

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Дудин Василий Сергеевич

**Оптимизация высокочастотного воздушного источника плазмы
для получения электрореактивной тяги**

Специальность 1.3.9. Физика плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
Кралькина Елена Александровна

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	5
Введение	6
Глава 1. Обзор литературы.....	32
1.1 Современное состояние исследований по теме создания воздушного электрореактивного двигателя	32
1.2 Анализ существующих ЭРД и возможность их использования в составе ВЭРД	35
1.3 Особенности разряда в ВЧ ионных двигателях	40
1.3.1 Индуктивный разряд без магнитного поля	40
1.3.2 Эквивалентное сопротивление плазмы индуктивного ВЧ разряда	43
1.3.3 Влияние внешнего магнитного поля на индуктивный ВЧ разряд	46
1.4 Постановка задачи	47
Глава 2. Требования к воздушному электрореактивному двигателю для поддержания полёта на ультранизких околоземных орбитах.....	49
2.1 Требования к характеристикам ВЭРД.....	49
2.2 Влияние колебаний плотности атмосферы ультранизких орбит на работу ВЭРД	55
2.3 Требования к энерговооружённости КА с ВЭРД.....	57
Глава 3. Экспериментальная установка и методы исследования.....	59
3.1 Общий вид экспериментальной установки.....	59
3.2 Схема прототипа индуктивного ВЧ ионного двигателя	60
3.3 Методики экспериментальных исследований	62
3.3.1 Методика измерения вложенной в разряд мощности	62
3.3.2 Пояс Роговского	63

3.3.3	Методика определения влияния магнитного поля на характеристики разряда	64
3.3.4	Методика определения КИРТ и цены иона.....	64
3.3.5	Методика зондовых измерений	65
3.3.6	Методика спектральных измерений.....	67
3.3.7	Методика измерения функции распределения ионов по энергиям в вылетающем пучке ионов с помощью энергоанализатора	67
Глава 4. Исследование особенностей работы ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления, предназначенных для получения электрореактивной тяги, при работе только на атмосферных газах.....		
4.1	Физические особенности ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления при работе исключительно на атмосферных газах.....	69
4.2	Характеристики прототипов воздушных ВЧ ИД, основанных на рассмотренных индуктивных источниках плазмы.....	81
4.3	Основные итоги	87
Глава 5. Исследование особенностей работы прототипов ВЧ ИД на смесях атмосферных газов с инертными.....		
5.1	Физические особенности ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления при работе на смесях атмосферных газов с инертными	88
5.2	Влияние добавки инертного газа на концепцию ВЭРД.	95
5.3	Характеристики прототипов воздушных ВЧ ИД, основанных на индуктивных источниках плазмы, работающих на смеси атмосферных газов с инертными	98
5.4	Основные выводы.....	103
Глава 6. Глобальная модель ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления, предназначенных для получения электрореактивной тяги		

6.1	Формулировка модели	105
6.2	Результаты численного моделирования характеристик источников плазмы, работающих исключительно на атмосферных газах.....	109
6.3	Результаты численного моделирования характеристик источников плазмы, работающих на смеси атмосферных и инертных газов	115
Заключение		119
Благодарности.....		121
Список публикаций по теме диссертации.....		122
Список литературы.....		123

Список сокращений

ВЧ – высокочастотный

ВЭРД – воздушный электрореактивный двигатель

ГРК – газоразрядная камера

ГКИРТ – «гибридный» коэффициент использования рабочего тела

ИД – ионный двигатель

ИОС – ионно-оптическая система

КА – космический аппарат

КИРТ – коэффициент использования рабочего тела

МП – магнитное поле

МС – магнитная система

РТ – рабочее тело

УНОО – ультранизкие околоземные орбиты

ФРИЭ – функция распределения ионов по энергиям

ФРЭЭ – функция распределения электронов по энергиям

ЭРД – электрореактивный двигатель

Введение

Актуальность темы. Длительные полеты космических аппаратов (КА) на ультранизких околоземных орбитах (УНОО) с высотой 150 – 300 км открывают широкие перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций, а также широкого круга научных исследований. Преимуществами полетов КА на УНОО являются уменьшение стоимости и размеров КА, улучшение точности геолокации и разрешения изображений поверхности Земли, увеличение отношения сигнал/шум в задачах радиолокации, а также уменьшение радиационного воздействия на КА. Ещё одним важным преимуществом ультранизких орбит является исключение риска столкновения с космическим мусором и засорения орбит обломками, так как при достижении целевого срока службы КА будет происходить его гарантированное самоудаление с орбиты вследствие аэродинамического торможения.

В то же время аэродинамическое торможение КА, вызванное относительно высокой плотностью остаточной атмосферы, является основной проблемой длительного поддержания КА на ультранизких орбитах. Существенно увеличить срок активного существования возможно при оснащении КА электрореактивным двигателем (ЭРД) с тягой, достаточной для компенсации аэродинамического сопротивления. Вместе с тем оценки показывают, что запасы стандартного топлива (ксенона), необходимые для длительной работы ЭРД на орбитах ниже 250 км, неоправданно велики. В связи с этим решение проблемы полетов на УНОО в настоящее время связывают с применением воздушных электроракетных двигателей (ВЭРД), использующих заборные атмосферные газы в качестве рабочего тела. Разработка ВЭРД требует решения целого ряда взаимосвязанных задач, важнейшими из которых является формулировка требований, предъявляемых к ЭРД, как основе ВЭРД, а также создание новых и адаптация существующих схем ЭРД к работе на атмосферных газах.

В связи с существующим запросом в настоящей работе в качестве кандидатов для использования в составе ВЭРД рассмотрены прототипы ионного двигателя (ИД), рабочие режимы которых основаны на индуктивном высокочастотном (ВЧ)

разряде при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля (МП). Обе модификации разряда являются безэлектродными и не требуют наличия катода. В диссертации уточнены требования к характеристикам ЭРД, предназначенным для работы в составе ВЭРД, выполнены комплексные, систематические исследования физических процессов в газоразрядных камерах (ГРК) прототипов ВЧ ИД, измерены интегральные характеристики прототипов при внешних параметрах, типичных для УНОО, а также проанализированы режимы их работы с точки зрения возможности использования для компенсации сопротивления остаточной атмосферы. Это определяет актуальность данной работы.

Объект исследования – индуктивный ВЧ разряд в газоразрядных камерах прототипов ВЧ индуктивного ионного двигателя, позволяющий создать потоки ускоренных ионов атмосферных газов при условиях, типичных для полетов космических аппаратов на ультранизких околоземных орбитах, физические процессы, происходящие в нём при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля.

ВЧ разряд в атмосферных газах (азоте и кислороде) значительно отличается от хорошо изученного в применении к ЭРД разряда ксенона более сложной картиной элементарных процессов, значительно более низкими концентрациями плазмы, более высокой температурой электронов в разряде при равных условиях, что приводит к появлению ряда важных физических особенностей и проблем при организации работы ВЧ индуктивного ионного двигателя на ультранизких околоземных орбитах.

Предмет исследования – интегральные характеристики прототипов ВЧ индуктивных ионных двигателей: мощность ВЧ генератора P_{gen} , необходимая для поддержания разряда, ток I_{ant} , текущий через антенну, мощность P_{pl} , вложенная в разряд, ток пучка ионов i_{beam} , расход рабочего тела f_l , коэффициент использования рабочего тела γ , функция распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) в пучке на выходе из прототипов ВЧ ионного двигателя; а также локальные характеристики плазмы в ГРК: концентрация n_e и температура электронов T_e , потенциал пространства, спектр свечения плазмы.

Цель работы – изучить физические процессы в прототипах ВЧ ИД, работающих на индуктивном ВЧ разряде при наличии и отсутствии магнитного поля, и установить возможность использования прототипов в качестве основы воздушного электрореактивного двигателя, предназначенного для освоения ультранизких околоземных орбит долгоживущими космическими аппаратами.

Для достижения указанной цели в рамках диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Определить основные требования к воздушному электроракетному двигателю.

2. Измерить характеристики прототипов высокочастотных ионных двигателей, работающих на следующих модификациях ВЧ разряда:

а) ВЧ индуктивный разряд;

б) ВЧ индуктивный разряд с внешним магнитным полем;

при использовании в качестве рабочих газов азота, кислорода и их смесей с инертными газами.

3. Выделить режимы, удовлетворяющие требованиям полётов на ультранизких околоземных орбитах.

4. Измерить параметры плазмы на режимах, близких к рабочим режимам воздушного электрореактивного двигателя на ультранизких околоземных орбитах.

5. Выполнить численное моделирование физических процессов в плазме в газоразрядных камерах прототипов ВЧ ионного двигателя на режимах, близких к рабочим режимам воздушного электрореактивного двигателя на ультранизких околоземных орбитах и сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными.

Методология исследования. Для решения поставленных задач был подготовлен экспериментальный стенд, позволяющий измерять интегральные характеристики прототипов ВЧ ИД: мощность ВЧ генератора, поддерживающего разряд, ток, текущий через антенну, мощность, вложенную в разряд, ток пучка ионов, расход рабочего тела, коэффициент использования рабочего тела, функцию распределения ионов по энергиям в пучке на выходе из прототипов ВЧ ИД, а также

локальные характеристики плазмы в ГРК: концентрацию и температуру электронов, потенциал пространства, спектр свечения плазмы. Использовались цифровые приборы: спектрометр, осциллограф, компьютер. Численные расчеты были выполнены на основании разработанной глобальной модели индуктивного ВЧ разряда.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Скорректированы требования, предъявляемые к электрореактивным двигателям, предназначенным для полётов на УНОО в составе ВЭРД, работающих исключительно на заборных газах. Показано, что ключевым фактором, обеспечивающим возможность использования конкретного ЭРД для полетов КА на УНОО, является достижение двигателем порогового значения удельного импульса, которое определяется только формой космического аппарата и эффективностью воздухозаборника.
2. Впервые показано, что энергозатраты на получение необходимого значения удельного импульса немонотонно зависят от коэффициента использования рабочего тела. Минимум энергозатрат в рассмотренных случаях наблюдается при энергии ионов порядка 1000 – 2000 эВ и коэффициенте использования рабочего тела $0.3 \div 0.4$. Минимальные энергозатраты увеличиваются с повышением расхода азота и кислорода и уменьшением длины газоразрядной камеры.
3. Экспериментально показано, что удельный импульс двигателя не менее 30000 м/с, необходимый для компенсации сопротивления остаточной атмосферы на высоте порядка 200 км, достигнут при затратах мощности на генерацию разряда и ускорение ионов менее 600 Вт в экспериментах с прототипом ВЧ ИД с газоразрядной камерой длиной 9 см при использовании внешнего магнитного поля с индукцией 50 – 80 Гс и расходах остаточных газов, поступающих в ВЧ ИД, 3 – 6 sccm.
4. Показано, что уменьшение расхода рабочих газов сопровождается увеличением температуры и понижением концентрации электронов; в спектре свечения плазмы интенсивности свечения молекул и атомов азота

монотонно уменьшаются, а интенсивности свечения молекулярного и атомарного иона сначала возрастают, а затем падают, проходя через локальный максимум.

5. Впервые показано, что рядом с эмиссионным электродом ионно-оптической системы (ИОС) формируется слой пространственного заряда, в котором происходит значительное ускорение ионов. Средняя энергия ионов тем выше, чем ниже расход атмосферных газов.
6. Впервые обнаружено, что функция распределения ионов по энергиям уширяется при рабочих частотах 6.78 МГц и ниже, когда рабочая частота становится меньше ионной ленгмюровской частоты.
7. Впервые показано, что добавка инертного газа в рабочую газовую смесь улучшает параметры разряда, снижает требования к интегральным характеристикам двигателя и увеличивает его ресурс.

Степень достоверности. Экспериментальная работа выполнялась с использованием надежного сертифицированного оборудования и общепринятых методик измерений и диагностик плазмы. Измерения проводились в соответствии с правилами научного эксперимента. В работе применялись современные методы сбора, хранения и обработки данных, а результаты сопоставлялись с ранее достоверно проведенными исследованиями, теоретическими расчетами и математическим моделированием. Это позволяет считать результаты обоснованными и достоверными.

Положения, выносимые на защиту.

1. Для достижения порогового значения удельного импульса двигателя, необходимого для обеспечения полётов космических аппаратов на ультранизких орбитах при использовании только забортных газов остаточной атмосферы, коэффициент использования рабочего тела (забортных газов) должен быть не менее 0.3 – 0.4 при энергии ионов 1000 – 2000 эВ. При этом энергозатраты на получение порогового значения удельного импульса немонотонно зависят от коэффициента использования рабочего тела. Минимум энергозатрат в рассмотренных случаях наблюдается при энергии ионов порядка

1000 – 2000 эВ и коэффициенте использования рабочего тела не менее 0.3. Энергозатраты возрастают с увеличением расхода заборных газов, поступающих в прототип двигателя, и уменьшаются с увеличением длины газоразрядной камеры за счёт возможности работы на меньших расходах рабочих газов.

2. Удельный импульс не менее 30000 м/с, необходимый для компенсации сопротивления остаточной атмосферы на высоте порядка 200 км, при затратах мощности на генерацию разряда и ускорение ионов менее 600 Вт достигнут в экспериментах с прототипом ВЧ ионного двигателя с газоразрядной камерой длиной 9 см при использовании внешнего магнитного поля с индукцией 50 – 80 Гс и расходах остаточных газов, поступающих в ВЧ ионный двигатель, 3 – 6 sccm.
3. На рабочих режимах прототипов ВЧ ионного двигателя, работающих на заборных газах, концентрация плазмы ниже, а температуры электронов выше, чем в ВЧ ионных двигателях, работающих на ксеноне. Вблизи эмиссионного электрода ионно-оптической системы формируется слой пространственного заряда, в котором происходит значительное ускорение ионов. Средняя энергия ионов тем выше, чем ниже расход атмосферных газов. Функция распределения ионов по энергиям уширяется при рабочих частотах 6.78 МГц и ниже, когда рабочая частота становится меньше ионной ленгмюровской частоты.
4. Уменьшение расхода рабочих газов сопровождается значительным увеличением температуры и понижением концентрации электронов; в спектре свечения плазмы интенсивности свечения молекул и атомов азота монотонно уменьшаются, а интенсивности свечения молекулярного и атомарного иона сначала возрастают, а затем падают, проходя через локальный максимум.
5. Добавка инертного газа, в частности аргона, к потоку атмосферных газов, поступающих в прототип двигателя, позволяет понизить требования к коэффициенту использования рабочего тела, а также сгладить зависимость характеристик двигателя от суточных и сезонных колебаний концентраций

нейтральных частиц на околоземных орбитах. Она позволяет значительно увеличить концентрацию электронов в разряде, расширить рабочий диапазон двигателя по расходу заборных газов и уменьшить разность потенциалов между плазмой и эмиссионным электродом, сократив разрушающее воздействие ускоренных в слое ионов на эмиссионный электрод ионно-оптической системы и, тем самым, увеличивая рабочий ресурс двигателя.

Научная и практическая ценность работы

Исследования физических процессов в ГРК ВЧ ИД показали наличие значительных отличий от процессов, происходящих в стандартных ионных двигателях, работающих на ксеноне, вследствие более сложной картины элементарных процессов, характерных для разряда в молекулярных газах, более низких значений плотности плазмы и более высоких температур электронов.

Измерения интегральных характеристик прототипов ВЧ ИД показали возможность их использования в качестве основы ВЭРД, обеспечивающего активное существование КА на УНОО в течение длительного времени.

Помимо космических приложений, прототипы ВЧ ИД могут быть использованы как технологические источники в наземных технологиях поверхностной модификации, распыления и травления.

Результаты, полученные автором и вошедшие в диссертацию, вошли в отчеты гранта по программе поддержки Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Соглашение № 23-Ш01-02 «Комплексные исследования нового класса космических аппаратов для ультранизких орбит, использующих исключительно возобновляемые ресурсы». Исследование выполнялось с использованием оборудования, приобретенного МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках закупок «Диагностический комплекс для системы управления параметрами специализированных реакторов с ВЧ и СВЧ активацией плазмы» и «Оборудование для комплектации лаборатории по изучению и разработке широкого спектра методов создания новых наноструктурированных функциональных материалов и устройств на их основе». Работа выполнена

при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант #24-2-2-22-1).

Личный вклад автора

В диссертации приведены результаты, полученные непосредственно автором или при его активном участии. Автор принимал непосредственное участие в постановке задачи, проведении эксперимента, обработке и анализе данных, численном моделировании, подготовке статей и докладов на конференциях.

Апробация диссертации

Доклады на конференциях:

1. Дудин В.С., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Швыдкий Г.В., Никонов А.М. Особенности создания воздушного электрореактивного двигателя на основе ВЧ источника ионов [Устный доклад] // 53-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, Россия. 16-20 марта 2026.
2. Дудин В.С., Рахман В.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Доржиев А.И., Дудина В.А., Никонов А.М., Швыдкий Г.В. Влияние рабочей частоты на функции распределения ионов по энергиям в воздушном ВЧ источнике ионов [Стендовый доклад] // 53-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, Россия. 16-20 марта 2026.
3. Дудин В.С., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Никонов А.М., Швыдкий Г.В. Оптимизация прототипа высокочастотного ионного двигателя для работы в составе воздушного прямоточного электрореактивного двигателя на предельно низких околоземных орбитах [Устный доклад] // 21-ое Международное совещание "Сложные системы заряженных частиц и их взаимодействие с электромагнитным излучением - 2025" (CSCPIER-2025). Москва, Россия. 7–11 апреля 2025.
4. Вавилин К.В., Голиков А.А., Двинин С.А., Дудин В.С., Задириев И.И., Кралькина Е.А., Никонов А.М., Филатьев А.С., Швыдкий Г.В. [Устный доклад] // Оптимизация характеристик высокочастотного ионного двигателя для использования на ультранизких околоземных орбитах // XI Международный аэрокосмический конгресс. Москва, Россия. 28-31 августа 2024.

5. Дудин В.С., Кралькина Е.А., Задириев И.И., Никонов А.М., Швыдкий Г.В., Вавилин К.В. Оптимизация прототипа сеточного ионного двигателя с внешним магнитным полем, работающего на кислороде и азоте [Устный доклад] // Ломоносовские чтения – 2024. Секция Физика. Москва, Россия. 28 марта - 3 апреля 2024.
6. Дудин В.С., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Никонов А.М., Швыдкий Г.В. Оптимизация прототипа ионного двигателя с внешним магнитным полем, работающего на воздушной смеси [Устный доклад] // 51-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, Россия. 18-22 марта 2024.
7. Дудин В.С., Задириев И.И., Кралькина Е.А., Швыдкий Г.В., Вавилин К.В., Никонов А.М., Маринин С.Ю., Бондаренко Д.А. Влияние магнитного поля на характеристики прототипа ионного двигателя, работающего на воздушной смеси [Устный доклад] // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2023). Казань, Россия. 5-9 июня 2023.

