б., Богачев Е.А., Перминова Ю.С., Могулкин А.И., Мельников А.В., Пейсахович О.Д. Возможности использования плотного углерод-углеродного композита на нетканой основе в ионно-оптических системах ионных источников // Инженерно-физический журнал. — 2024. — Т. 97, № 1. — С. 154–162.
12. Ермошкин, Ю. М., Внуков, А. А., Волков, Д. В., Кочев, Ю. В., Симанов, Р. С., Якимов, Е. Н., Приданников, С. Ю. Особенности довыведения космических аппаратов «Экспресс-АМУ3», «Экспресс-АМУ7» на геостационарную орбиту // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2022. — Т. 23, № 4. — С. 696–707. — DOI: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-696-707.
13. Источник ионов с холодным катодом КЛАН-53М. Система электропитания СЕФ-53М : техническое описание. Инструкция по эксплуатации № 2321. — М., 2023.
14. Казаков, Е. Н., Смирнова, М. Е., Хартов, С. А. Анализ проблем использования четырёхэлектродных ионно-оптических систем для перспективных электроракетных двигателей // Труды МАИ. — 2020. — Вып. 70.
15. Ким, В. П., Семенкин, А. В., Хартов, С. А. Конструктивные и физические особенности двигателей с замкнутым дрейфом электронов. — М. : МАИ, 2016. — 159 с.

16. Кожевников, А. В., Мельников, А. В., Хартов, С. А. Диагностика локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя тройным электростатическим зондом // Современные средства диагностики плазмы и их применение: сб. тез. докл. XI конф. (Москва, НИЯУ МИФИ, 13–15 нояб. 2018 г.). — М. : Изд-во НИЯУ МИФИ, 2018. — С. 61–64.
17. Кожевников, А. В., Мельников, А. В., Хартов, С. А. Диагностика локальных параметров плазмы высокочастотного ионного двигателя с дополнительной магнитной системой // Королёвские чтения : сб. тез. докл. XLIII акад. чтений по космонавтике (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 29.01–01.02.2019). — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — Т. 1. — С. 97–99.
18. Кожевников, В. В., Мельников, А. В., Назаренко, И. П., Хартов, С. А. Высокочастотный ионный двигатель с дополнительной магнитной системой // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2019. — № 3. — С. 40–51.
19. Кожевников, В. В., Мельников, А. В., Хартов, С. А. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя с дополнительным магнитным полем // Авиация и космонавтика – 2018 : сб. тез. докл. 17-й междунар. конф. (Москва, 19–23 нояб. 2018 г.). — М. : Люксор, 2018. — С. 90–91.
20. Коллайдеры и детекторы в ИЯФ СО РАН / ред. А. Н. Скринский. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2018. — 440 с. — ISBN 978-5-8042-0613-1.
21. Лёб, Х. В., Попов, Г. А., Обухов, В. А. и др. Крупногабаритные высокочастотные ионные двигатели // Труды МАИ. — 2012. — № 60. — URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35371> (дата обращения: 02.09.2025).
22. Лемешко, Б. Ю., Лемешко, С. Б. Расширение области применения критериев типа Граббса, используемых при отбраковке аномальных измерений // Измерительная техника. — 2005. — № 6. — С. 13–19.
23. Ловцов, А. С., Кравченко, Д. А., Томилин, Д. А., Шагайда, А. А. Современное состояние разработок и применения электрических ракетных двигателей