Публикации

По материалам диссертации было выпущено 4 статьи [A1-A4] в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Объём и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Общий объём диссертации 134 страниц печатного текста, включающих 65 рисунков и 7 таблиц. Библиография содержит 118 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описаны объект и предмет исследования, сформулированы цели, задачи и методология исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов и личный вклад автора, а также приведены сведения об апробации работы в публикациях. Приведено краткое содержание работы.

В первой главе проведен обзор существующих концепций КА, призванных решить задачу освоения ультранизких околоземных орбит (УНОО) с использованием исключительно возобновляемых ресурсов (заборных газов), а также физических свойств индуктивного высокочастотного разряда при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля. В завершение главы сформулированы цели и задачи работы.

Схема общепринятой в настоящее время концепции КА, оснащённого воздушным электрореактивным двигателем (ВЭРД), состоит в следующем: при движении КА набегающий поток атмосферных газов попадает в воздухозаборник, частично проходит в газоразрядную камеру ВЭРД, где ионизируется и выбрасывается в виде потоков ускоренных ионов, создающих тягу, необходимую для компенсации аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы. В качестве кандидатов для использования в составе ВЭРД в литературе исследуются многочисленные схемы ЭРД [1, 2], однако, до настоящего времени ни одна из них полностью не удовлетворила всем необходимым требованиям.

Во второй главе обоснованы требования к характеристикам ВЭРД, предназначенного для компенсации аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы с учетом суточных и сезонных колебаний концентрации остаточных газов на УНОО, определён подход к оптимизации энергопотребления ВЭРД в условиях ограниченных энергетических и топливных ресурсов.

Главным отличием условий работы воздушного электрореактивного двигателя от стандартных ЭРД с запасом топлива на борту КА является прямая связь, как силы аэродинамического сопротивления D , так и тяги двигателя с потоком рабочего тела $\mu_{in} = A_{in} v_{sc} \sum_j n_j M_{0j}$, поступающим в воздухозаборник космического аппарата.

Для нахождения условия стабильного полёта приравняем величины аэродинамического сопротивления D и тяги T , развиваем двигателем [A3]:

$$T = I_{sp} \cdot \mu_{IT} = \frac{\sum_k i_{beam}^k M_i^k v_{ex}^k}{e} = \mu_{in} \eta_c \gamma \frac{M_i^*}{M_0^*} v_{ex}^* \quad (1)$$

$$D = C_{xa} A_{ref} v_{SC}^2 \sum_j n_j M_{0j} = \mu_{in} v_{SC} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}}, \quad (2)$$

где I_{sp} – удельный импульс двигателя (ЭРД в составе ВЭРД), μ_{IT} – массовый поток рабочего тела в ЭРД, i_{beam}^k – ионный ток каждого сорта ионов, M_i^k – масса ионов, M_0^k – масса нейтральных частиц набегающего потока, v_{ex}^k – скорость истечения ионов, e – заряд электрона, A_{ref} – характерная площадь поперечного сечения КА, A_{in} – площадь входного сечения воздухозаборника, C_{xa} – коэффициент аэродинамического сопротивления, определяемый формой КА, включает как лобовое, так и боковое сопротивление, ($C_{xa} \geq 2.2$), v_{SC} – орбитальная скорость КА на УНОО. M_0^* , M_i^* , v_{ex}^* – усреднённые по соответствующим потокам значения массы влетающих в ВЭРД нейтралов, массы и скорости вылетающих ионов, μ_{in} – массовый поток, набегающий на сечение воздухозаборника, η_c – эффективность воздухозаборника, $\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl}$ – коэффициент использования рабочего тела (КИРТ), где i_{beam} – полный ионный ток, fl – поток частиц в ГРК двигателя (измеряется в *ссст* – стандартных кубических сантиметрах в минуту, $1 \text{ ссст} = 2.65 \cdot 10^{19} \text{ частиц/мин} = 4.42 \cdot 10^{17} \text{ частиц/с}$).

Приравняв выражения (2) и (3), получим, что компенсация сопротивления остаточной атмосферы возможна при достижении двигателем порогового значения удельного импульса I_{sp}^* , определяемого формулой [A4]:

$$I_{sp}^* = \frac{v_{SC}}{\eta_c} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}} \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что I_{sp}^* определяется орбитальной скоростью v_{SC} , формой космического аппарата, определяющей C_{xa} , и эффективностью воздухозаборника η_c . Оценки показывают, что при использовании следующих

параметров для орбиты 200 км: $v_{sc} = 7.8$ км/с, $\eta_c = 0.3$, $C_{xa} = 2.2$ и $\frac{A_{ref}}{A_{in}} = 1$, – пороговое значение удельного импульса двигателя составляет $I_{sp}^* = 30000$ м/с.

Удельный импульс двигателя $I_{sp} = \gamma \frac{M_i}{M_0} v_{ex}$ зависит от КИРТ γ , скорости истечения ионов v_{ex} , а также от компонентного состава вылетающего потока ионов. КИРТ определяется организацией разряда в газоразрядной камере (ГРК) двигателя, а скорость истечения ионов определяется ускоряющим напряжением на ИОС U . Оценка сверху для требуемого КИРТ составляет $\gamma = 0,4$ в худшем случае, когда поток ионов из двигателя полностью состоит из атомарных ионов, при стандартном для ИОС ускоряющем напряжении $U = 1500$ В. Это значение КИРТ использовалось в работе как целевое.

Известно, что на УНОО поток газов остаточной атмосферы, поступающих в ВЭРД, может значительно (до двух раз) изменяться в связи с сезонными и суточными колебаниями «космической погоды» [3]. В связи с этим ВЭРД должен обеспечить поддержание порогового удельного импульса в широком диапазоне расходов газа fl , поступающих в ГРК двигателя, в условиях практически фиксированного потока энергии, собираемого солнечными панелями.

Полная мощность, потребляемая двигателем при работе, выражается [А4]:

$$P_{tot} = P_{gen} + I_{beam}U = i_{beam}(C_i + U), \quad (4)$$

Используя в качестве прототипа ВЭРД ионный двигатель, возможно отдельно регулировать удельный импульс двигателя, меняя КИРТ с помощью подаваемой ВЧ мощности генератора P_{gen} , и скорость вылета ионов v_{ex} – с помощью ускоряющего напряжения U . Из выражений для скорости вылета ионов $v_{ex} = \sqrt{2eU/M_i}$ и удельного импульса I_{sp} следует значение необходимого ускоряющего напряжения U_{sp} [А4] для достижения требуемого порогового значения удельного импульса I_{sp}^* в зависимости от достигнутой величины γ и массы вылетающих ионов M_i :

$$U_{sp} = \frac{M_i}{2e} \left(\frac{M_0}{M_i} I_{sp}^* \right)^2 \frac{1}{\gamma^2} \quad (5)$$

В третьей главе описаны экспериментальная установка, конструкция прототипов ВЧ ионных двигателей (ВЧ ИД), использованных в работе, основные методики измерений, а также численная модель для расчета основных параметров плазмы и интегральных прототипов ВЧ ИД.

Установка состоит из вакуумной камеры, исследуемого прототипа ВЧ ИД, ряда датчиков и приборов для исследования его свойств, регулирования и контроля работы установки, ВЧ-генератора и источников постоянного тока. Вакуумная камера объемом порядка $0,8 \text{ м}^3$ откачивается каскадом из двух насосов – форвакуумного и турбомолекулярного до давления $1 \cdot 10^{-5}$ Тор. Работа насосов контролируется через блок управления. Давление измеряется с помощью широкодиапазонной лампы. Во время горения разряда давление составляло не более $3 \cdot 10^{-4}$ Тор в зависимости от условий эксперимента.

Для поджига и поддержания ВЧ разряда в ГРК ВЧ ИД в работе использовались генераторы HF Power серии GKA, подключаемые к антенне прототипов через систему согласования L-типа. Мощность генератора могла плавно изменяться от 0 до 500 W. В работе использовались ВЧ генераторы с рабочими частотами $f = 4, 6.78, 13.56$ и 27.12 МГц. Для вычисления вложенной в разряд мощности [4] использовались измерения ВЧ тока антенны с помощью пояса Роговского.

Для измерения расхода газов в пределах от 3 до 40 сссм (стандартных сантиметров кубических в минуту = $2.65 \cdot 10^{19}$ частиц/мин) использовался шариковый расходомер Koflock 1600R. Исследуемый диапазон расходов газа выбирался, исходя из проведённых оценок условий работы двигателя в КА на УНОО.

Прототип ВЧ ИД состоит из кварцевой ГРК, «пережатой» ионно-оптической системы (ИОС) и магнитной системы (МС). Диаметр ГРК равен 10 см, длина составляла 5, 7 или 9 см. Одна торцевая поверхность ГРК закрыта ИОС с «пережатой оптикой», состоящей из 3 электродов (эмиссионный внутренний, ускоряющий, с уменьшенным размером отверстий для снижения прозрачности для нейтралов, и замедляющий – заземлённый внешний), на второй торцевой

поверхности расположен газоввод, по которому рабочий газ поступает в ИД. Магнитная система представляет собой расположенный на уровне ИОС электромагнит шириной 4 см. На внешней боковой поверхности ГРК смонтирована соленоидальная антенна, имеющая 3,5 витка. Охлаждаемая проточной водой антенна изготовлена из медной трубки диаметром 3 мм. Антенна используется для поджига и поддержания индуктивного ВЧ разряда в диэлектрической кварцевой газоразрядной камере.

Температура и концентрация электронов в разряде исследовалась с помощью зонда Ленгмюра длиной 2,4 мм и диаметром 0,23 мм в прототипе ВЧ ИД с ГРК длиной 9 см, зонд находился на расстоянии 3 см от эмиссионного электрода ИОС. Во время зондовых измерений сетки ИОС были заземлены. Для обработки зондовых вольт-амперных характеристик использовалась стандартная процедура [5, 6].

Для качественного анализа компонентного состава плазмы использовался спектральный метод [7]. Посредством зеркала и собирающей линзы изображение центральной части разряда попадало на входную щель монохроматора AvaSpec-2048, оцифрованный сигнал передавался на компьютер. Распределение интенсивности свечения плазмы в диапазоне $350 \div 900$ нм регистрировалось при различных режимах работы ВЧ ИД без подачи потенциалов на электроды ИОС.

Функция распределения ионов по энергиям исследовалась с помощью 4-сеточного энергоанализатора.

Измерения были выполнены на рабочих частотах $f = 4, 6.78, 13.56, 27$ МГц в интервале индукции внешнего магнитного поля $B = 0 - 100$ Гс.

В четвертой главе описаны результаты экспериментального исследования работы прототипа ВЧ ИД исключительно на атмосферных газах: азоте и кислороде. Глава разбита на 3 раздела: в первом описаны изученные физические особенности индуктивного ВЧ разряда в атмосферных газах в ГРК ВЧ ИД, второй посвящён интегральным характеристикам двигателя, в третьем подводятся итоги главы.

Раздел 1. Физические особенности ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления при работе исключительно на атмосферных газах.

Измерения показали, что влияние внешнего магнитного поля на разряд зависит от длины ГРК L , рабочей частоты генератора f и вида рабочего газа [A1]. При исследовании прототипов ВЧ ИД с ГРК длиной 9 и 7 см в рассмотренном диапазоне магнитных полей 0 – 100 Гс были обнаружены два локальных максимума ионного тока (при значениях индукции магнитного поля B_I^* и B_{II}^*). Уменьшение длины ГРК и рабочей частоты приводит к снижению влияния магнитного поля. При этом на низких частотах ток без магнитного поля оказывается больше.

В таблице 1 показаны значения магнитного поля, при которых ионный ток достигает максимума при различных длинах ГРК и рабочих частотах.

Таблица 1. Положение резонансных максимумов ионного тока по магнитному полю B_I^ и B_{II}^* в азоте/кислороде от рабочей частоты f и длины ГРК L .*

L см	ν МГц	B_I^* и B_{II}^* Гс	ν МГц	B_I^* и B_{II}^* Гс
5	4	нет эффекта	13.56	нет эффекта
7	4	нет эффекта	13.56	18 / 70
9	4	18 / 55	13.56	18 / 80
5	6.78	нет эффекта	27.12	--
7	6.78	слабый	27.12	-- / ~100
9	6.78	18 / 65	27.12	--

На рабочей частоте 27,12 МГц при всех рассмотренных магнитных полях значения тока существенно ниже, чем на других частотах, по-видимому, вследствие доминирования емкостной составляющей ВЧ разряда.

Эксперименты показали, что положение локальных максимумов ионного тока i_{beam} совпадает с положением локальных максимумов $P_{pl}(B)$ – зависимости доли мощности ВЧ генератора, поступающей в разряд, от величины магнитного поля. Таким образом, причиной роста ионного тока в областях локальных максимумов является увеличение способности плазмы поглощать ВЧ мощность и увеличение значений мощности, поступающей в разряд [A2]. В дальнейшем все измерения проводились при магнитных полях B_I^* , B_{II}^* или без магнитного поля.

Влияние магнитного поля на свойства разряда в прототипах ВЧ ИД не исчерпывается только улучшением вложения ВЧ мощности в плазму при некоторых значениях B . Внешнее магнитное поле позволяет также добиться горения разряда при меньших расходах газа, чем в отсутствие МП. Это было показано в измерениях зависимости мощности ВЧ генератора P_{gen} необходимой для извлечения ионного тока i_{beam} заданной величины от расхода рабочего газа fl . Полученные кривые имеют стандартный вид: в области больших расходов газов требуемая мощность слабо зависит от расхода. По мере уменьшения fl при достижении некоторого критического расхода fl_{crit} энергозатраты на извлечение данного значения тока начинают резко расти. Дальнейшее понижение расхода газа приводит к срыву разряда. Наложение на разряд магнитного поля с индукцией $B \sim B_{II}^*$ позволяет получить разряд при меньших расходах, чем при $B = B_I^*$ (или при $B = 0$). Это связано с замедлением ухода электронов на стенки ГРК, увеличением их времени жизни в разряде и интенсификации ионизации. При больших расходах, напротив, магнитное поле ухудшает характеристики двигателя вследствие обнаруженного в работе уменьшения концентрации плазмы в центральных частях разряда. Эффект наиболее выражен в азотной плазме.

Эксперименты показали, что при уменьшении расхода газов происходит не только повышение требуемых энергозатрат, но и изменение компонентного состава плазмы, напрямую влияющего на величину тяги двигателя. Качественно изменение компонентного состава плазмы в настоящей работе было проанализировано на основе измерений интенсивности свечения компонент плазмы при уменьшении расхода азота и кислорода при разных магнитных полях. Результаты спектральных измерений показывают, что чем меньше расход молекулярного азота, поступающего в ГРК ВЧ ИД, тем больше степень диссоциации газа в камере, и больше количество атомарных компонент плазмы в разряде по сравнению с молекулярными.

Интенсивность свечения нейтральных компонент плазмы азота, закономерно, убывает с уменьшением расхода газа. Интенсивность полос молекулярного иона азота I_{mi} более сложно зависит от расхода: с уменьшением

расхода сначала возрастает, а затем падает. Интенсивность свечения атомарного иона азота в области малых расходов увеличивается существенно быстрее, чем интенсивность свечения молекулярного иона, что свидетельствует об увеличении концентрации атомарных ионов в разряде в сравнении с концентрацией молекулярных.

Наблюдавшийся рост необходимого энерговклада в разряд для извлечения заданного тока при уменьшении расхода газа в измерениях $P(fl)|_{i_{beam}=const}$ и поведение интенсивности свечения компонент плазмы при уменьшении расхода газа могут быть связаны с существенными изменениями концентрации и температуры электронов, поэтому на следующем этапе были выполнены зондовые измерения параметров плазмы в центральной части ГРК.

Они показали, что уменьшение расхода газа в диапазоне расходов $fl \leq fl_{crit}$ приводит к резкому росту температуры электронов T_e [A4], обеспечивающему увеличение скорости ионизации в условиях понижения концентрации нейтралов. Увеличение T_e и связанного с температурой электронов плавающего потенциала сопровождается повышением потерь энергии на стенках ГРК вследствие выноса энергии электронами и ионами. Это, в свою очередь, приводит к росту мощности, требуемой для поддержания разряда, что и наблюдалось экспериментально.

Еще одним следствием роста температуры электронов является рост степени диссоциации и диссоциативной ионизации молекул в разряде в результате увеличения скорости указанных процессов. Это приводит к изменению соотношения между числом атомарных и молекулярных ионов в разряде, что также наблюдалось экспериментально.

Известно, что между плазмой и эмиссионным электродом ИОС формируется слой пространственного заряда, в котором падает напряжение, равное плавающему потенциалу, который, в свою очередь, пропорционален температуре электронов. Таким образом, можно ожидать, что при малых расходах газа энергия ионов на выходе из ионного двигателя будет существенно превышать энергию, соответствующую потенциалу, поданному на эмиссионный электрод. Функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ), измерялись на оси источника

на расстоянии ≈ 50 см от ИОС. Результаты показывают, что в атмосферных газах ФРИЭ демонстрируют существенно большую среднюю энергию и оказываются значительно шире, чем в инертных газах (аргоне, криптоне, ксеноне).

При уменьшении расхода азота ФРИЭ заметно уширяется, а средняя энергия растёт с уменьшением расхода газа. Кроме того, уменьшение рабочей частоты генератора от 13,56 до 6,78 МГц приводит к дополнительному уширению ФРИЭ. Объяснение этому эффекту нашлось после проведения оценок ленгмюровской ионной частоты ω_{Li} . Простые вычисления показали, что при частотах менее 13.56 МГц при концентрациях плазмы, типичных для разряда в атмосферных газах, Ленгмюровская ионная частота становится больше круговой частоты генератора, $\omega_{Li} \geq \omega_{gen}$, вследствие чего ионы пролетают приэлектродный слой быстрее периода колебаний ВЧ поля в слое, поэтому фаза колебаний поля влияет на приобретаемую ионами энергию в слое, что приводит к уширению ФРИЭ.

Раздел 2. Характеристики прототипов воздушных ВЧ ИД, основанных на рассмотренных индуктивных источниках плазмы.

Используя кривые $P_{gen}(fl)$ и $P_{pl}(fl)$, измеренные при $i_{beam} = const$, можно определить КИРТ $\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl}$ и «цену иона» $C_i = \frac{P_{gen}}{i_{beam}}$ по мощности ВЧ генератора, и $C_{i0} = \frac{P_{pl}}{i_{beam}}$ – по вложенной в плазму мощности. Отметим, что величины C_{i0} соответствуют минимальной возможной «цене иона» для данного прототипа, которой можно достичь при идеальной системе согласования без потерь энергии в её элементах.

Сравнение величин C_i и C_{i0} , рассчитанных по экспериментальным данным, в зависимости от КИРТ γ с результатами немецкой научной группы, изучавшей работу ВЧ ионного двигателя RIT-10 [8], так же перестроенными в координатах $C_i(\gamma)$, показало, что их результаты лежат в пределах диапазона полученных нами C_{i0} и C_i .

Величины энергозатрат на поддержание разряда сильно отличаются при изменении длины ГРК L и рабочей частоты генератора f . Полученные значения приведены в таблице 2. В четвёртом столбце таблицы показаны максимальные

достигнутые КИРТ γ_{max} при различных значениях ионного тока, в последующих столбцах приведены минимально возможная «цена иона» C_{i0} , оцененная по вложенной в плазму мощности, и рассчитанная по мощности генератора «цена иона» C_i , вычисленные при указанных в таблице КИРТ [А4].