- основных типов // Физика плазмы. — 2022. — Т. 48, № 9. — С. 792–822. — DOI: 10.31857/S0367292122600467.
24. Ловцов, А. С., Селиванов, М. Ю., Томилин, Д. А., Шагайда, А. А., Шашков, А. С. Основные результаты разработок Центра Келдыша в области ЭРДУ // Известия РАН. Энергетика. — 2020. — № 2. — С. 3–15. — DOI: 10.31857/S0002331020020077.
 25. Мадеев С. В. Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05. — М. : Исследовательский центр им. М. В. Келдыша, 2020. — 131 с. — URL: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=xxxxxx (дата обращения: 02.09.2025).
 26. Мельников, А. В. Высокочастотный ионный двигатель с дополнительным постоянным магнитным полем : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05. — М. : МАИ, 2019. — 157 с. — URL: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=108054 (дата обращения: 02.09.2025).
 27. Мельников, А. В. Исследование работы высокочастотного ионного двигателя с полусферической камерой при наличии внешнего магнитного поля // Гагаринские чтения – 2018 : сб. тез. докл. XLIV междунар. молодёжной науч. конф. (Москва, 17–20 апр. 2018 г.). — М. : Изд-во МАИ, 2018. — Т. 1. — С. 187.
 28. Могулкин, А. И. Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05. — М., 2015. — URL: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=61351 (дата обращения: 02.09.2025).
 29. Пейсахович, О. Д., Мельников, А. В., Могулкин, А. И., Хартов, С. А. Высокочастотный ионный двигатель с четырёхэлектродной ионно-оптической

- системой [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2025. — Вып. 4. — URL: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/2442/eng/2442.pdf> (дата обращения: 29.08.2025).
30. Роскосмос. Обсуждение стратегии развития госкорпорации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/23380/> (дата обращения: 08.08.2025).
 31. Свотина, В. В. Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора : дис. ... канд. техн. наук : 2.5.15. — М., 2023. — URL: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=174276 (дата обращения: 02.09.2025).
 32. Селиванов, М. Ю., Федянин, Н. К., Кравченко, Д. А., Сабитова, А. В. Совершенствование схемы ионного двигателя ИД-200 // Журнал технической физики. — 2024. — Т. 94, № 11. — DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59107.80-24.
 33. Суворов, М. О. Тяговый узел прямоточного воздушного электроракетного двигателя : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МАИ, 2018. — 154 с. — URL: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=97715 (дата обращения: 02.09.2025).
 34. Федеральная космическая программа России на 2016 – 2025 годы: утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 23 марта 2016 г. № 230.
 35. Хартов, С. А., Смирнова, М. В., Фейли, Д. Экспериментальные исследования потоков частиц на поверхности решёток в многосеточных ионно-оптических системах // Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT (Hyogo-Kobe, Japan, 4–10 июля 2015 г.). — 2015. — IEPC-2015-219.
 36. Хвостенко, П. П. Электромагнитная система сверхпроводящего токамака Т-15 и концепция термоядерного источника нейтронов на основе токамака Т-15МД : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : НИЦ «Курчатовский институт», 2015. — 303 с.

37. Ходненко, В. П., Хромов, А. В. Выбор проектных параметров системы коррекции орбиты космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2011. — Т. 121, № 2. — С. 15–22.
38. Программа «Моделирование потоков заряженных частиц в ионно-оптических системах ионных двигателей (IOS-3D)» : версия 6.4.0.1 [Электронный ресурс] / разработчик А. А. Шагайда ; правообладатель ГНЦ РФ «Исследовательский центр им. М. В. Келдыша». — Режим доступа: <https://keldysh-space.ru/nashadeyatelnost/raketno-kosmicheskaya-deyatelnost/raketnye-dvigateli/> (дата обращения: 02.09.2025).
39. Официальный сайт разработчика COMSOL [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.comsol.com/> (дата обращения: 28.08.2025).
40. Официальный сайт разработчика программного комплекса IGUN [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.egun-igun.com/> (дата обращения: 28.08.2025).
41. Космический аппарат для очистки околоземного пространства от космического мусора : пат. RU 2784740 C1 / Могулкин А. И., Мельников А. В., Обухов В. А., Пейсахович О. Д., Свотина В. В., Покрышкин А. И. ; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт». — 2022.
42. Газоэлектрическая развязка газоразрядного узла ионного источника и способ изготовления её основных деталей : пат. RU 2752857 C1 / Могулкин А. И., Балашов В. В., Нигматзянов В. В., Пейсахович О. Д., Рябый В. А., Свотина В. В., Ситников С. А. ; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт». — 2022.
43. Abgaryan, V. K., Demchenko, D. S., Melnikov, A. V., Peysakhovich, O. D. A radio-frequency ion thruster with magnetic shielding of the discharge chamber's walls // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2024. — Vol. 88. — P. 498–504. — DOI: 10.1134/S1062873823706190.