Таблица 2. Величины «цены иона» для различных прототипов ВЧ ИД при работе на азоте.

L см	f МГц	i_{beam} мА	γ_{max}	C_{i0} Вт/А	C_i кВт/А
5	6.78	150	0.24	600	1100
		200	0.37	650	1150
		250	0.5	700	1250
7	6.78	150	0.37	900	1700
		200	0.5	900	1700
	13.56	100	0.28	1500	2400
		150	0.42	1250	2000
		200	0.40	1200	1700
	27.12	70	0.1	—	3600
9	4	170	0.64	1300	2350
	6.78	150	0.48	1400	2100
	13.56	100	0.47*	1200	2800
		160	0.75	1450	2850
		200	0.47	1250	2150

Затраты мощности на поддержание разряда являются только частью полной мощности (см. формулу (4)), необходимой для получения тяги и удельного импульса. Удельный импульс определяется КИРТ и напряжением на ИОС. Предположим, что в ИД поступают газы остаточной атмосферы с расходом fl . Изменение мощности ВЧ генератора приведёт к изменению тока извлекаемых ионов и коэффициента использования рабочего тела $\gamma = i_{beam}/(e \cdot fl)$. Тогда для поддержания требуемого удельного импульса для каждого значения γ мы можем рассчитать по формуле (5) необходимые значения потенциала эмиссионного электрода (ускоряющего напряжения) U_{sp} :

$$U_{sp} = \frac{M_A}{2e} \left(\frac{M_M}{M_A} I_{sp}^* \right)^2 \frac{1}{\gamma^2} = \frac{2M_A}{e} \left(\frac{I_{sp}}{\gamma} \right)^2, \quad (6)$$

Формула (6) записана в предположении, что в потоке ускоренных ионов доминируют атомарные ионы.

Зная U_{sp} и используя семейство кривых $i_{beam}(P_{gen})$, измеренных в широком диапазоне условий, были рассчитаны по формуле (4) зависимости полной мощности P_{tot} от коэффициента использования рабочего тела γ для рассмотренных выше режимов работы ВЧ ИД.

Оказалось, что зависимости $P_{tot}(\gamma)$ имеют минимум при γ^* , лежащих в диапазоне $0.3 \div 0.4$. При малых значениях коэффициента использования рабочего тела $\gamma < \gamma^*$ полные энергозатраты растут за счет ускорения ионов до высоких энергий, в области значений $\gamma > \gamma^*$ энергозатраты увеличиваются в связи с ростом мощности, требуемой для поддержания разряда с высокой степенью ионизации. С ростом расхода газа полные энергозатраты возрастают, т.к. для достижения тех же γ требуются более высокие значения ионного тока.

Несмотря на рост «цены иона» с длиной ГРК (см. таблицу 2), оказалось, что минимальные значения полных энергозатрат на компенсацию аэродинамического сопротивления в *достаточно широком* для работы в переменных орбитальных условиях *диапазоне расходов* атмосферных газов достигаются с прототипом, оснащённым ГРК длиной 9 см, способным функционировать при минимальных расходах рабочего тела. При этом необходимо подчеркнуть, что даже при увеличении расхода азота в 2 раза (от 3 до 6 сссм) данный прототип позволяет обеспечить компенсацию сопротивления остаточной атмосферы при энергозатратах не более 600 Вт.

В *Разделе 3* подведены основные итоги.

В пятой главе, с целью минимизировать недостатки, отмеченные в конце четвёртой главы, рассмотрена возможность использования смеси забортных и инертных газов в качестве рабочего тела ВЧ ИД, предназначенного для работы на УНОО. Аналогично 4 главе, первая часть главы посвящена изучению влияния добавки инертного газа на физические особенности разряда в источниках, а вторая часть – оценке влияния добавки на концепцию ВЭРД. Измерения проводились для азота, кислорода, с добавкой аргона или криптона.

Раздел 1. Физические особенности ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления при работе на смесях атмосферных газов с инертными.

При изучении зависимостей $i_{beam}(B)$ в смесях атмосферных газов с инертными было обнаружено 2 факта. Во-первых, как и ожидалось, общая картина влияния магнитного поля сохраняется, наблюдается 2 характерных максимума ионного тока в зависимости от магнитного поля. При этом положение первого максимума одинаково как в атмосферном газе, так и в смеси азота с аргоном, что позволяет продолжать эффективно использовать магнитное поле для улучшения характеристик прототипа. Обращает на себя внимание, что при увеличении расхода аргона в смеси появляется третий максимум при магнитном поле порядка 40 Гс, связанный с изменением вложения ВЧ мощности в разряд в смеси.

Сравнение зависимостей мощности, необходимой для извлечения из ВЧ ИД ионного тока фиксированного значения, в зависимости от расхода атмосферных газов $P_{gen}(fl_{N_2})$, полученные в разряде в чистом азоте, а также его смеси с аргоном или ксеноном, показали, что добавка инертных газов к азоту существенно расширяет область существования разряда в сторону меньших fl_{N_2} . Кроме того, происходит значительное понижение энергозатрат на поддержание разряда в области рабочих для ВЭРД расходов $fl_{N_2} \leq 9$ сссм, причем характеристики разряда в смеси азота с аргоном незначительно уступают характеристикам разряда в смеси азота с ксеноном.

Добавка аргона в разряд атмосферных газов существенно расширит диапазон потоков заборных атмосферных газов, в котором сможет работать ВЭРД, и *гарантирует надёжность* работы двигателя на орбите. При этом масса аргона существенно меньше массы такого же количества ксенона, поэтому использование аргона приведет уменьшению веса и стоимости рабочего тела, которое будет необходимо брать на борт космического аппарата для обеспечения стабильного полёта и возможности эффективного изменения орбиты КА.

В четвёртой главе отмечалось значительное уширение ФРИЭ и рост средней энергии ионов на выходе из разряда при работе прототипа на атмосферных газах, что может приводить к ускоренному разрушению электродов ИОС. Исследования ФРИЭ в аргоне и смеси азота с аргоном показали, что средняя энергия ионов азота

почти в 2 раза больше средней энергии ионов аргона при тех же внешних условиях разряда (мощности генератора и магнитном поле). Закономерно, что на смеси азота с аргоном получился некий промежуточный результат. Применение к разряду внешнего магнитного поля величиной 63 Гс, относящегося к области B_{II}^* , приводит к сужению ФРИЭ примерно на 15-20%, а значение средней энергии ионов в вылетающем пучке для обоих газов снижается более чем на 30-40%.

Таким образом однозначно можно судить, что добавка в разряд инертного газа существенно снизит нагрузку и на эмиссионный электрод ИОС, снизит темпы его распыления и увеличит рабочий ресурс двигателя.

Раздел 2. Влияние добавки инертного газа на концепцию ВЭРД.

Выведенные в ходе работы аналитические формулы расчёта тяги ВЧ ИД при работе на смеси газов показывают, что добавка инертного газа к атмосферным существенно упрощает условие стабильного полёта на УНОО. Его удобно выразить через «гибридный удельный импульс ВЭРД» $I'_{sp} = \frac{T}{\eta_c \mu_{in}}$, который определяется отношением тяги, полученной в смеси, к расходу забортного газа, поступающего в ВЧ ИД. Величина гибридного удельного импульса, требуемого для компенсации аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы, определяется следующим выражением:

$$I'_{sp} = \frac{T}{\eta_c \mu_{in}} = \gamma' \frac{\sqrt{2M_z^+ U e}}{M_z} \alpha_z^{ig} \geq \frac{v_{sc}}{\eta_c} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}} = I_{sp}^*, \quad (7)$$

$$\alpha_z^{ig} = \frac{1 + k_1 \chi \left(\frac{M_{ig}}{M_z^+} \right)^{0.5}}{1 + k_1 \chi} > 1, \quad (8)$$

где M_{ig}, M_z – масса инертного и забортного газов, M_z^+ – масса ионов забортного газа, $\gamma' = \frac{i_{beam}}{e \cdot f l_z}$ – «гибридный» коэффициент использования рабочего тела (ГКИРТ), то есть отношение полного потока ионов к потоку забортных рабочих газов в ВЧ ИД, отношение полного потока ионов к входящему в ВЧ ИД потоку забортных газов. α_z^{ig} – коэффициент, интегрально отражающий влияние добавки инертного газа на удельный импульс, $\chi = f l_{ig} / f l_z$ – отношение числовых расходов

инертного и заборного газов (относительная добавка инертного газа), $k_1 = \frac{\gamma_{ig}}{\gamma_z}$ – коэффициент, отражающий зависимость вклада компонент плазмы в ток ионов от параметров разряда, оценить k_1 можно из зависимостей тока разных газов от магнитного поля при равном расходе газа и мощности генератора, как отношение токов при соответствующем магнитном поле.

Из формул (7, 8, 6, 4) можно найти новые значения требуемого ускоряющего напряжения на ИОС U'_{sp} и полных энергозатрат на работу двигателя P_{tot} . Эксперименты показали, что при добавке аргона $1,6 \text{ sccm} = 1,5 \text{ кг аргона в год}$ снижение полных энергозатрат на компенсацию сопротивления составляет 150 Вт. При этом значения ГКИРТ γ' , при которых достигается минимальное энергопотребление остаются в диапазоне $0.3 \div 0.4$, как и в случае работы на чистом заборном газе.

В *Разделе 3* подведены основные итоги.

В шестой главе описана физическая и глобальная численная модель ВЧ разряда в ионном двигателе, по которой проводились расчёты параметров плазмы и интегральных характеристик ВЧ ИД. Приводится выбранный список элементарных процессов, учитываемых в расчётах, используемые сечения и скорости элементарных процессов. Приводятся результаты расчётов основных локальных характеристик разряда и интегральных характеристик двигателя, работающего на азоте, смеси азота с атомарным кислородом и смеси «азот, атомарный кислород, аргон». Численные результаты качественно совпадают с измеренными зависимостями и объясняют закономерности, обнаруженные в эксперименте.

Зависимости температуры электронов в разряде и поглощаемой плазмой ВЧ мощности от расхода азота, рассчитанные в рамках глобальной модели, имеют характерный участок резкого роста, экспериментально обнаруженный в ходе зондовых измерений температуры электронов и измерений $P(fl)|_{i_{beam}=const}$.

Концентрация атомарных ионов немонотонно зависит от расхода. Такая же закономерность наблюдалась при экспериментальном изучении корреляции

интенсивности свечения линий иона азота и расхода газа. Расчеты показали, что концентрация молекулярных ионов монотонно убывает с уменьшением fl .

Численное моделирование разряда в смеси с инертными газами показало, что добавка инертного газа сопровождается понижением температуры электронов и повышением концентрации плазмы.

Модель позволяет оценить интегральные характеристики двигателя (тягу, удельный импульс, энергозатраты на поддержание разряда и ускорение ионов) и выяснить вклад в них каждой компоненты плазмы по отдельности, что очень сложно определить в эксперименте, но очень важно для понимания процессов, происходящих в газоразрядной камере, определения технических характеристик двигателя и создания стратегии управления работой двигателя на орбите. Кроме того, моделирование позволяет оценить характеристики разряда с атомарным кислородом, который невозможно контролируемо получать в лабораторных условиях, но который доминирует на рассматриваемой сверхнизкой орбите 200 км.

Результаты данной работы демонстрируют предсказательную силу используемой глобальной модели индуктивного ВЧ разряда в цилиндрической геометрии и актуальность её использования для быстрого анализа характеристик воздушного электрореактивного двигателя на основе индуктивного ВЧ ионного двигателя с внешним магнитным полем.

В Заключении диссертации сформулированы основные выводы:

1. Ключевым фактором, определяющим возможность использования конкретного электрореактивного двигателя для полетов космического аппарата на ультранизких околоземных орбитах при использовании только заборных газов, является не величина электрореактивной тяги, а достижение двигателем порогового значения удельного импульса, которое определяется только формой космического аппарата и эффективностью воздухозаборника, и не зависит от поступающего в двигатель расхода газа. Для достижения необходимого удельного импульса коэффициент

использования рабочего тела должен быть не меньше 0.3 – 0.4 при энергии ионов 1000 – 2000 эВ.

2. Полные энергозатраты на работу двигателя немонокотонно зависят от коэффициента использования рабочего тела. Минимум энергозатрат в рассмотренных случаях наблюдается при энергии ионов порядка 1000 – 2000 эВ и коэффициенте использования рабочего тела не хуже 0.3. Было показано, что энергозатраты возрастают с увеличением расхода заборных газов, поступающих в прототип двигателя, и уменьшаются с увеличением длины газоразрядной камеры за счёт возможности работы на меньших расходах рабочих газов.
3. Достигнут удельный импульс не менее 30000 м/с, достаточный для компенсации сопротивления остаточной атмосферы на высоте порядка 200 км при затратах мощности на генерацию разряда и ускорение ионов менее 600 Вт, расходе газов 3 ÷ 6 ссм. Прототип ВЧ ионного двигателя имел газоразрядную камеру длиной 9 см, применялось внешнее магнитное поле с индукцией 50 ÷ 80 Гс, диапазон расхода заборных газов удовлетворяет условиям полёта на ультранизкой околоземной орбите.
4. На рабочих режимах прототипа ВЧ ионного двигателя, работающих на заборных газах, концентрация плазмы ниже, а температуры электронов выше, чем в ВЧ ИД, работающих на ксеноне. Обнаружено, что вблизи эмиссионного электрода ИОС формируется слой пространственного заряда, в котором происходит значительное ускорение ионов. Средняя энергия ионов тем выше, чем ниже расход атмосферных газов. Функция распределения ионов по энергиям уширяется при рабочих частотах 6.78 МГц и ниже, когда рабочая частота становится меньше ионной ленгмюровской частоты.
5. Уменьшение расхода рабочих газов сопровождается значительным увеличением температуры и понижением концентрации электронов; в спектре свечения плазмы интенсивности свечения молекул и атомов азота монотонно уменьшаются, а интенсивности свечения молекулярного и

атомарного иона немонотонно зависят от расхода, проходя через локальный максимум.

6. Добавка примеси инертного газа в разряд атмосферных, поступающих в прототип двигателя позволяет понизить требования к коэффициенту использования рабочего тела, а также сгладить зависимость характеристик прототипа двигателя от суточных и сезонных колебаний концентраций нейтральных частиц на ультранизких околоземных орбитах, расширяя рабочий диапазон двигателя по расходу заборных газов.
7. Добавка инертного газа позволяет значительно увеличить концентрацию электронов в разряде и уменьшить разность потенциалов между плазмой и эмиссионным электродом, сокращая разрушительное воздействие ускоренных в приэлектродном слое ионов на эмиссионный электрод ионно-оптической системы, тем самым увеличивая рабочий ресурс двигателя.

Глава 1. Обзор литературы

Глава состоит из 3 частей. В первой представлен обзор существующих концепций воздушного электрореактивного двигателя (ВЭРД), призванного решить задачу освоения ультранизких околоземных орбит (УНОО) без запасов рабочего тела на борту долгоживущего космического аппарата (КА). Основным отличием ВЭРД от классических электроракетных двигателей (ЭРД) является использование в качестве рабочего тела забортных газов остаточной атмосферы. Во второй части проведён анализ существующих схем ЭРД и возможность их использования в составе ВЭРД. Третья часть посвящена обзору существующих работ по свойствам индуктивного ВЧ разряда низкого давления при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля.

1.1 Современное состояние исследований по теме создания воздушного электрореактивного двигателя

В настоящее время, на фоне активного заселения малыми космическими аппаратами традиционных низких околоземных орбит (500-1100 км), особенно остро встаёт вопрос освоения ультранизких околоземных орбит высотой 150 – 250 км. Длительные полеты космических аппаратов на ультранизких околоземных орбитах открывают широкие перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций, а также широкого круга научных исследований. Преимуществами полетов КА на УНОО являются уменьшение стоимости и размеров КА, улучшение точности геолокации и разрешения изображений поверхности Земли, увеличение отношения сигнал/шум в задачах радиолокации, а также уменьшение радиационного воздействия на КА. Ещё одним важным преимуществом ультранизких орбит является исключение риска столкновения с космическим мусором и необратимого засорения низких околоземных орбит обломками, называемого эффектом Кесслера [9, 10]. При достижении целевого срока службы КА будет происходить его гарантированное самоудаление с орбиты вследствие аэродинамического торможения.

Основной проблемой длительного поддержания КА на ультранизких орбитах является аэродинамическое торможение КА, вызванное остаточной атмосферой сравнительно высокой плотности. Принципиально обеспечить длительное существование КА на УНОО возможно только при его оснащении электрореактивным двигателем с тягой, достаточной для компенсации аэродинамического сопротивления. Однако опыт проведённых ранее низкоорбитальных миссий [11] и аналитические расчёты на основе моделей атмосферы [3] показывают, что запасы стандартного топлива (ксенона или криптона), необходимые для длительной работы ЭРД на орбитах ниже 250 км, неоправданно велики. Например, аппарат Европейского космического агентства GOCE, запущенный в 2009 году, за 4 года полёта на высоте 220 – 260 км потратил 40 кг ксенона [11]. В связи с этим для осуществления долговременных полётов на УНОО в мире была сформирована концепция воздушного электрореактивного двигателя.

ВЭРД состоит из двух принципиальных конструктивных элементов – воздухозаборника, собирающего частицы из набегающего потока, и электрореактивного двигателя, в котором происходит процесс ионизации собранных нейтральных частиц и ускорения ионов, создающего тягу для компенсации аэродинамического сопротивления. В данной работе изучаются физические аспекты, связанные с работой ЭРД в составе ВЭРД, а данные о принципах работы и возможных характеристиках воздухозаборника взяты исключительно из литературы.

Отсутствие запасов дорогого рабочего тела (ксенона) на борту космического аппарата, оснащённого ВЭРД, снижает как стоимость самого аппарата, так и стоимость его вывода на орбиту за счёт уменьшения массы КА. Возможность осуществления полёта без запаса рабочего тела на борту КА открывает возможности для длительных полётов на УНОО, переводя ограничение срока активного существования аппарата на другие конструкционные узлы, например, огневой ресурс ЭРД в составе ВЭРД или темп деградации солнечных панелей, обеспечивающих питание КА.

Рисунок 1 поясняет концепцию полета КА, использующего заборные газы в качестве топлива, на УНОО. Он представлен в системе отсчёта КА.

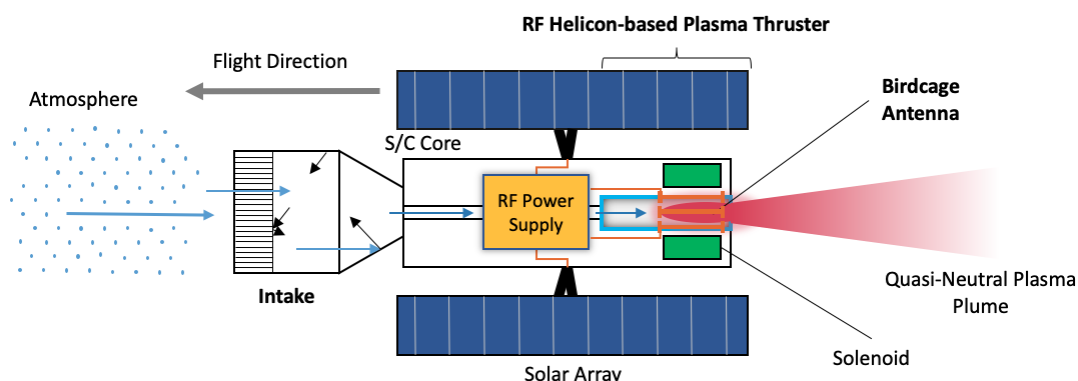


Рисунок 1. Общая концепция воздушного электрореактивного двигателя. Рисунок заимствован из работы [1].

Набегающий поток атмосферных газов движется навстречу космическому аппарату со скоростью v_{SC} , примерно равной первой космической скорости в диапазоне ультранизких околоземных орбит, и создаёт аэродинамическое сопротивление. Величина сопротивления определяется скоростью набегающего потока v_{SC} , плотностью остаточной атмосферы ρ , формой космического аппарата, определяющей коэффициент аэродинамического сопротивления C_{xa} , и площадью поперечного сечения корабля A_{ref} . Пассивный воздухозаборник площадью A_{in} , работа которого основана на принципе «молекулярной ловушки», захватывает лишь часть частиц, налетающих на него. Некоторые частицы отражаются от его стенок и выходят в обратном направлении, но уже с тепловыми скоростями. Доля частиц, прошедшая воздухозаборник и попавшая в ЭРД в составе ВЭРД определяет эффективность воздухозаборника η_c . В ЭРД реализуется ионизация атомов и молекул атмосферных газов, а также ускорение тяжелых заряженных частиц. Поток ускоренных ионов на выходе из ЭРД создает тягу, которая должна компенсировать аэродинамическое сопротивление.

Разработка системы ВЭРД (воздухозаборник-нейтрализатор-ЭРД), предназначенного для полетов КА на УНОО, инициировалась сравнительно недавно, как в нашей стране, так и в международном научном сообществе. В числе ведущих отечественных организаций, занимающихся данной тематикой, следует

выделить МАИ [12, 13], МГУ [14, А1-А4], ЦАГИ, ВНИИЭМ, МГТУ им. Баумана. Среди зарубежных – Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) [15, 16], Европейское космическое агентство (ESA) [17-21], «Аэрокосмическая корпорация» из США [22, 23], итальянский инженерный концерн SITAEL [18-21], Busek Co. Inc. [24], французская Snecma [25], английская фирма NewOrbit Space [26], немецкий Институт космических систем (IRS) в Штутгарте [1, 27-33], созданный в 2024 году Объединённый исследовательский центр 1667 (CRC) «ATLAS» [34]. Обзоры современных решений к организации оборудования изложены в публикациях [1, 35-37].

Основным элементом КА, определяющим возможность длительного полета КА на УНОО, является ВЭРД. К настоящему времени разработано значительное количество схем ЭРД, многократно апробированных в космосе, однако хорошо изученные и давно отработанные ЭРД, в частности холловские двигатели и ионные двигатели Кауфмана, работающие на разряде постоянного тока, требуют существенной доработки для работы на атмосферных газах вследствие снижения эмиссионных свойств и ресурса накаливаемых и дуговых катодов в среде химически активных газов остаточной атмосферы.

Рассмотрим результаты апробации известных схем ЭРД при работе на атмосферных газах, выполненных до начала работы над диссертацией.

1.2 Анализ существующих ЭРД и возможность их использования в составе ВЭРД

В 2003 году специалистами Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) была анонсирована концепция СВЧ ионного двигателя [15, 16], основанного на принципе электронного циклотронного резонанса. Конструкция предполагала интеграцию двигателя с кольцевым воздухозаборником, который, по расчетам, позволял обеспечить давление в камере не менее 0.5 Па на высоте 200 км. Авторы концепции указали на потенциал значительного улучшения характеристик системы за счет применения материалов, устойчивых к окислению в среде атомарного кислорода.

В США 2010 году в работах [22, 23] была предложена двигательная установка, включающая модернизированный холловский двигатель двухсекционной конструкции (Air-Breathing Cylindrical Hall-Effect Thruster, АВСНТ). В данной схеме рабочий газ предварительно ионизируется в СВЧ-источнике плазмы, после чего поступает в ускорительный канал холловского двигателя. Наземные испытания прототипа проводились на ксеноне. В качестве катода-нейтрализатора Холловского двигателя рассматривался катод на основе СВЧ разряда, позволяющий получить 10.3 А электронного тока с энергетической эффективностью 90 мА/Вт при работе на ксеноне и 5.7 А с энергетической эффективностью 50 мА/Вт при работе на аргоне, подавая 50 В на извлекающий электрод. Используя воздухозаборник с собирающей поверхностью 0.25 м² авторы [22, 23] предполагали получить массовый расход $\dot{m} = 108$ мг/с, тягу $T = 5$ мН с «ценой» тяги $P/T = 190$ Вт/мН, удельным импульсом $I_{sp} = 4720$ с.

Тогда же, в 2010 году, компания Snecma [25] провела испытания двигателей PPS1350-TSD (холловский) и RIT-10 (ионный) на атмосферных газах – азоте и кислороде. Результаты продемонстрировали, что, несмотря на снижение эксплуатационных характеристик по сравнению с ксеноном, оба типа двигателей сохранили способность к стабильной работе. По расчётам авторов на основе извлекаемого из прототипа двигателя ионного тока, ионный двигатель RIT-10 позволял достичь тяги 7.5 мН при работе на чистом кислороде [8]. Рабочие характеристики двигателя при работе на атмосферных газах и их смесях с ксеноном показаны на рисунке 2.

В 2006 году Европейское космическое агентство [17-21] инициировало программу исследований о возможности полетов на сверхнизких орбитах без запасов топлива на борту. В рамках программы изучалась система с воздухозаборником и двигателями RIT-10 и PPS 1350, работающими на смеси азота и кислорода. Эксперименты на мощности 450 Вт выявили существенную деградацию параметров при переходе с ксенона на воздушную смесь. Ресурсные испытания в течение 10 часов зафиксировали значительную эрозию эмиссионного электрода ионно-оптической системы. В дальнейшем компания SITAEL

предложила концепцию с глубокой интеграцией воздухозаборника и двигателя в единый блок [18-21].

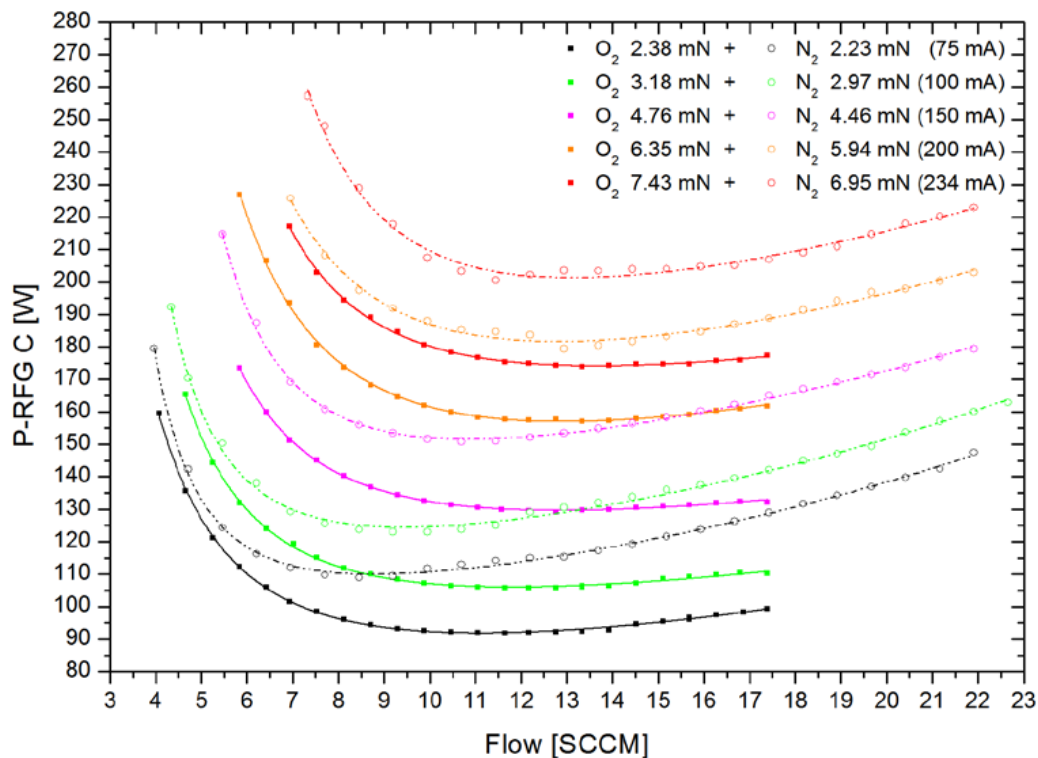


Рисунок 2. Зависимости ВЧ мощности, требуемой для извлечения фиксированного ионного потока и тяги из двигателя RIT-10, в зависимости от расхода атмосферных газов (N_2 , O_2). Тяга рассчитана на основании величины ионного тока. В расчётах было принято, что поток ионов состоит только из молекулярных ионов N_2^+ , O_2^+ , ускоряющее напряжение считалось равным 1500 В.

Исследователи из Мичиганского университета изучили возможность применения геликонного ВЧ разряда в качестве ЭРД [38-40]. При работе на ксеноне была зарегистрирована значительная тяга, однако ее значение упало практически до нуля при замене рабочего тела на воздух. Впоследствии была предложена схема двухступенчатого холловского двигателя, где геликонный разряд использовался для предварительной ионизации газа.

Компания Busek сосредоточила усилия на оптимизации холловского двигателя для работы в атмосфере Марса, основным компонентом которой является диоксид углерода [24].

В работах [1, 27-30] проводились комплексные исследования маломощного геликонного двигателя в составе системы "воздухозаборник-ЭРД". Основным преимуществом безэлектродного разряда авторы считают отсутствие элементов,

контактирующих с плазмой, что потенциально увеличивает ресурс двигателя и позволяет формировать скомпенсированный поток ускоренных ионов на выходе. При этом геликонный двигатель не был оснащён системой электростатического ускорения ионов (ионно-оптической системой), а на выходе получался скомпенсированный поток плазмы. Энергия ионов на выходе данного прототипа была меньше, по сравнению с прототипами, оснащёнными ионно-оптической системой, зато конструкция не требует катода-компенсатора. Помимо исследований непосредственно прототипа ЭРД для интеграции с воздухозаборником группа исследователей из IRS работает над оптимизацией конструкции воздухозаборника и улучшением его эффективности захвата частиц набегающего на аппарат потока и повышения давления в газоразрядной камере геликонного ЭРД [31, 32], а также прорабатывает возможные сценарии сверхнизкоорбитальной космической миссии [32].

Исследователи из NewOrbit Space в 2024 г. заявляли [26] о создании прототипа ВЧ катода, работающего на смеси азота с кислородом. Рабочий расход газа в катоде при этом оценивался в 0,7 sccm. Также они создали прототип ВЧ ионного двигателя с интегрированным ВЧ генератором и оптимизированной специально для извлечения ионов кислорода и азота ионно-оптической системой (ИОС), что позволило авторам добиться ионного тока до 350 мА из при работе источника диаметром 10 см на атмосферных газах и значительно снизить энергетическую цену иона.

В нашей стране работы по созданию оборудования для полетов на УНОО и анализу возможностей для сверхнизкоорбитальных миссий проводятся в МАИ [12, 13], МГУ [14, А1-А4], корпорации ВНИИЭМ и ЦАГИ. Так в работе [13] исследована работа высокочастотного ионного двигателя на смеси атмосферных газов. Проведено математическое моделирование рабочих процессов, проанализированы ключевые характеристики двигателя. С учетом аэродинамической компоновки КА показана принципиальная возможность создания аппарата с прямоточным ЭРД, а также представлены конструкция воздухозаборника и параметры прототипа ВЧ-ионного двигателя диаметром

150 мм. Использование атмосферных газов позволило достичь тяги до 7,5 мН в данной работе. В предшествующей работе [12] экспериментально исследовались два варианта пассивного воздухозаборника.

Рассматривая конструкцию воздухозаборника, авторы [13] применяют два подхода: предположение о зеркальном (коэффициент аккомодации равен нулю) или диффузном (коэффициент аккомодации равен единице) отражении частиц от его стенок.

Большинство современных двигательных установок, применяемых в космосе, оснащено дуговыми полыми катодами [41]. Основным ограничивающим фактором как накаливаемых, так и дуговых полых катодов является их лимитированный ресурс. Так в исследованиях [42-54] в качестве альтернативы предложены безэлектродные схемы нейтрализации, основанные на различных типах газового разряда и обладающие, предположительно, большим сроком службы. Среди них рассмотрены емкостной [42], индуктивный [43-50] и геликонный [51, 52] ВЧ разряды, а также СВЧ разряд [53, 54]. В большинстве экспериментов в качестве рабочего тела использовался ксенон или аргон, характеризующиеся низким потенциалом ионизации и высоким эффективным сечением ионизации.

Сравнительные испытания прототипов показали, что энергозатраты на генерацию электронного тока в емкостном ВЧ разряде существенно превышают аналогичные показатели для индуктивного ВЧ и микроволнового СВЧ разрядов. Создание микроволнового разряда требует генерации сильного магнитного поля в объеме катода, а геликонный разряд эффективно возбуждается в источниках плазмы большого диаметра. Вследствие этого, в большинстве прикладных работ [43-50] в качестве базового разряда для работы катода-нейтрализатора был выбран индуктивный ВЧ разряд.

Приведенный выше краткий анализ литературы позволяет сделать вывод, что наиболее перспективными схемами ЭРД являются безэлектродные модели, не требующие для своей работы катодов, эмиссионные способности которых ухудшаются при контакте с химически активными газами. В качестве объекта

исследования в настоящей работе был выбран прототип ионного двигателя, работающего на индуктивном ВЧ разряде. Рассмотрим далее физические свойства указанного вида газового разряда.

1.3 Особенности разряда в ВЧ ионных двигателях

1.3.1 Индуктивный разряд без магнитного поля

Хорошо известно, что ВЧ поля в индуктивном ВЧ разряде скинируются. В зависимости от условий горения разряда реализуются два предельных случая, определяемых соотношением частоты столкновений электронов с тяжёлыми частицами ν и круговой частоты ВЧ поля ω .

При условии $\nu \gg \omega$ реализуется столкновительный режим горения разряда, а толщина скин-слоя δ определяется формулой (1.3.1), полученной Дж. Дж. Томпсоном в 1891 году [55]. Это случай «нормального» скин-слоя.

$$\delta_n = \left(\nu \frac{c^2}{\omega_{Le}^2 \omega} \right)^{1/2} \quad (1.3.1)$$

где ω_{Le} – Ленгмюровская электронная (плазменная) частота.

В противоположном пределе, известном как режим «аномального» скин-слоя, когда $\omega \gg \nu$, его толщина определяется формулой [56]:

$$\delta_a = 2 \cdot \sqrt[6]{\frac{2}{\pi} \left(\frac{c^2 \nu_{Te}}{\omega \omega_{Le}^2} \right)^{1/3}} \quad (1.3.2)$$

где ν_{Te} – тепловая скорость электронов.

Физически это означает, что в случае нормального скин-слоя связь тока $\vec{j}$ и электрического поля $\vec{E}$ в плазме локальная, а в случае аномального скин-слоя $\vec{j}$ и $\vec{E}$ определяются интегральными соотношениями по всему объёму газоразрядной камеры (ГРК). Подробные исследования физических особенностей разряда в аномальном скин-слое δ_a выполнены в работах [57-71].

Рассмотрим условия горения разряда, характерные для ионных двигателей. При стандартных потоках рабочего тела $fl = 10 - 20$ сссм (станд. кубических сантиметра в минуту = $2,65 \cdot 10^{19}$ частиц/мин) давление в ГРК двигателя не превышает 1 мТор. Оценки показывают, что при этих условиях $\omega \gg \nu$ скин-слой

в индуктивном ВЧ разряде в ионном двигателе является аномальным. Длина энергетической релаксации электронов $\lambda_\varepsilon \approx \lambda(M/m)^{1/2}$ в разряде оказывается много больше характерных размеров газоразрядной камеры или толщины характерной области локализации ВЧ полей (толщины скин-слоя δ), $\lambda_\varepsilon \gg L, D, \delta$ [4, 57], где λ – длина свободного пробега электрона, M – масса нейтралов/ионов, m – масса электрона. Это означает, что кинетика электронов является нелокальной. Иллюстрацией сказанному может служить рисунок 2, где показано семейство функций распределения электронов, измеренных на различных расстояниях от индуктора в работе [40]. Отметим, что по оси абсцисс на рисунке указана не кинетическая, а полная энергия, являющаяся суммой кинетической и потенциальной энергии. Можно видеть, что на различных расстояниях от антенны ФРЭЭ практически совпадают, при приближении к границе плазмы происходит лишь удержание медленных электронов амбиполярным полем.

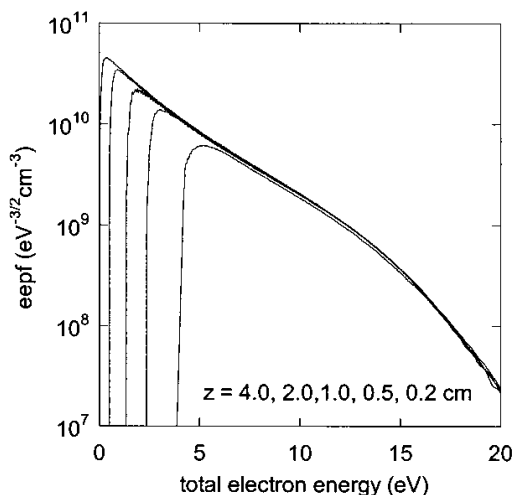


Рисунок 3. Группа ФРЭЭ, измеренных вдоль оси источника плазмы [58].

Рассмотрим более подробно, как формируется ФРЭЭ в индуктивном ВЧ разряде низкого давления. На рис. 3 показаны характерные области индуктивного ВЧ разряда, возбуждаемого планарной антенной, расположенной на верхнем торце газоразрядной камеры.