44. Bond, R. A., Fearn, D. G., Wallace, N. C., Mundy, D. H. The optimisation of the UK-10 ion thruster extraction grid system // Proc. of the 25th International Electric Propulsion Conference (IEPC-97-138). — Cleveland, OH, USA : NASA Lewis Research Center, 1997. — P. 876–883.
45. Bramanti, C., Fearn, D. G. Initial experiments on a dual-stage 4-grid ion thruster // IEPC Paper. — 2005. — № IEPC-2005-118.
46. Bramanti, C., Fearn, D. G. The design and operation of beam diagnostics for the dual stage 4-grid ion thruster // Proc. of the 30th International Electric Propulsion Conference. — Florence, Italy, 2007. — IEPC-2007-050.
47. Bramanti, C., Izzo, D., Samarai, T., Walker, R., Fern, D. Very high delta-V missions to the edge of the solar system and beyond enabled by the dual-stage 4-grid ion thruster concept // Acta Astronautica. — 2009. — Vol. 64, № 7–8. — P. 735–744. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2008.11.013.
48. Bramanti, C., Walker, R., Sutherland, O., Boswell, R., Charles, C., Fearn, D., Gonzalez Del Amo, J., Orlandi, M. The innovative dual-stage 4-grid ion thruster concept — theory and experimental results // 57th International Astronautical Congress (IAC). — Valencia, Spain, 2006. — IAC-06-C4.4.7.
49. Cherkasova M.V., Svitina V.V., Mogulkin A.I., Melnikov A.V., Obukhov V.A. Optimizing the Design Geometry of Radio-Frequency Ion Thrusters and Ion Sources // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2023. — Vol. 17, No. 1. — P. 135–143. — DOI: 10.1134/S1027451023010020.
50. Coletti, M., Gabriel, S. B. Design of a dual stage gridded ion engine for the HiPER project // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. — Nashville, TN, 2010. — AIAA 2010-7113. — DOI: 10.2514/6.2010-7113.
51. Coletti, M., Gabriel, S. B. The applicability of dual stage ion optics to ion engines for high power missions // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2012. — Vol. 40, № 9. — P. 2133–2142. — DOI: 10.1109/TPS.2012.2185953.

52. Coletti, M., Gessini, P., Gabriel, S. B. A 4-gridded ion engine for high impulse mission // Proc. of the 31st International Electric Propulsion Conference. — Ann Arbor, MI, USA, 2009.
53. Coletti, M., Marques, R. I., Gabriel, S. B. Discharge hollow cathode design for a 4-gridded ion engine // 2010 IEEE Aerospace Conference. — Big Sky, MT, USA, 2010. — DOI: 10.1109/AERO.2010.5446771.
54. Coupland, J. R., Thompson, E. The production of high current, high quality beams of ions and neutral particles // Review of Scientific Instruments. — 1971. — Vol. 42, № 7. — P. 1034–1039. — DOI: 10.1063/1.1685273.
55. Elakov, A. B., Bogachev, E. A., Perminova, Yu. S., Mogulkin, A. I., Mel'nikov, A. V., Peysakhovich, O. D. Possibilities of using dense carbon–carbon composite on a nonwoven warp in ion-optical systems of ion sources // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2024. — Vol. ... — P. 534–547. — DOI: 10.1007/s10891-024-02878.
56. Emhoff, J. W., Boyd, I. D., Farnell, C. C., Williams, J. D. NEXT Ion Engine perveance and beamlet expansion modeling. — Johns Hopkins Univ. Applied Physics Laboratory ; University of Michigan, 2005.
57. Emhoff, J. W., Boyd, I. D., Farnell, C. C., Williams, J. D. Perveance and beamlet expansion modeling of the NEXT ion engine // 29th International Electric Propulsion Conference. — Princeton Univ., 31 Oct. – 4 Nov. 2005. — IEPC-2005-155.
58. Gabriel, S. B., Fearn, D. G., Bramanti, C., Walker, R., Gonzalez del Amo, J. HiPER: a roadmap for future space transportation using high power electric propulsion // Acta Astronautica. — 2009. — Vol. 65. — P. 135–144. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.01.001.
59. Garner, C., Rayman, M., Brophy, J., Mikes, S. In-flight operation of the Dawn ion propulsion system through the preparations for escape from Vesta // 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2012. — 20150008767. — hdl:2014/44986.