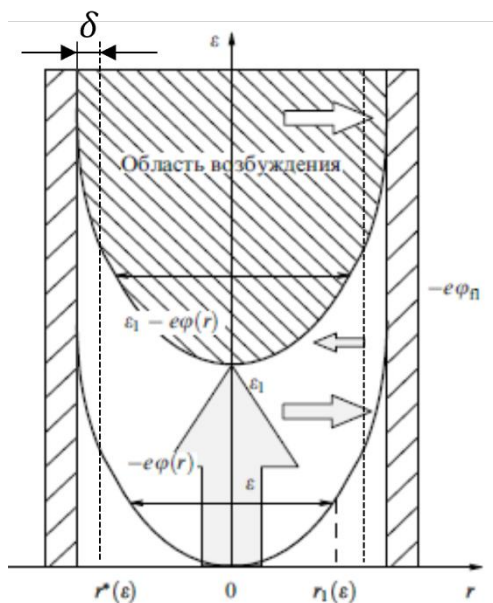


Рисунок 4. Плоскость (ε, r) для запертых электронов. Доступный для электронов объем ограничен условием $\varepsilon \geq -e\varphi(r)$. В заштрихованной области возбуждения $r \leq r^*(\varepsilon)$ энергия электронов $w > \varepsilon_1$ и они способны возбуждать нейтральные частицы. Положение точки поворота $r_1(\varepsilon)$ удовлетворяет условию $\varepsilon = -e\varphi(r_1)$.

ВЧ поле локализовано в скин-слое толщины δ_a , а электроны находятся в потенциальной яме, сформированный амбиполярным потенциалом. При отсутствии столкновений они скапливаются на удалении от антенны центре разряда, т.к. им не хватает кинетической энергии, чтобы достигнуть скин-слоя или стенок ГРК. В отсутствие столкновений их энергия не меняется, и они сравнительно долгое время живут в данной области. Электроны средних энергий, достигающие скин-слоя, разогреваются ВЧ полями. Быстрые электроны, с одной стороны, разогреваются ВЧ полями, с другой стороны, тратят энергию в неупругих столкновениях с тяжелыми частицами и погибают на стенках ГРК. Указанная картина движения электронов в объеме источника плазмы находит свое отражение в форме ФРЭЭ (см. рис. 5, заимствованный из работы [58]). Как видно, для ФРЭЭ характерен избыток медленных электронов, в области средних энергий электронов наблюдается рост температуры электронов, вызванный нагревом полей в скин-слое, а в области больших энергий наблюдается дефицит быстрых электронов, вследствие значительных потерь энергий. Увеличение давления и переход разряда в режим горения нормального скин-слоя сопровождается значительным ростом

концентрации электронов и максвеллизация ФРЭЭ вследствие роста электрон-электронных столкновений.

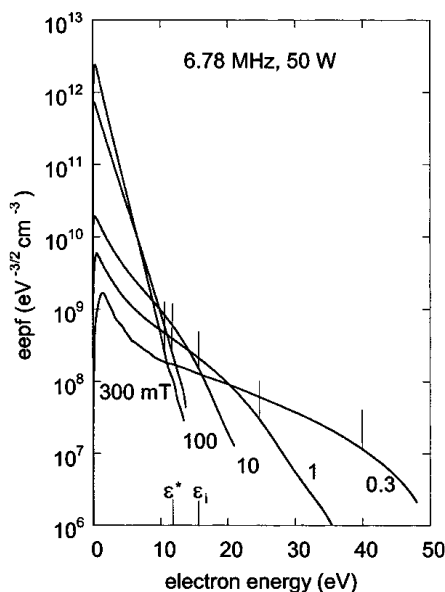


Рисунок 5. Функции распределения электронов по энергиям в центре ВЧ разряда в аргоне при различных давлениях. Чёрточками отмечены потенциалы плазмы относительно заземлённой ГРК [58].

В заключение отметим, что существование нелокальной кинетики электронов радикальным образом упрощает расчёты параметров неравновесной плазмы, сводя задачу к решению 0-мерного уравнения Больцмана, а пространственная неоднородность плазмы и функций распределения электронов по энергиям определяется лишь амбиполярным потенциалом, который можно найти из уравнений гидродинамики плазмы [59-61].

1.3.2 Эквивалентное сопротивление плазмы индуктивного ВЧ разряда

Важным вопросом организации разряда в индуктивных ВЧ двигателях является обеспечение эффективного вложения ВЧ мощности в разряд. В работах [4, 72-82] показано, что ВЧ мощность в индуктивном разряде делится между двумя нагрузками: активным сопротивлением внешней цепи и эквивалентным сопротивлением плазмы:

$$P_{gen} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 (R_{ant} + R_{pl}), \quad (1.3.3)$$

где P_{gen} – мощность ВЧ генератора, I_{ant} – ток, текущий через антенну, R_{ant} и R_{pl} – активное сопротивление внешней цепи и эквивалентное сопротивление плазмы. В работах [4, 73, 75-82] подробно исследовано поведение R_{pl} и проанализирован

вклад столкновительного и бесстолкновительного механизмов в величины эквивалентного сопротивления в широком диапазоне условий поддержания разряда. На рисунке 5 показаны рассчитанные зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от концентрации электронов, рассчитанные при различных значениях давления в газоразрядной камере.

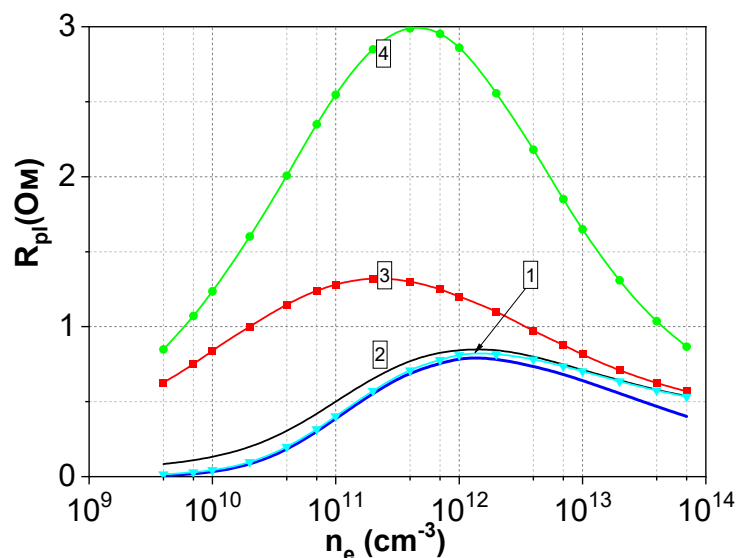


Рисунок 6. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от плотности плазмы. Торцевая спиральная антенна. $R = 7.5$ см, $T_e = 5$ эВ. Давление нейтрального газа 1 – 0.1 мТор, 2 – 1 мТор, 3 – 10 мТор, 4 – 100 мТор. Синяя кривая – R_{pl} , рассчитанное без учета столкновений [77].

Как видно, зависимость $R_{pl}(n_e)$ является немонотонной. Связано это с тем, что поглощение ВЧ мощности осуществляется лишь электронами, находящимися в скин слое. Рост концентрации электронов, с одной стороны, приводит к увеличению поглощения, а с другой – к уменьшению толщины скин-слоя, т.е. к уменьшению числа электронов, участвующих в поглощении мощности. Конкуренция указанных факторов и является причиной немонотонной зависимости R_{pl} от n_e .

Внимательное рассмотрение рисунка 5 показывает, что при низких давлениях, характерных для работы ВЧ ИД вклад в поглощение вносят, как столкновительный, так и бесстолкновительный механизмы.

Первое экспериментальное подтверждение существования бесстолкновительного поглощения ВЧ мощности было выполнено в работах В. Годяка [57, 58, 62, 63, 65, 68, 70].

В. Годяк измерил распределение электрических полей $\vec{E}$ и тока в плазме $\vec{j}$ и, проинтегрировав их по объёму ГРК, получил полную вложенную в плазму мощность. Эту величину можно связать с частотой столкновений, и определить эффективную частоту столкновений $\nu_{eff} = \frac{\nu_{Te}}{\delta}$, при которой плазма поглощала бы соответствующее количество мощности в классическом случае столкновительного режима поглощения. Затем В. Годяк провёл зондовые измерения и определил ФРЭЭ, по которым рассчитал реальную частоту столкновений электронов с атомами ν_{en} . При давлениях менее 10 мТор, т.е. в условиях аномального скин-слоя, частота ν_{en} оказалась гораздо меньше рассчитанной эффективной частоты, $\nu_{en} \ll \nu_{eff}$ [63] (см. рис. 6). В случае, когда ν_{eff} оказывается больше частоты столкновений с тяжёлыми частицами ν_{en} , вклад бесстолкновительного механизма в общую величину поглощаемой мощности доминирует. Это видно из совокупного анализа рис. 7 и рис. 8. При увеличении давления, когда скин-слой становится нормальным, эффективная частота ν_{eff} совпадает с частотой электрон-атомных столкновений ν_{en} , а мощность почти полностью поглощается чисто столкновительным способом.

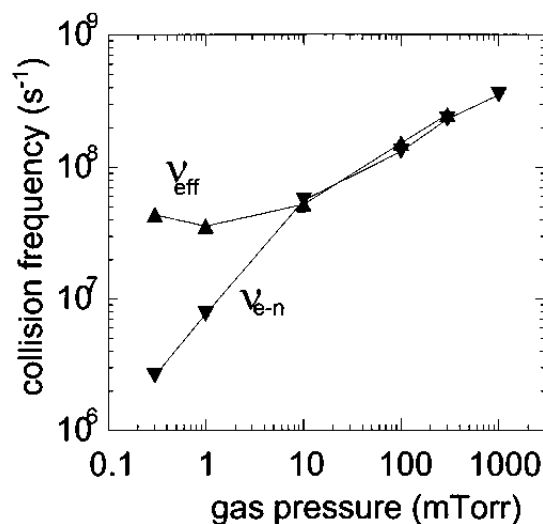


Рисунок 7. Эффективная частота столкновений электронов со стенкой ν_{eff} и с атомами ν_{en} в скин-слое ($z = 1$ см, $r = 1$ см) в разряде аргона с планарной антенной. Мощность 100 Вт, рабочая частота 6,78 МГц [63].

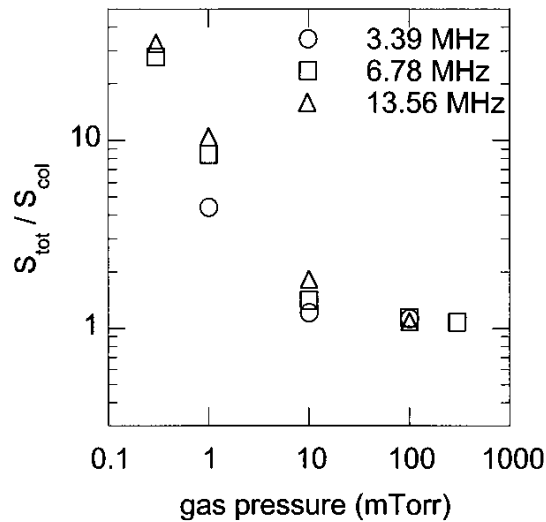


Рисунок 8. Отношение измеренной полной поглощаемой плазмой ВЧ мощности S_{tot} к рассчитанной мощности S_{col} , поглощаемой посредством столкновительного механизма, в индуктивном разряде в зависимости от давления аргона при разных рабочих частотах. $L = 10$ см, $D = 20$ см [63].

1.3.3 Влияние внешнего магнитного поля на индуктивный ВЧ разряд

Рассмотрение рис. 6 показывает, что абсолютные значения эквивалентного сопротивления плазмы R_{pl} малы. Обзор литературы показывает, что реальные значения сопротивления R_{ant} могут достигать 1 Ом, значительно превышая эквивалентное сопротивление плазмы. В этом случае, лишь малая доля мощности ВЧ генератора поступит в разряда, большая же часть ВЧ мощности будет истрачена на нагрев элементов внешней цепи. В цикле работ [4, 74, 78, 81-90] было подробно изучено влияние внешнего магнитного поля на индуктивный ВЧ разряд. Было показано, что существенное увеличение эквивалентного сопротивления в индуктивном разряде низкого давления может быть достигнуто за счет наложения на разряд внешнего продольного магнитного поля, индукция которого близка к областям резонансного возбуждения геликонов и волн Трайвелписа-Гоулда. Типичное поведение эквивалентного сопротивления в зависимости от индукции внешнего магнитного поля показано на рис. 9.

Как видно, при значениях концентрации электронов порядка $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ эквивалентное сопротивление плазмы заметно превышает 1 Ом. Этот факт определил план разработки прототипа ВЭРД в данной работе, а именно, в план работ было включено использование внешнего магнитного поля для увеличения эффективности ВЧ ионного двигателя, работающего на кислороде и азоте.

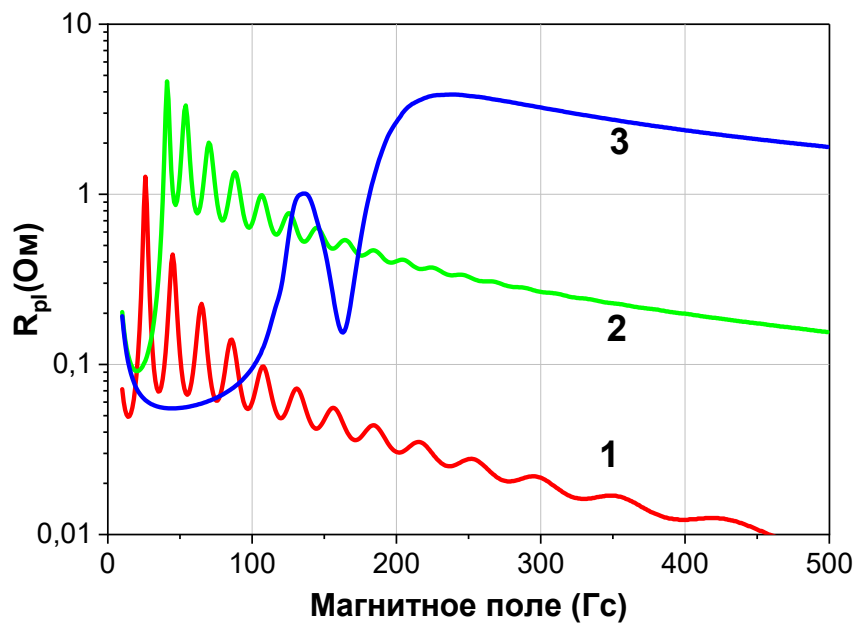


Рисунок 9. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы, рассчитанная для случая $R = 2.5$ см, $L = 15$ см. Цифры 1, 2, 3 соответствуют расчетам, выполненным для концентраций электронов 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} см⁻³ [4].

1.4 Постановка задачи

Обзор литературы показывает, что, несмотря на обилие работ, посвящённых разработке воздушного электрореактивного двигателя для полётов на ультранизких околоземных орбитах, в настоящее время в мире отсутствуют действующие модели воздушного электрореактивного двигателя. Это связано с большим количеством нерешённых фундаментальных и прикладных задач, стоящих на пути к его реализации.

Анализ существующих работ показывает, что наиболее перспективным электрореактивным двигателем для реализации полёта на ультранизких околоземных орбитах с использованием заборных газов остаточной атмосферы в качестве рабочего тела является индуктивный ВЧ ионный двигатель, т.к. в нём отсутствует контакт электродов с плазмой, и отсутствует катод, теряющий свои эмиссионные свойства за часы в агрессивной среде кислорода и азота. Таким образом, он может работать на разряде химически активных газов, составляющих остаточную атмосферу на ультранизких околоземных орбитах, а наличие в его конструкции электростатической системы ускорения ионов (ионно-оптической системы), позволяет добиваться наивысших значений удельного импульса среди

малых ЭРД. Кроме того, более энергетически выгодным является индуктивный разряд с внешним магнитным полем. В связи с этим была сформулирована цель и задачи работы.

Цель работы – изучить физические процессы в прототипах ВЧ ионного двигателя, работающих на индуктивном ВЧ разряде при наличии и отсутствии магнитного поля, и установить возможность использования прототипов в качестве основы воздушного электрореактивного двигателя, предназначенного для освоения ультранизких околоземных орбит долгоживущими космическими аппаратами.

Для достижения указанной цели в рамках диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Определить основные требования к воздушному электрореактивному двигателю.

2. Измерить характеристики прототипов высокочастотных ионных двигателей, работающих на следующих модификациях ВЧ разряда:

а) ВЧ индуктивный разряд;

б) ВЧ индуктивный разряд с внешним магнитным полем;

при использовании в качестве рабочих газов азота, кислорода и их смесей с инертными газами.

3. Выделить режимы, удовлетворяющие требованиям полётов на ультранизких околоземных орбитах.

4. Измерить параметры плазмы на режимах, близких к рабочим режимам воздушного электрореактивного двигателя на ультранизких околоземных орбитах.

5. Выполнить численное моделирование физических процессов в плазме в газоразрядных камерах прототипов ВЧ ионного двигателя на режимах, близких к рабочим режимам воздушного электрореактивного двигателя на ультранизких околоземных орбитах и сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными.

Глава 2. Требования к воздушному электрореактивному двигателю для поддержания полёта на ультранизких околоземных орбитах

Настоящая глава посвящена обоснованию требований к характеристикам *воздушного электрореактивного двигателя*, предназначенного для компенсации аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы ультранизких околоземных орбит, с учетом суточных и сезонных колебаний концентрации остаточных газов на орбите, а также нахождению подхода к оптимизации энергопотребления ВЭРД в условиях ограниченности энергетических ресурсов.

Главными отличиями условий работы воздушного электрореактивного двигателя от стандартных ЭРД с запасом топлива на борту КА являются ограничение потока fl рабочего тела (атмосферных газов), поступающего в двигатель, и прямая связь как силы аэродинамического сопротивления D , так и тяги двигателя T с массовым потоком рабочего тела μ_{in} , поступающим в воздухозаборник КА. Данное обстоятельство приводит к корректировке целевых параметров ВЭРД и стратегии работ по их оптимизации. Главной характеристикой, определяющей возможность полёта ВЭРД на ультранизкой орбите, оказывается не тяга, а **удельный импульс двигателя I_{sp}** в составе ВЭРД.

2.1 Требования к характеристикам ВЭРД

Для нахождения условия стабильного полёта приравняем величину аэродинамического сопротивления D и тяги T . Перед этим напомним концепцию воздушного электрореактивного двигателя и введём некоторые уточнения.

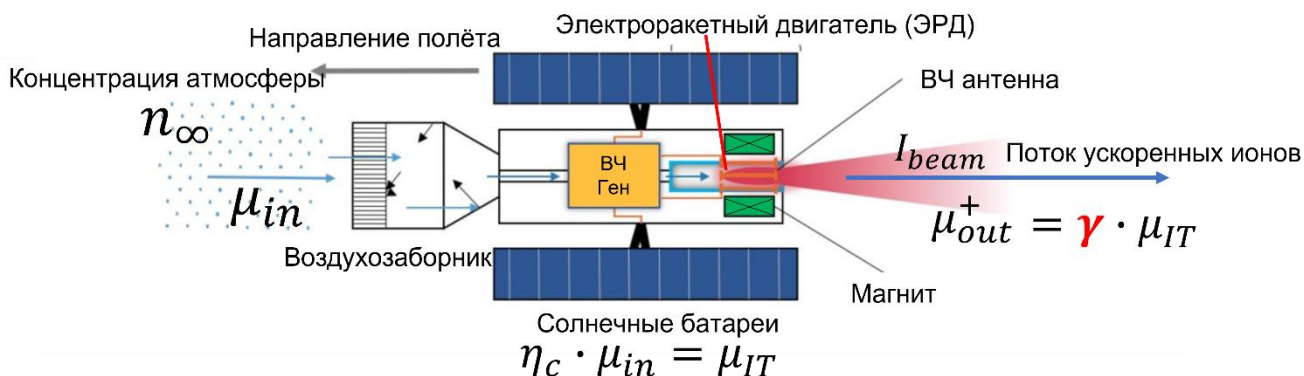


Рисунок 10. Общая концепция воздушного электрореактивного двигателя. Основа рисунка заимствована из работы [1].

Рисунок выполнен в системе отсчёта «Космический аппарат». μ_{in} – массовый поток нейтральных частиц, налетающих на лобовое сечение воздухозаборника КА. определяется составом остаточной атмосферы, орбитальной скоростью КА v_{sc} и площадью воздухозаборника A_{in} :

$$\mu_{in} = v_{sc} A_{in} \sum_j n_j M_j . \quad (2.1.1)$$

Часть потока частиц, проходящая воздухозаборник и попадающая в ВЧ ионный двигатель в составе ВЭРД, является массовым потоком рабочего тела в ВЧ ИД – μ_{IT} . Она определяется эффективностью воздухозаборника η_c :

$$\mu_{IT} = \eta_c \mu_{in} \quad (2.1.2)$$

Частицы атмосферных газов, попавшие в воздухозаборник, но не прошедшие в газоразрядную камеру (ГРК) двигателя, выходят из него в обратном полёту направлении с тепловыми скоростями v_T , покидая воздухозаборник вследствие хаотического движения и столкновений с его стенками. v_T определяется температурой поверхности воздухозаборника [91]. В газодинамических расчётах потоков частиц и их взаимодействия с поверхностями одним из самых важных факторов, сильнее всего влияющих на результаты расчётов аэродинамики (например, коэффициента эффективности воздухозаборника η_c) и, как следствие, влияющих на подход к оптимизации аэродинамической формы того или иного объекта является коэффициент аккомодации σ , определяющий характер взаимодействия частиц газа с поверхностью [92]. В случае абсолютно неупругого взаимодействия частиц набегающего потока с поверхностью (диффузного отражения) коэффициент аккомодации принимается равным единице $\sigma = 1$. В случае зеркального отражения частиц от поверхности – $\sigma = 0$ [93]. Зачастую используется промежуточный случай $\sigma < 1$ [12-14, 94], когда некоторая доля импульса частицы сохраняется при отражении. В литературе нет достоверных данных о реальных значениях σ , характерных для взаимодействия атомарного кислорода и молекулярного азота с поверхностью на скорости 8 км/с, поэтому в настоящей работе, используются данные аэродинамических расчётов, взятые из работ, выполненных в приближении абсолютно неупругого отражения [91].

Аэродинамическое сопротивление космического аппарата определяется орбитальной скоростью КА v_{SC} , характерными площадями поперечного сечения КА и воздухозаборника A_{ref} и A_{in} , плотностью остаточной атмосферы $\rho = \sum_j n_j M_j$ и коэффициентом аэродинамического сопротивления C_{xa} , определяемого формой космического аппарата [95]:

$$D = v_{SC}^2 \frac{C_{xa}}{2} A_{ref} \sum_k n_k M_k = \mu_{in} v_{SC} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}}, \quad (2.1.3)$$

Отметим, что, помимо лобового сопротивления, коэффициент C_{xa} также включает в себя взаимодействие частиц набегающего потока с боковыми поверхностями КА и определяется как отношение удвоенного полного аэродинамического сопротивления КА к потоку импульса $\mu_{in} v_{SC} A_{ref}$, направленному на лобовое сечение аппарата A_{ref} [91, 95, 96]. Коэффициент аэродинамического сопротивления принимает минимально возможное значение $C_{xa} = 2,2$ в случае оптимальной формы КА, когда взаимодействием потока частиц с боковыми поверхности КА можно пренебречь.

Выражение для тяги, развиваемой двигателем [А3]:

$$T = \sum_k \frac{i_{beam_k}}{e} M_k^+ v_{ex_k} = \frac{i_{beam}}{e} (M^+ v_{ex})^* = \mu_{in} \eta_c \gamma \frac{(M^+ v_{ex})^*}{M^*}, \quad (2.1.4)$$

где i_{beam_k} – ионные токи каждого сорта ионов, M_k^+ – массы ионов, v_{ex_k} – скорости истечения ионов, $M^* = \frac{\sum_k f l_k M_k}{\sum_k f l_k} = \frac{\sum_k n_k M_k}{\sum_k n_k}$ – усреднённая по входящему в двигатель потоку масса частиц, $(M^+ v_{ex})^* = \frac{\sum_k i_{beam_k} M_k^+ v_{ex_k}}{\sum_k i_{beam_k}} = \frac{\sum_k i_{beam_k} M_k^+ v_{ex_k}}{i_{beam}}$ – усреднённый по полному вылетающему потоку ионов импульс ионов, e – заряд электрона, M_k – массы нейтральных частиц в набегающем на КА потоке, n_k – концентрации нейтральных частиц в набегающем потоке атмосферных газов, η_c – эффективность воздухозаборника, γ – коэффициент использования рабочего тела (КИРТ):

$$\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl}. \quad (2.1.5)$$

В формуле (2.1.5) i_{beam} – полный ионный ток, fl – полный поток частиц¹, поступающий в ГРК электрореактивного двигателя в составе ВЭРД, т.е. количество частиц атмосферных газов, поступающих в ВЧ ИД в единицу времени.

Массовый поток частиц μ_{IT} , проходящих насквозь и покидающих двигатель, равен сумме массовых потоков нейтралов μ_{out}^0 и ускоренных ионов μ_{out}^+ , исходящих из ионно-оптической системы (ИОС) ионного двигателя:

$$\mu_{IT} = \mu_{out}^0 + \mu_{out}^+. \quad (2.1.6)$$

Нейтральные частицы выходят из ВЧ ИД с тепловыми скоростями v_T , соответствующими температуре стенок газоразрядной камеры двигателя (~ 300 К), а ионы – со скоростями v_{ex} , определяемыми ускоряющим напряжением U на эмиссионном электроде ИОС. Причем при стандартных для ионных двигателей ускоряющих напряжениях $U = 1000 - 2500$ В получается следующее соотношение характерных скоростей:

$$v_T \sim 500 \frac{\text{м}}{\text{с}} \ll v_{sc} \approx 7.8 \frac{\text{км}}{\text{с}} \ll v_{ex} \sim 100 \text{ км/с} \quad (2.1.7)$$

Последнее неравенство означает, что основной вклад в тягу вносят ионы, поэтому во всех расчётах реактивной тягой, создаваемой потоками нейтральных частиц, движущихся с тепловыми скоростями, можно пренебречь.

Массовый поток ионов определяется суммой массовых потоков молекулярных и атомарных ионов, извлекаемых из ИД:

$$\mu_{out}^+ = \sum_j \frac{i_{beamj}}{e} M_j^+, \quad (2.1.8)$$

Приравняв выражения для тяги (2.1.4) и сопротивления (2.1.3):

$$T = \mu_{in} \eta_c \gamma \frac{(M^+ v_{ex})^*}{M^*} = \mu_{in} v_{sc} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}} = D, \quad (2.1.9)$$

можно заметить, что массовый поток μ_{in} определяет одновременно и тягу, сопротивление. После деления левой и правой части уравнения на массовый

¹ Поток частиц fl измеряется в sccm – стандартных кубических сантиметрах в минуту, $1 \text{ sccm} = 2.65 \cdot 10^{19}$ частиц/мин = $4,42 \cdot 10^{17}$ частиц/с.

поток газа, поступающий в двигатель, $\mu_{IT} = \mu_{in}\eta_c$, условие баланса тяги и сопротивления $T \geq D$ выражается через требование к удельному импульсу двигателя, определяемому в работе [97] как отношение тяги ЭРД к потребляемому им массовому расходу рабочего тела $I_{sp} = \frac{T}{\mu_{IT}}$:

$$I_{sp} = \gamma \frac{(M^+ v_{ex})^*}{M^*} \geq \frac{v_{sc}}{\eta_c} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}} = I_{sp}^*. \quad (2.1.10)$$

I_{sp}^* – пороговое значение удельного импульса, которое должен развивать ЭРД в составе ВЭРД, чтобы удержать КА на УНОО, используя только атмосферные газы набегающего на воздухозаборник потока частиц.

Оценки порогового значения удельного импульса для полёта на УНОО высотой 200 км ($v_{sc} = 7.8$ км/с), проведённые для КА оптимальной формы ($C_{xa} = 2.2, \frac{A_{ref}}{A_{in}} = 1$) и воздухозаборника с эффективностью $\eta_c = 0.3$, дают пороговое значение удельного импульса $I_{sp}^* = 30000$ м/с. В то же время, для различных целевых применений КА на УНОО могут потребоваться аппараты неоптимальной формы ($C_{xa} > 2.2$), и целесообразно иметь двигатель, способный обеспечить удельный импульс I_{sp} в диапазоне значений $30 \div 40$ км/с ($C_{xa} = 2.2 \div 3.0$).

Рассмотрим подробно, чем определяется удельный импульс ионного двигателя [А4]:

$$I_{sp} = \frac{T}{\mu_{IT}} = \gamma \frac{(M^+ v_{ex})^*}{M^*} = \gamma \frac{\sqrt{2eUM^+}^*}{M^*} = \gamma \frac{\sqrt{2eU}}{M^*} \sqrt{M^+}^*. \quad (2.1.11)$$

Удельный импульс ВЧ ионного двигателя I_{sp} определяется с одной стороны коэффициентом использования рабочего тела γ , с другой – скоростью истечения ионов $v_{ex} = \sqrt{\frac{2eU}{M_i}}$, регулируемой с помощью ускоряющего напряжения U на эмиссионном электроде ионно-оптической системы, а также компонентным составом потока ускоренных ионов. КИРТ и компонентный состав пучка ионов определяются методом организации и физическими особенностями разряда в ГРК ВЧ ИД. В данной работе основные усилия сосредоточены именно на изучении

свойств ВЧ разряда в ГРК ионного двигателя, особенностей его работы на атмосферных газах и способов повышения КИРТ γ .

Проведём оценки требуемых КИРТ для поддержания полёта на УНОО при стандартном для ИД ускоряющем напряжении $U = 1500$ В.

Когда в прототип ИД поступают молекулярные азот или кислород возможны два предельных случая [А3]: 1) поток извлекаемых ионов состоит только из молекулярных ионов, 2) поток извлекаемых ионов состоит только из атомарных ионов. Принимая во внимание, что массы кислорода и азота близки, в соответствии с формулой (2.1.4), получим в первом случае:

$$T_M = \eta_c \mu_{in} \gamma v_{exM}, \quad (2.1.12a)$$

где v_{exM} – скорость истечения молекулярных ионов;

во втором случае:

$$T_A = \frac{1}{2} \eta_c \mu_{in} \gamma v_{exA}, \quad (2.1.12b)$$

где v_{exA} – скорость истечения атомарных ионов. Множитель 1/2 появляется за счет того, что масса частиц, создающих тягу в два раза меньше массы частиц, поступающих в воздухозаборник. Реальные значения тяги лежат между T_A и T_M .

Предположение о полностью молекулярном потоке вылетающих из ВЧ ИД ионов позволяет получить заниженную оценку для коэффициента использования рабочего тела, требуемого для успешной компенсации сопротивления остаточной атмосферы с помощью ВЧ ИД в составе воздушного электрореактивного двигателя, использующего исключительно заборные атмосферные газы [А3]:

$$\gamma_M \geq \frac{v_{sc}}{\eta_c v_{exM}} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}}. \quad (2.1.13a)$$

Предположение, о полностью атомарном потоке вылетающих из двигателя ионов даёт завышенную оценку требуемого КИРТ, которая и использовалась в ходе всей дальнейшей работы:

$$\gamma_A \geq \frac{v_{sc}}{\eta_c v_{exA}} C_{xa} \frac{A_{ref}}{A_{in}}. \quad (2.1.13b)$$

Проведённые по формулам (2.1.13a) и (2.1.13b) оценки КИРТ дают следующие результаты: $\gamma_M \geq 0.29$, $\gamma_A \geq 0.41$. При наличии в пучке извлекаемых

ионов как молекулярных, так и атомарных ионов требуемые значения газовой эффективности лежат в промежутке между значениями, рассчитанными при условиях, что в потоке находятся только молекулярные или только атомарные ионы.

В дальнейшем значение КИРТ $\gamma \geq 0.4$ считалось целевым и служило ориентиром в большинстве задач работы.

Известно, что при работе ИД на ксеноне коэффициент γ близок к 1, однако, замена ксенона на азот и кислород сопровождается заметным понижением γ . Эксперименты показали, что добиться желаемого $\gamma \geq 0.4$ – задача, требующая комплексной оптимизации высокочастотного ионного двигателя.

Теперь рассмотрим внешние условия, при которых ВЧ ИД в составе ВЭРД должен обеспечивать требуемый удельный импульс для полётов на УНОО.

2.2 Влияние колебаний плотности атмосферы ультранизких орбит на работу ВЭРД

Средние значения концентрации компонент земной атмосферы на высоте 200 км были оценены с помощью программы NRLMSISE-2.0 [98]. На данной высоте основными компонентами атмосферы являются атомарный кислород, молекулярный азот и молекулярный кислород. Их среднегодовые концентрации в средних широтах представлены в таблице 3. Для расчётов использовались координаты 45° с.ш. и 45° в.д. при солнечной активности аналогичной нынешней фазе 11-летнего солнечного цикла [99]. Концентрация других газов, включая атомарный азот, на порядки ниже.

Таблица 3. Среднегодовые концентрации значимых компонент остаточной атмосферы на высоте 200 км при солнечной активности 2014 г., аналогичной текущей.

Газ	Концентрация, см ⁻³
Атомарный кислород n_O	$4.0 \cdot 10^9$
Молекулярный азот n_{N_2}	$3.0 \cdot 10^9$
Молекулярный кислород n_{O_2}	$1.3 \cdot 10^8$

Проведённый в ходе исследования с помощью модели [98] анализ вариации значений концентраций газов в течение года, месяца, суток, показал, что самые большие отклонения значений от среднего наблюдаются у атомарного кислорода и составляют порядка 30%. Близкие значения отклонения справедливы и для полной плотности атмосферы. При этом какая-либо корреляция между концентрациями азота и атомарного кислорода отсутствует. Таким образом можно сделать вывод, совпадающий с принятым в литературе мнением, что плотность атмосферы и, соответственно, *поток газа в ВЭРД может варьироваться почти в 2 раза* от минимального до максимального значения с течением времени.

Вариация концентрации остаточных газов создаёт серьёзные требования к рабочему диапазону воздушного электрореактивного двигателя и ВЧ ионного двигателя в его составе. Верхняя и нижняя граница *рабочего диапазона ВЧ ИД по расходу* должны отличаться хотя бы в 2 раза для успешного выполнения задачи удержания КА на ультранизкой орбите за счёт использования *только забортных газов* набегающего потока в качестве рабочего тела:

$$\frac{fl_{max}}{fl_{min}} \geq 2 \quad (2.2.1)$$

Рассчитать поступающий в ВЧ ИД в составе ВЭРД поток частиц (расход) забортных газов fl можно по формуле:

$$fl = A_{in} v_{sc} \eta_c \sum_i n_i \quad (2.2.2)$$

На рис. 11 приведены значения поступающего в ВЧ ИД потока атмосферных газов fl , рассчитанные из приведённых выше концентраций, в зависимости от площади воздухозаборника A_{in} при эффективности воздухозаборника $\eta_c = 0.3$. Жёлтым отмечен диапазон возможных значений потока газа в ВЧ ИД в составе ВЭРД с учётом суточных и сезонных флуктуаций концентрации остаточной атмосферы на орбите высотой 200 км. В соответствии с данным графиком, имея информацию о рабочем диапазоне двигателя в составе ВЭРД, можно определить, сможет ли он компенсировать сопротивление остаточной атмосферы во всём

возможном диапазоне её плотности, а также подобрать площадь воздухозаборника, необходимую для обеспечения двигателя достаточным количеством рабочего тела.

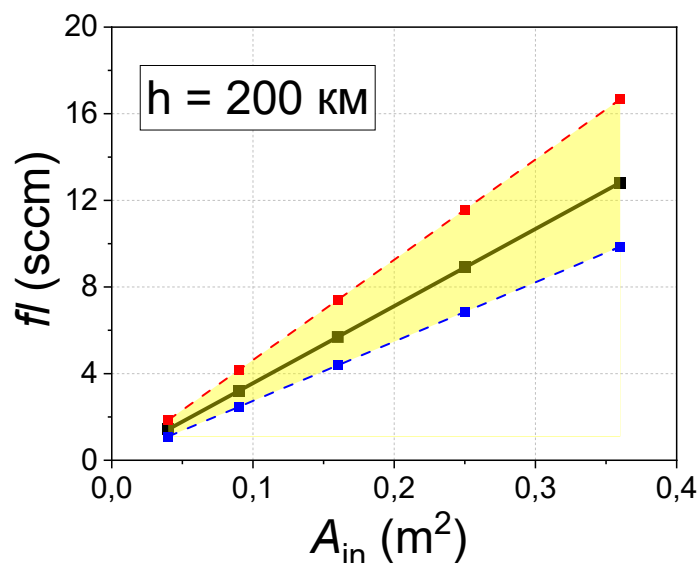


Рисунок 11. Зависимость поступающего в ВЧ ИД в составе ВЭРД расхода частиц fI от площади воздухозаборника A_{in} на высоте 200 км с учётом вариаций плотности остаточной атмосферы. Эффективность захвата частиц воздухозаборником $\eta_c = 0.3$.

Традиционно для космической отрасли расход газа, поступающего в ЭРД, измеряется в стандартных кубических сантиметрах в минуту (sccm):

$$1 \text{ sccm} = 2.65 \cdot 10^{19} \frac{\text{частиц}}{\text{мин}}, \quad (2.2.3)$$

где $2,65 \cdot 10^{19} = N_L$ – постоянная Лошмидта – количество молекул в 1 см^3 при нормальных условиях (атмосферном давлении 100 кПа, температуре 0°C).

2.3 Требования к энерговооружённости КА с ВЭРД

Рассмотрим, из чего складывается полная потребляемая двигателем мощность P_{tot} :

$$P_{tot} = P_{gen} + i_{beam} U = (C_i + U) i_{beam}, \quad (2.3.1)$$

где P_{gen} – энергозатраты на поддержание разряда в ГРК двигателя, i_{beam} – извлекаемый ионный ток, U – ускоряющее ионы напряжение в ионно-оптической системе, C_i – «цена» иона, измеряемая в Вт/А – показывает энергозатраты на извлечение единицы ионного тока из ЭРД. Зависимости «цены» иона от КИРТ $C_i(\gamma)$ подробно изучены в главах 4 и 5.