60. Goebel, D. M., Katz, I. Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. — 486 p.
61. Goebel, D. M., Polk, J. E., Sandler, I., Mikellides, I. G., Brophy, J. R. Evaluation of 25-cm XIPS® thruster life for deep space mission applications // Proc. of the 31st International Electric Propulsion Conference. — University of Michigan, USA, 20–24 Sept. 2009. — IEPC-2009-152.
62. Goebel, D. M., Polk, J. E., Wirz, R. E., Snyder, J. S., Mikellides, I. G., Katz, I., Anderson, J. Qualification of commercial XIPS® ion thrusters for NASA deep space missions. — Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
63. Hayashi, M. Bibliography of electron and photon cross sections with atoms and molecules published in the 20th century — Xenon — // Research Report NIFS-DATA-79. — Toki, Japan : National Institute for Fusion Science, 2003.
64. Interface Circuits for TIA/EIA-232-F : Design notes. — Dallas, TX, USA : Texas Instruments Inc., 2002.
65. Katz, I., Brophy, J. R., Anderson, J. R., Polk, J. E., Goebel, D. M. Technologies to improve ion propulsion system performance, life and efficiency // STAIF-2003: Space Technology and Applications International Forum. — Albuquerque, New Mexico, 2003. — AIP Conf. Proc.
66. Killinger, R., Bassner, H., Müller, J. Development of a high performance RF-ion thruster // 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. — Los Angeles, USA, 1999. — AIAA-99-2445.
67. Kim, J., Gardner, W. L., Menon, M. M. Experimental study of ion beam optics in a two-stage accelerator // Review of Scientific Instruments. — 1979. — Vol. 50, № 2. — P. 201–206. — DOI: 10.1063/1.1135787.
68. Kuninaka, H., Kajivara, K. Overview of JAXA's activities on electric propulsion // Proc. of the 32nd International Electric Propulsion Conference. — Wiesbaden, Germany, 11–15 Sept. 2011. — IEPC-2011-332.

69. Leiter, H. J., Koch, N., Harmann, H. RIT-15: a medium thrust-range radio frequency ion thruster // Proc. of the 25th International Electric Propulsion Conference. — Cleveland, OH, USA, 1997.
70. Leiter, H. J., и др. Performance improvement of radiofrequency ion thrusters — the evolution of the RIT-15 ion engine // Proc. of the 26th International Electric Propulsion Conference. — Kitakyushu, Japan, 17–21 Oct. 1999. — IEPC-99-154.
71. Lewis, R. A., Perez Luna, J., Coombs, N., Guarducci, F. Qualification of the T6 thruster for BepiColombo // Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT (Hyogo-Kobe, Japan, 4–10 July 2015). — 2015. — IEPC-2015-132 / ISTS-2015-b-132.
72. Loeb, H. W. Principle of radio-frequency ion thrusters RIT. RIT-22 demonstrator test of Astrium ST at University of Giessen. — 2010. — P. 6–11.
73. Loeb, H. W. State of the art and recent developments of the radio frequency ion motors // Proc. of the 7th Electric Propulsion Conference. — Williamsburg, Virginia, USA, 3–5 Mar. 1969. — AIAA-69-285.
74. Lymberopoulos, D., Economou, D. Two-dimensional self-consistent radio-frequency plasma simulations relevant to the GEC RF reference cell // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. — 1995. — Vol. 100, № 4. — P. 473–494.
75. Martin, A. R. High power beams for neutral injection heating // Vacuum. — 1984. — Vol. 34, № 1–2. — P. 17–24. — DOI: 10.1016/0042-207X(84)90100-3.
76. Martinez, R. A., Haag, T. W., Patterson, M. J. Evaluation of sub-scale NEXIS ion optics and strategies for performing accelerated wear testing // Proc. of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. — 2004. — AIAA-2004-3628. — 16 p.
77. Melnikov, A. V., Abgaryan, V. K., Mogulkin, A. I., Peysakhovich, O. D., Svtina, V. V. Experimental study of ion beam interaction with target surface aimed at developing a contactless method for space debris removal by an ion beam // Acta