Потребляемая мощность линейно зависит от ускоряющего напряжения, в то время как в выражении (2.1.11) для удельного импульса $I_{sp} = \gamma \frac{\sqrt{2eU}}{M^*} \sqrt{M^+}^*$, ускоряющее напряжение стоит под корнем:

$$I_{sp} \sim \gamma \sqrt{U} \quad (2.3.2)$$

При максимально достигнутом КИРТ увеличение удельного импульса возможно только за счёт увеличения энергии ионов. Исходя из условия стабильного полёта на УНОО $I_{sp} > I_{sp}^*$ можно рассчитать величину требуемого для компенсации сопротивления ускоряющего напряжения $U_{sp} \sim \frac{1}{\gamma^2}$:

$$U_{sp} = \frac{M^{*2}}{2eM^+} \left(\frac{I_{sp}^*}{\gamma} \right)^2 \quad (2.3.3)$$

При этом увеличение U может повлечь за собой рост энергозатрат на получение тяги, превышающих доступные на КА за счёт солнечных батарей. В свою очередь, увеличение площади солнечных батарей приведет к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления C_{xa} и увеличению порогового удельного импульса I_{sp}^* . Получается комплексная самосогласованная задача по оптимизации, связывающая не только параметры двигателя, но и внешнюю форму аппарата, расположение солнечных панелей на нём и их ориентацию на орбите относительно Солнца.

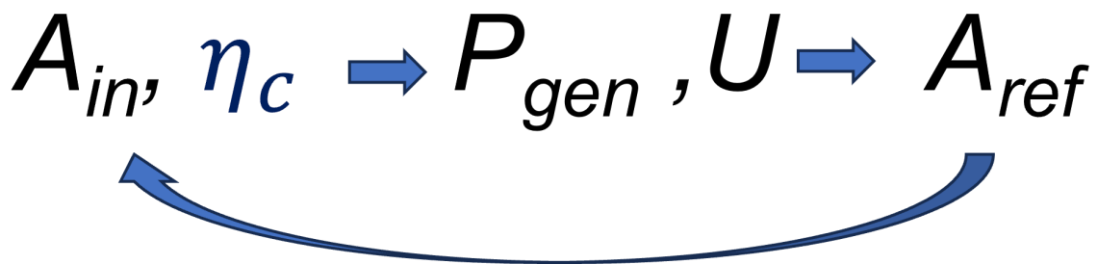


Рисунок 12. Иллюстрация взаимосвязей самосогласованной модели электропитания ВЭРД.

Исходя из сказанного выше, в настоящей работе особое внимание было уделено получению максимально возможного КИРТ.

Глава 3. Экспериментальная установка и методы исследования

Глава посвящена описанию экспериментальной установки, конструкции прототипов индуктивных ВЧ ионных двигателей, исследуемых в работе, методов экспериментальных исследований.

3.1 Общий вид экспериментальной установки

Схема рабочей установки представлена на рис. 13. Установка включает в себя вакуумную камеру объемом порядка $0,8 \text{ м}^3$ (7), которая откачивается каскадом из двух насосов – форвакуумного и турбомолекулярного до давления не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ Торр. Работа насосов контролируется через блок управления. Давление измерялось с помощью широкодиапазонной лампы (5). Во время экспериментов давление в вакуумной камере не превышало $3 \cdot 10^{-4}$ Торр.

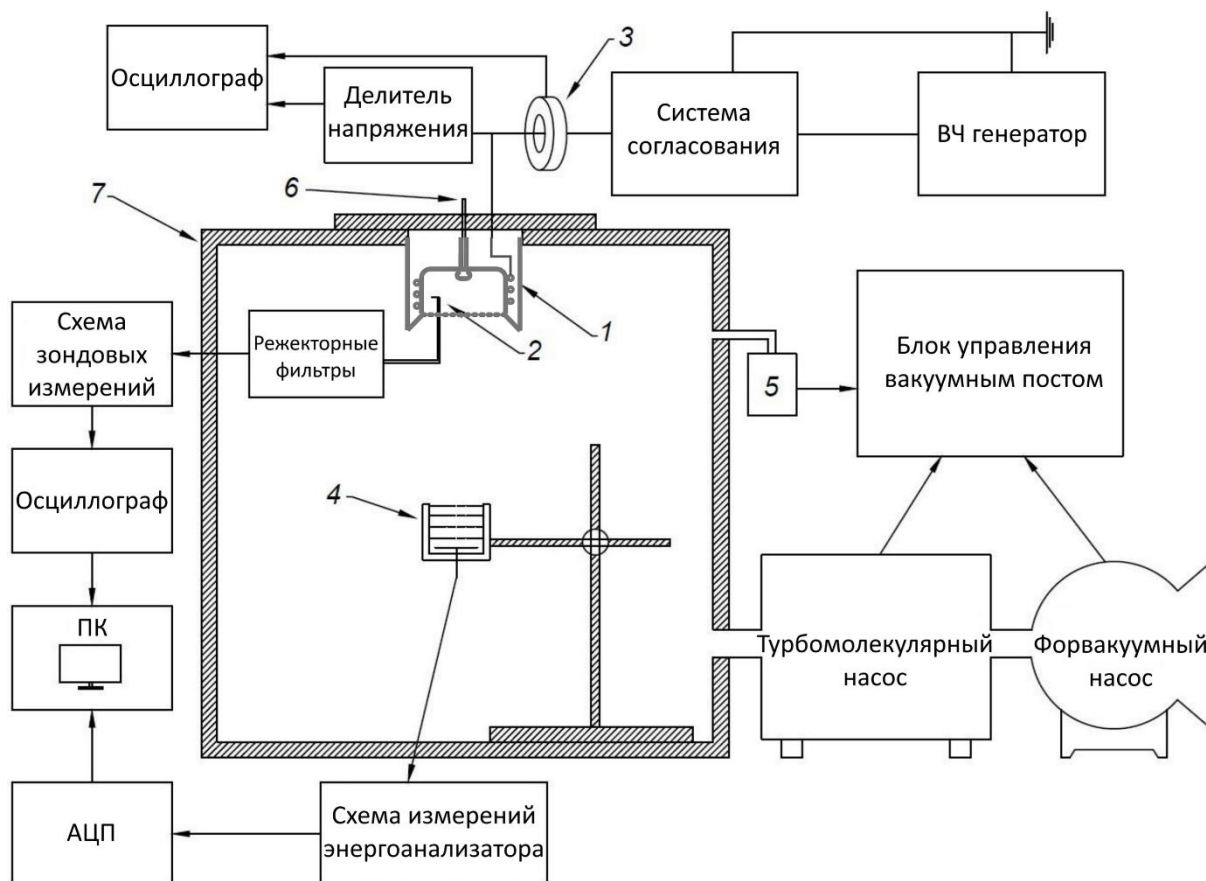


Рисунок 13. Схема экспериментальной установки. 1 – прототип индуктивного ВЧ ИД в заземлённом кожухе, 2 – зонд Ленгмюра, 3 – пояс Роговского, 4 – четырёхсеточный энергоанализатор, 5 – широкодиапазонный датчик давления, 6 – газосвод, 7 – вакуумная камера.

Для поджига и поддержания ВЧ разряда в ГРК ВЧ ИД антенна была соединена с ВЧ генератором через систему согласования L-типа. Мощность

генератора могла плавно изменяться от 0 до 500 W. Использовались генераторы серии HF Power GKA с рабочими частотами 4, 6.78, 13.56 и 27,12 МГц.

Для измерения расхода атмосферных газов в пределах от 3 до 40 sccm (стандартных сантиметров кубических в минуту) использовался шариковый расходомер Koflock 1600R. Исследуемый диапазон расходов газа выбирался, исходя из проведённых оценок условий работы двигателя в КА на УНОО. Расход инертных газов в главе 5 контролировался аналогичным расходомером с диапазоном $1,5 \div 15$ sccm.

Для диагностики плазмы в ГРК ВЧ ИД и параметров потока ионов на выходе из прототипа двигателя использовались методы спектральной диагностики плазмы, зонд Ленгмюра и энергоанализатор.

3.2 Схема прототипа индуктивного ВЧ ионного двигателя

Схема лабораторного прототипа ВЧ ИД, основанного на индуктивном ВЧ разряде, показана на рис. 14. Прототип ВЧ ИД состоит из кварцевой ГРК, ионно-оптической системы (ИОС) и магнитной системы. В работе использовались ГРК диаметром 10 см и длиной $L = 5, 7$ и 9 см. Одна торцевая поверхность ГРК закрыта ИОС, на второй расположен газоввод, по которому рабочий газ поступает в ИД. На внешней боковой поверхности ГРК смонтирована соленоидальная антенна, имеющая 3,5 витка. Охлаждаемая проточной водой антенна изготовлена из медной трубки диаметром 3 мм. Антенна используется для поджига и поддержания индуктивного ВЧ разряда в диэлектрической кварцевой газоразрядной камере.

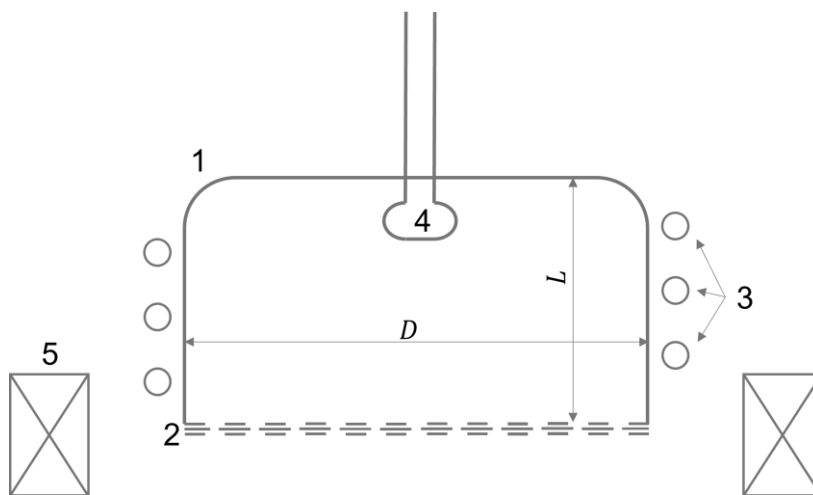


Рисунок 14. Схема лабораторного источника ионов. 1 – ГРК, 2 – пережатая ИОС, 3 – индуктор, 4 – газоввод, 5 – электромагнит. Диаметр ГРК $D = 10$ см, высота ГРК $H = 7$ см.

ИОС состоит из трех перфорированных электродов (эмиссионный, ускоряющий и замедляющий) толщиной 1 мм каждый. Расстояние между электродами равняется 0,7 мм. Прозрачность сеток составляет 0,15 для нейтральных частиц и 0,6 – для ионов. На электроды ИОС подаются постоянные напряжения, соответствующие схеме «ускорение – замедление». В настоящих экспериментах напряжение на эмиссионном электроде равнялось $U = 1200$ В. Замедляющий электрод был заземлен.

Принцип работы пережатой оптики, обеспечивающей разную прозрачность для ионов и нейтралов показан на рис. 15. Ионы залетают в широкие отверстия эмиссионного электрода и, фокусируясь электрическим полем, свободно пролетают узкие отверстия ускоряющего электрода, в то время как нейтральные атомы могут покинуть ГРК только через узкие отверстия ускоряющего электрода и дольше остаются в разряде. Таким образом прозрачность ИОС для ионов определяется площадью отверстий в эмиссионном электроде, а для нейтральных частиц – площадью отверстий в ускоряющем.

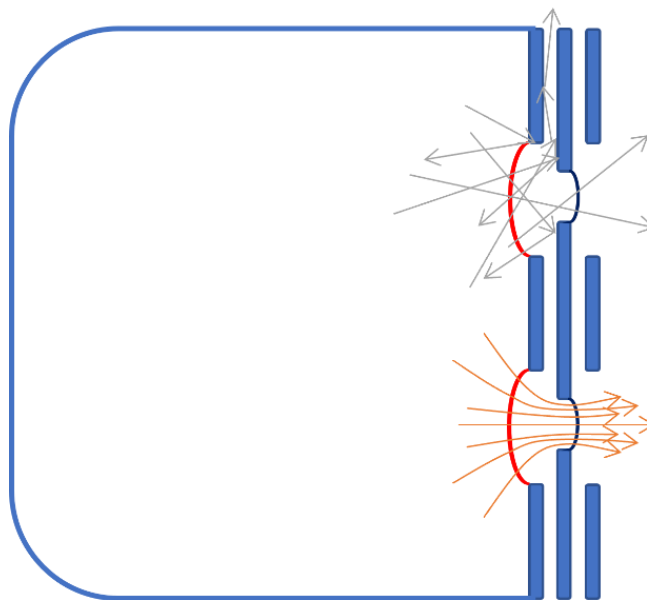


Рисунок 15. Принцип работы пережатой ИОС. Серые стрелочки иллюстрируют траектории движения нейтральных частиц, оранжевые – траектории ионов, сфокусированных электрическим полем ИОС

Магнитная система состоит из электромагнита, расположенного в области ИОС. Электромагнит позволяет создавать в объеме ГРК продольное магнитное поле с индукцией B в центре ИОС в диапазоне 0 – 100 Гс.

3.3 Методики экспериментальных исследований

3.3.1 Методика измерения вложенной в разряд мощности

Известно, что лишь часть мощности вкладывается в плазму индуктивного разряда, а часть теряется в антенне и внешней цепи генератора. Баланс мощности при этом выглядит следующим образом [4]:

$$P_{gen} = P_{pl} + P_{loss}, \quad (3.3.1)$$

где P_{gen} – мощность ВЧ генератора, P_{pl} – вложенная в плазму мощность, P_{loss} – мощность потерь энергии в антенне и внешней цепи генератора.

Величина мощности, поступающей в плазму, P_{pl} , определяется выражением:

$$P_{pl} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 R_{pl}, \quad (3.3.2)$$

где I_{ant} – ток, текущий через антенну, R_{pl} – эквивалентное сопротивление плазмы.

Потери энергии в антенне и внешней цепи возникают из-за тепловых потерь в омическом сопротивлении антенны и из-за индуцированных ВЧ токов в окружающих элементах внешней цепи. Все эти потери пропорциональны ВЧ току в антенне I_{ant} , поэтому для любой закреплённой на прототипе ВЧ ИД антенны можно ввести эффективное сопротивление антенны R_{ant} , и потери энергии во внешней цепи разряда определяются следующей формулой:

$$P_{loss} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 R_{ant} \quad (3.3.3)$$

Для измерения ВЧ токов в индукторе в ходе данной работы использовался пояс Роговского (рис. 16). Пояс Роговского подключается к осциллографу и показания амплитуды напряжения на его контактах, обозначим его I_R , пропорциональны амплитуде ВЧ тока в антенне, $I_R \sim I_{ant}$. Без абсолютной калибровки он позволяет определять амплитуду ВЧ тока в антенне I_{ant} лишь в относительных единицах, а затем и эквивалентное сопротивление антенны в относительных единицах $\tilde{R}_{ant}$, однако этого достаточно для вычисления тепловых потерь в цепи по следующему алгоритму.

Перед сериями из нескольких измерений проводится снятие показаний пояса Роговского при работе генератора без разряда, по результатам которого

определяется эквивалентное сопротивление плазмы в относительных единицах $\tilde{R}_{ant}$:

$$P_{gen} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 R_{ant} = \frac{1}{2} I_R^2 \tilde{R}_{ant} , \quad (3.3.4)$$

С помощью вычисленного значения $\tilde{R}_{ant}$ мощность тепловых потерь в ходе эксперимента может быть определена на основании показаний пояса Роговского по формуле:

$$P_{loss}(I_R) = \frac{1}{2} I_R^2 \tilde{R}_{ant} , \quad (3.3.5)$$

Итоговая формула, используемая в работе для определения вложенной в плазму мощности P_{pl} , выглядит следующим образом:

$$P_{pl} = P_{gen} - \frac{1}{2} I_R^2 \tilde{R}_{ant} \quad (3.3.6)$$

3.3.2 Пояс Роговского

Пояс Роговского представляет собой кольцо из ВЧ феррита с намоткой из медной проволоки, помещённое в заземлённый медный кожух (рис. 16). Надевается на заземлённый вывод ВЧ антенны (рис. 13) и работает по принципу трансформатора.

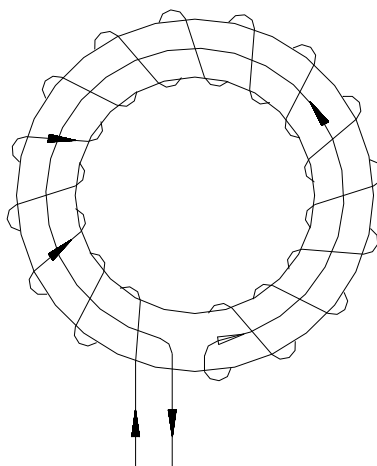


Рисунок 16. Схема пояса Роговского [100].

Его выводы подключаются к нагрузке $R = 12$ Ом и осциллографу (рис. 17). Напряжение U_R , регистрируемое осциллографом, пропорционально току I_R , текущему через пояс Роговского, а значит и току, текущему через антенну, I_{ant} . Для корректной работы прибора и выполнения $I_{ant} \sim I_R \sim U_R$ необходимо, чтобы

активное сопротивление обмотки r и нагрузки R пояса Роговского было меньше её импеданса $\omega_{gen}L$:

$$r + R \ll L\omega_{gen} \quad (3.3.7)$$

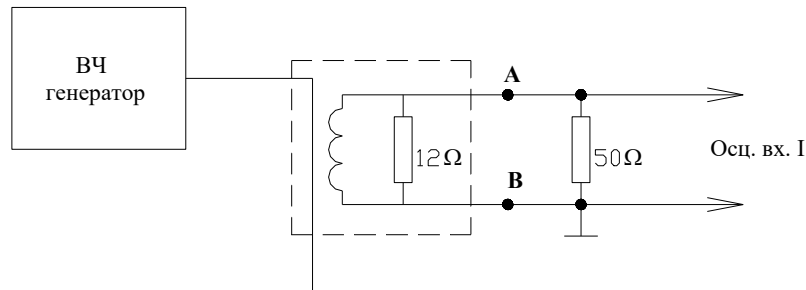


Рисунок 17. Схема подключения пояса Роговского к осциллографу.

На практике это условие выполняется, если $I_R^2 \sim P_{gen}$ при условиях эксперимента. В предыдущем подпункте упоминалось, что в работе сразу использовались показания пояса Роговского I_R в Вольтах.

3.3.3 Методика определения влияния магнитного поля на характеристики разряда

Проводились измерения зависимости извлекаемого тока ионов i_{beam} от индукции магнитного поля B при фиксированной мощности ВЧ генератора P_{gen} и расходе исследуемого газа fl . Одновременно, с помощью пояса Роговского, проводились измерения для определения вложенной в разряд мощности P_{pl} . По результатам серии экспериментов $i_{beam}(B)$ для каждого прототипа находились резонансные значения магнитного поля B^* , при которых извлекаемый ток был максимален.

3.3.4 Методика определения КИРТ и цены иона

Выбирался заданный наперёд ток ионов i_{beam} и проводились измерения зависимости мощности ВЧ генератора P_{gen} , необходимой для поддержания заданного значения i_{beam} , в зависимости от расхода газа fl при определённых ранее значениях магнитного поля B^* или без магнитного поля. P_{pl} вычислялись на основании показаний пояса Роговского.