- Astronautica. — 2024. — Vol. 216. — P. 120–128. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.01.004.
78. Melnikov, A. V., Abgaryan, V. K., Peysakhovich, O. D., Demchenko, D. S. Promising methods for improving the radio-frequency ion thruster performance // Acta Astronautica. — 2024. — Vol. 215. — P. 534–537. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.12.031.
 79. Melnikov, A. V., Bogachev, E. A., Elakov, A. B., Mogulkin, A. I., Obukhov, V. A., Perminova, Yu., Peysakhovich, O. D., Pokrishkin, A. I., Svitina, V. V., Cherkasova, M. V. Computational and experimental study of an ion injector of a weakly divergent ion beam for implementing a method for removing space debris objects by an ion beam // Acta Astronautica. — 2023. — Vol. 204. — P. 815–825. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.12.026.
 80. MKS Type 1179A and 2179A Mass-Flow Controller and Type 179A Mass-Flow Meter : Instruction manual [Электронный ресурс]. — Andover, MA, USA : MKS Instruments Inc. — Режим доступа: <https://www.mks.com/> (дата обращения: 02.09.2025).
 81. MKS Type 247D Four-Channel Readout : Manual [Электронный ресурс]. — Andover, MA, USA : MKS Instruments Inc. — Режим доступа: <https://www.mks.com/> (дата обращения: 02.09.2025).
 82. Mundy, H. D. Characterisation of the UK-10 ion thruster for the ARTEMIS programme // European Spacecraft Propulsion Conference : Proc. — Noordwijk : ESA Publications Division, 1997. — (ESA SP-398). — P. 235–240.
 83. Peukert, M., Wollenhaupt, B. OHB-System's view on electric propulsion needs // EPIC Workshop (Brussels, 25 Nov. 2014). — 2014.
 84. Polk, J. E., Anderson, J. R., Brophy, J. R., Garner, C. E., Sengupta, A., Snyder, J. S., Juhlin, N. E., Sullivan, B. P. An overview of the Nuclear Electric Xenon Ion System (NEXIS) program // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. — Huntsville, Alabama, 20–23 July 2003. — AIAA 2003-4862. — DOI: 10.2514/6.2003-4862.

85. Polk, J. E., Anderson, J. R., Brophy, J. R., и др. The results of an 8200-hour wear test of the NSTAR ion thruster // Proc. of the 27th International Electric Propulsion Conference. — Pasadena, CA, USA, 2001. — IEPC-01-085.
86. Randall, P. N., Lewis, R. A., Clark, S. D., Hall, K. W. T5 performance, industrialisation and future applications // 36th International Electric Propulsion Conference (IEPC 2019): Proc. — Vienna, Austria, 15–20 Sept. 2019. — IEPC-2019-688.
87. Rawlin, V. K., Williams, G. J., Piñero, L. R., Roman, R. F. Status of ion engine development for high power, high specific impulse missions // 27th International Electric Propulsion Conference. — Pasadena, CA, 15–19 Oct. 2001. — IEPC-01-096.
88. Sangregorio, M., Xie, K., Wang, N., Guo, N., Zhang, Z. Ion engine grids: function, main parameters, issues, configurations, geometries, materials and fabrication methods // Chinese Journal of Aeronautics. — 2018. — DOI: 10.1016/j.cja.2018.06.005.
89. Smirnova, E. I., Zakharov, S. V. Experimental investigation of particles fluxes to the grid surfaces inside ion optic systems // Journal of Propulsion and Power. — 2007. — Vol. 23, № 5. — P. 1002–1008. — DOI: 10.2514/1.25842.
90. Smirnova, E. I., Zakharov, S. V. Test campaign for diagnostics of 4-grid ion optical systems // 30th International Electric Propulsion Conference. — Florence, Italy, 2007. — IEPC-2007-049.
91. Smirnova, M., Mingo, A., Schein, J., Smirnov, P., Bosch, E., Massotti, L. Test campaign on the novel Variable Isp Radio Frequency Mini Ion Engine // 36th International Electric Propulsion Conference. — University of Vienna, Vienna, Austria, 15–20 Sept. 2019. — IEPC-2019-A-574.
92. Svitina, V. V., Cherkasova, M. V., Mogulkin, A. I., Melnikov, A. V., Peysakhovich, O. D. Ion source — mathematical simulation results versus experimental data // Aerospace. — 2021. — Vol. 8, № 10. — Art. 276. — DOI: 10.3390/aerospace8100276.

93. Toigo, V., Boilson, D., Chakraborty, A. K., и др. Progress in the realization of the PRIMA neutral beam test facility // *Nuclear Fusion*. — 2015. — Vol. 55, № 8. — DOI: 10.1088/0029-5515/55/8/083025.
94. Walker, R., Bramanti, C., Sutherland, O., Boswell, R., Charles, C., Fearn, D., Del Amo, J. G., Frigott, P. E., Orlandi, M. Initial experiments on a dual-stage 4-grid ion thruster for very high specific impulse and power // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9–12 July 2006, Sacramento, California. — DOI: 10.2514/6.2006-4669.
95. Wertz, J., Larson, J. W. Space mission analysis and design. — 3rd ed. — El Segundo, CA : Microcosm Press, 1999. — 969 p.
96. Williams, J. D., Laufer, D. M., Wilbur, P. J. Experimental performance limits on high specific impulse ion optics // 28th International Electric Propulsion Conference. — Toulouse, France, 17–21 Mar. 2003. — IEPC-2003-128.
97. Xie, K., Sangregorio, M. Ion optics in ion thrusters: a review of grid configurations, geometries, and materials // *Chinese Journal of Aeronautics*. — 2018.
98. Zou, G. Q., Cao, J. Y., Lei, G. J., и др. Study of ion beam extraction elements for HL-2M neutral beam injector // 40th EPS Conference on Plasma Physics. — P1.140. — Chengdu, China : Southwestern Institute of Physics.

Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертационной работы

«Утверждаю»
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
Д.А. Козорез
«20» 02 2025 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертации Пейсаховича Олега Дмитриевича в
учебный процесс Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

Комиссия в составе:

председатель: заведующий кафедрой 208, д.т.н., А.Б. Надирадзе
члены комиссии: профессор кафедры 208, д.т.н. И.П. Назаренко, профессор
кафедры 208, д.т.н. С.А. Хартов,

составила настоящий акт о том, что полученные в диссертации Пейсаховича Олега Дмитриевича на тему «Высокочастотный ионный двигатель с четырёхэлектродной системой ускорения» научные результаты, а именно: новые данные о процессах протекающих в четырёхэлектродных системах ускорения ионных двигателей, используются в учебном процессе кафедры 208 МАИ при преподавании дисциплин: «Прикладные вопросы расчета сильноточных ЭРД» по направлению специализированного высшего образования 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов» (программа «Перспективные электроракетные двигатели космических аппаратов») и «Теория и расчет электроракетных двигателей» по направлению базового высшего образования 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (программа «Проектирование электроракетных двигателей»).

Научные результаты, полученные Пейсаховичем Олегом Дмитриевичем при выполнении диссертационной работы, позволяют студентам более полно осваивать вопросы современных теоретических и практических представлений о процессах, протекающих в четырёхэлектродных системах ускорения ионных двигателей, практические результаты позволяют осваивать подходы к проектированию ионных двигателей с повышенными плотностью тяги и удельным импульсом.

Председатель комиссии

А.Б. Надирадзе

Члены комиссии

И.П. Назаренко

С.А. Хартов

«20» 02 2025 г.