Измеренные значения тока, мощности и расхода газа были использованы для расчета следующих величин:

- цены иона:

$$C_i = \frac{P_{gen}}{i_{beam}}; \quad (3.3.8)$$

- Цены иона, вычисленной на основании вложенной в плазму мощности (т.е. минимально возможной цены иона для исследуемого прототипа при использовании идеальной системы согласования):

$$C_{i0} = \frac{P_{pl}}{i_{beam}}; \quad (3.3.9)$$

- коэффициента использования рабочего тела:

$$\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl}; \quad (3.3.10)$$

- удельного импульса I_{sp} по формулам и из главы 2.

3.3.5 Методика зондовых измерений

Методика зондовых измерений использовалась для определения концентрации плазмы, потенциала пространства и температуры электронов. Схема подключения показана на рис. 18. Измерения проводились на оси симметрии ГРК на расстоянии 3 см от эмиссионного электрода. Диаметр керамического корпуса зонда равнялся 2 мм. Для того, чтобы поместить его сквозь ИОС внутрь плазмы, в центре ускоряющего электрода было высверлено одно отверстие, и зонд получилось поместить в разряд внутри работающего прототипа ВЧ ИД. Во время зондовых измерений все три электрода ИОС были заземлены и выступали в качестве опорного электрода.

Известно, что зонд может вносить существенные возмущения в плазму, проявляющиеся в виде увеличения интенсивности свечения плазмы вокруг зонда и уменьшения её яркости в других областях ГРК. Однако используемый в работе зонд достаточно малых размеров не вызывал сколько-нибудь заметных изменений в светимости разряда в сравнении с работой прототипа без зонда.

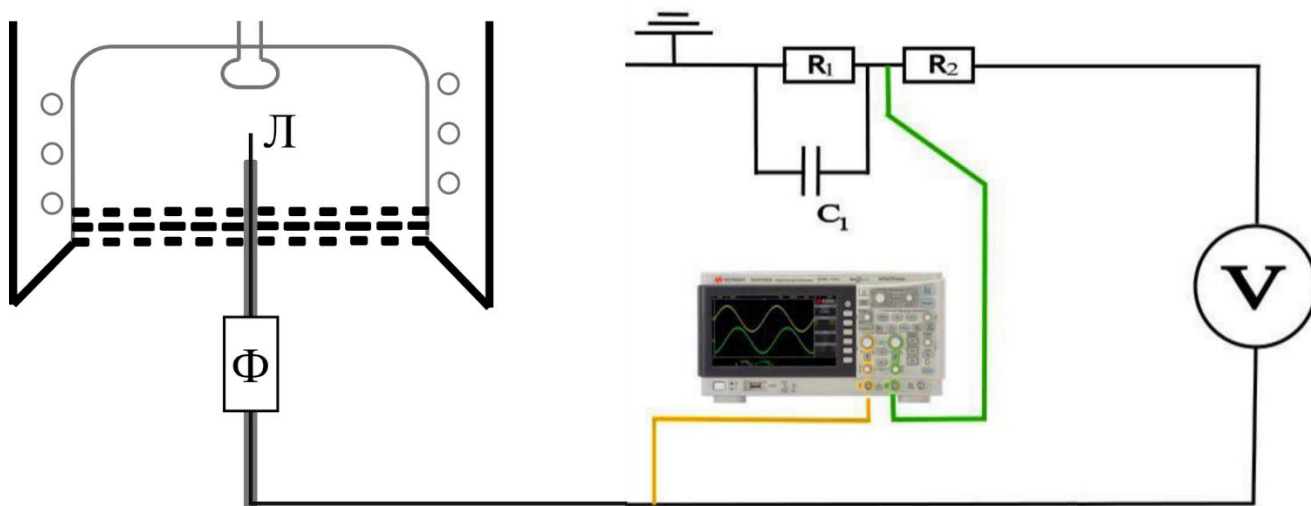


Рисунок 18. Схема зондовых измерений. Φ – режекторные фильтры, Л – зонд Ленгмюра, R_1 , R_2 , C_1 – элементы для измерения зондового тока, V – источник напряжения

Кроме того, внешнее магнитное поле может искажать результаты измерений. Влияние магнитного поля на зондовые характеристики изучалось в работе [101]. В ней утверждается, что влиянием магнитного поля на зонд Ленгмюра можно пренебречь, если ларморовский радиус электронов и ионов больше размера призондового слоя. В данных сериях экспериментов ларморовский радиус электронов с ожидаемыми энергиями составлял более 1 мм при магнитном поле 100 Гс, в то время как радиус зонда составлял 0.23 мм.

Рассмотрим подробнее схему измерения зондовых характеристик, представленную на рис. 18. Для корректного снятия зондовых ВАХ требуется, чтобы импеданс измерительной электрической цепи на рабочей и кратных частотах был много больше, чем импеданс собирающего призондового слоя в момент снятия ионного и электронного токов на зонд. [101, 102]. При таком условии разность потенциалов между зондом и плазмой будет постоянна в течение всего периода ВЧ колебания. В противном случае потенциал зонда будет меняться в зависимости от фазы ВЧ сигнала, и, из-за нелинейности призондового слоя, часть ВЧ поля будет выпрямляться в этом слое, искажая зондовую характеристику. Для повышения импеданса цепи на основной частоте и второй гармонике последовательно с зондом включались два режекторных фильтра, состоящих из LC-звеньев. Подаваемое напряжение на зонд снималось с первого канала осциллографа через делитель напряжения, а для определения зондового тока использовалось сопротивление

известной величины, падение напряжения на котором измерялось на втором канале осциллографа. Параллельно сопротивлению подключалась емкость большого номинала с целью снизить величину ВЧ шума.

Для получения концентрации плазмы, потенциала плазмы и температуры электронов использовалась стандартная методика обработки ВАХ [5, 6, 103].

3.3.6 Методика спектральных измерений

Для оценки компонентного состава плазмы использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии. Излучение плазмы с помощью зеркала и линзы фокусировалось на входной щели спектрометра AvaSpec-2048, который позволял исследовать распределение интенсивности свечения плазмы в диапазоне 350-900 нм. Оцифрованный сигнал с выхода спектрометра поступал на компьютер.

3.3.7 Методика измерения функции распределения ионов по энергиям в вылетающем пучке ионов с помощью энергоанализатора

Для исследования энергии ионов на выходе из источника плазмы использовался четырехсеточный энергоанализатор, схема которого представлена на рис. 19.

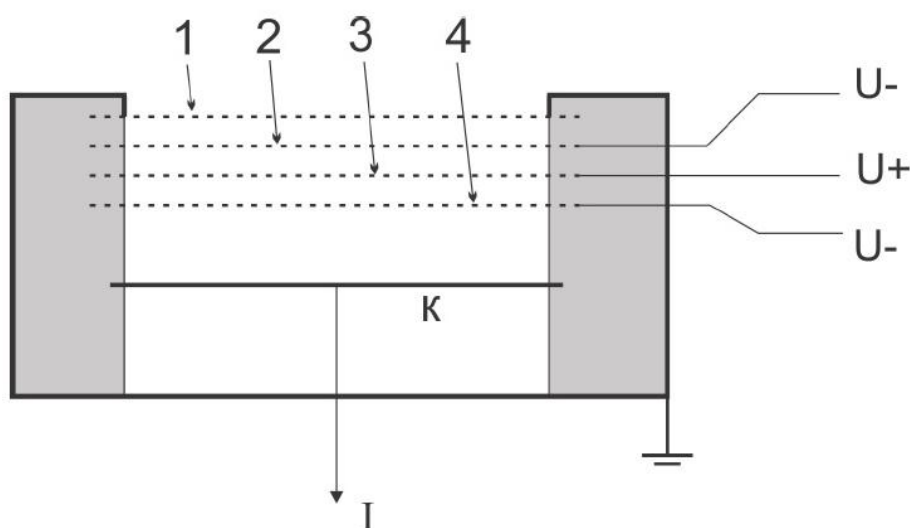


Рисунок 19. Схема энергоанализатора. K – коллектор, 1 – заземленная сетка, 2, 4 – сетки под отрицательным напряжением, 3 – задерживающая сетка. Рисунок заимствован из работы [104].

Энергоанализатор располагался в вакуумной камере на центральной оси прототипа на расстоянии 50 см от него. На таком расстоянии ток на коллектор был

достаточно большой, чтобы выделить его на фоне шумов, однако, энергоанализатор находился достаточно далеко, чтобы не вносить возмущение в разряд. Энергоанализатор состоит из 4-х сеток: первая сетка (корпус энергоанализатора) была заземлена, вторая сетка имела потенциал $\varphi_2 \sim -150$ В для отсеивания электронов из плазмы в вакуумной камере, четвертая имела потенциал $\varphi_4 \sim -30$ В для отталкивания электронов вторичной ион-электронной эмиссии с коллектора, а на третью сетку подавался задерживающий ионы положительный потенциал с источника постоянного напряжения в диапазоне $\varphi_3 = 0 \div 800$ В. Функция распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) в ионном потоке получалась путём дифференцирования коллекторного тока по задерживающему напряжению.

Глава 4. Исследование особенностей работы ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления, предназначенных для получения электрореактивной тяги, при работе только на атмосферных газах

4.1 Физические особенности ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления при работе исключительно на атмосферных газах

Ранее отмечалось, что одна из целей настоящей работы состоит в изучении особенностей индуктивного ВЧ разряда в источниках плазмы, предназначенных для получения электрореактивной тяги, как при отсутствии, так и при наличии внешнего магнитного поля с преимущественной продольной компонентой. Мотивацией использования внешнего магнитного поля для оптимизации энерговклада в ВЧ индуктивные источники плазмы явились результаты работ [4, 85, 87-90, 105], где было показано, что наложение внешнего магнитного поля с индукцией B на индуктивный ВЧ разряд низкого давления при определенных резонансных значениях B приводит к возбуждению волн в плазме. При этом ВЧ поля проникают вглубь плазмы и нагревают электроны во всем ее объеме. Как следствие, улучшается вложение мощности в плазму и наблюдается рост концентрации электронов n_e , а также пропорционального n_e извлекаемого тока ионов i_{beam} . В работах [74-80, 86-89] показано, что эффективность вложения ВЧ мощности, как при отсутствии, так и при наличии внешнего магнитного поля существенно зависит не только от B , но и от геометрических размеров источника плазмы, рабочей частоты и давления. В связи с этим на первом этапе работы были выполнены измерения зависимости извлекаемого тока ионов i_{beam} , от величины индукции магнитного поля [A2] при различных рабочих частотах и длинах ГРК. Результаты, полученные с ГРК длиной 7 и 9 см, показаны на рис. 20 [A4].

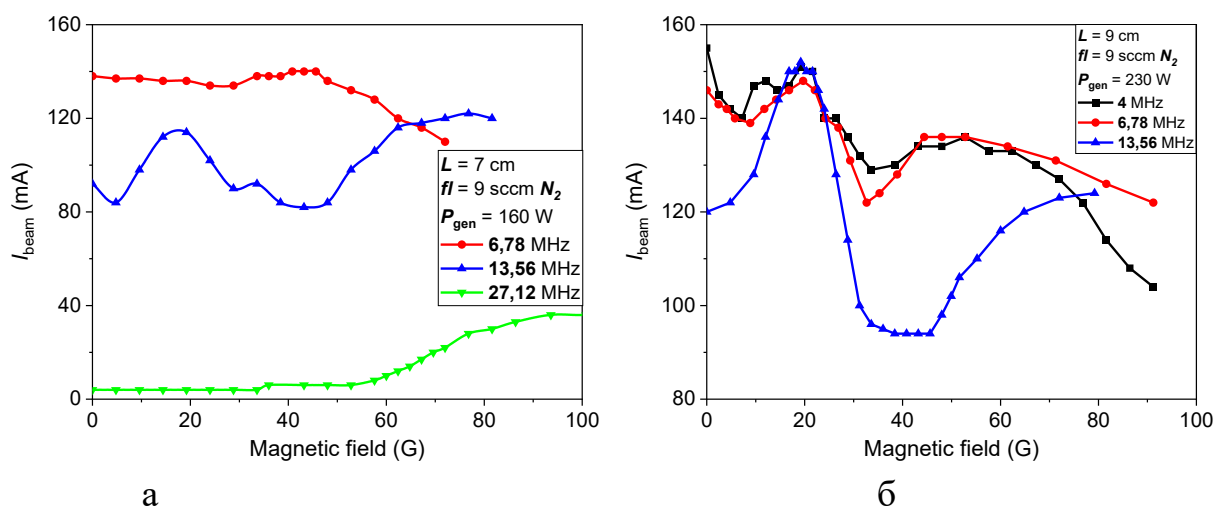


Рисунок 20. Зависимость ионного тока от индукции магнитного поля. Черная, красная, синяя и зеленая кривые соответствуют частотам 4, 6.78, 13.56 и 27.12 МГц. Азот, расход 9 см³/мин. а – длина ГРК 7 см, б – длина ГРК 9 см.

Увеличение индукции магнитного поля в целом сопровождается немонотонным изменением значений ионного тока. Однако, в более короткой ГРК ($L = 7$ см) при работе на частоте 6.78 МГц зависимость ионного тока от магнитного поля выражена слабо, причем наибольшие значения i_{beam} наблюдаются при отсутствии внешнего магнитного поля. При увеличении рабочей частоты до 13.56 МГц в рассмотренном диапазоне магнитных полей появляются два локальных максимума ионного тока [A2]: первый в области 18 Гс, а второй в области 70 Гс. Значения i_{beam} при указанных магнитных полях превышают значения, измеренные при $B = 0$.

Положения локальных максимумов ионного тока совпадают с положениями локальных максимумов зависимости поступающей в разряд ВЧ мощности P_{pl} от B (см. рис. 21). Таким образом, причиной роста ионного тока в областях локальных максимумов является увеличение способности плазмы поглощать ВЧ мощность и увеличение значений мощности, поступающей в разряд.

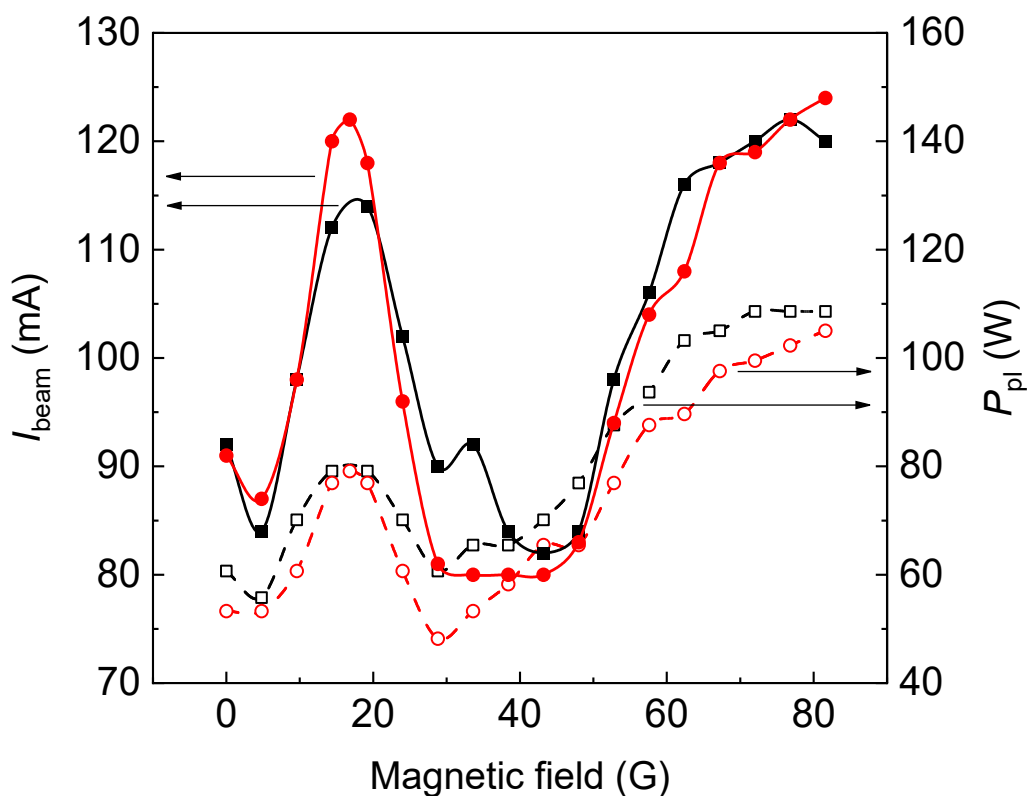


Рисунок 21. Зависимость ионного тока i_{beam} (сплошные линии) и вложенной в плазму мощности P_{pl} (пунктир) от магнитного поля. Квадраты - N_2 , кружки - O_2 . Длина камеры $L = 7$ см, расход газов $f_l = 24$ см³/мин, мощность генератора 160 Вт [A2].

Дальнейшее увеличение рабочей частоты до 27.12 МГц сопровождается общим падением ионного тока и смещением положения максимума в область магнитных полей порядка 100 Гс. Значительное понижение ионного тока здесь может быть следствием появления емкостной составляющей разряда [80, 106]. При увеличении длины ГРК до 9 см изменения ионного тока с увеличением индукции магнитного поля становятся более выраженными, причем при частотах 6.78 и 13.56 МГц значения i_{beam} в области первого локального максимума превышают значения ионного тока, измеренные в отсутствие магнитного поля. При работе на частоте 4 МГц, напротив, значения i_{beam} в отсутствие магнитного поля больше величин тока в областях локальных максимумов. В целом уменьшение рабочей частоты, также как и длины ГРК, приводит к снижению влияния магнитного поля. Более того, при низких частотах ток ионного пучка без внешнего магнитного поля становится больше (см. рис. 20 и таблицу 4).

Таблица 4. Резонансные значения магнитного поля B_I^* и B_{II}^* при различных рабочих частотах генератора f и длине ГРК L .

L см	f MHz	B_I^* и B_{II}^* G	f MHz	B_I^* и B_{II}^* G
5	4	Нет эффекта	13.56	Нет эффекта
7	4	Нет эффекта	13.56	18 / 70
9	4	18 / 55	13.56	18 / 80
5	6.78	Нет эффекта	27.12	--
7	6.78	Слабый эффект	27.12	-- / ~100
9	6.78	18 / 65	27.12	--

Суммируя результаты, представленные выше, можно сделать вывод, что при использовании источников плазмы с длинами 7 см и меньше, а также рабочей частотой менее 13.56 МГц целесообразно использовать источник плазмы без магнитного поля, а при использовании частоты 13.56 МГц и ГРК с длинами 7 см и выше – источник плазмы с внешним магнитным полем, индукция которого близка к $B = B_I^*$ или $B = B_{II}^*$.

Рассмотрение результатов по измерению характеристик источников плазмы, в перспективе предназначенных для получение электрореактивной тяги, начнем с данных, полученных в экспериментах с источником плазмы с ГРК длиной 5 и 7 см без внешнего магнитного поля. На рис. 22 показаны зависимости мощности ВЧ генератора P_{gen} и мощности, вложенной в плазму P_{pl} , необходимых для извлечения ионного тока i_{beam} заданной величины от расхода рабочего газа fl .

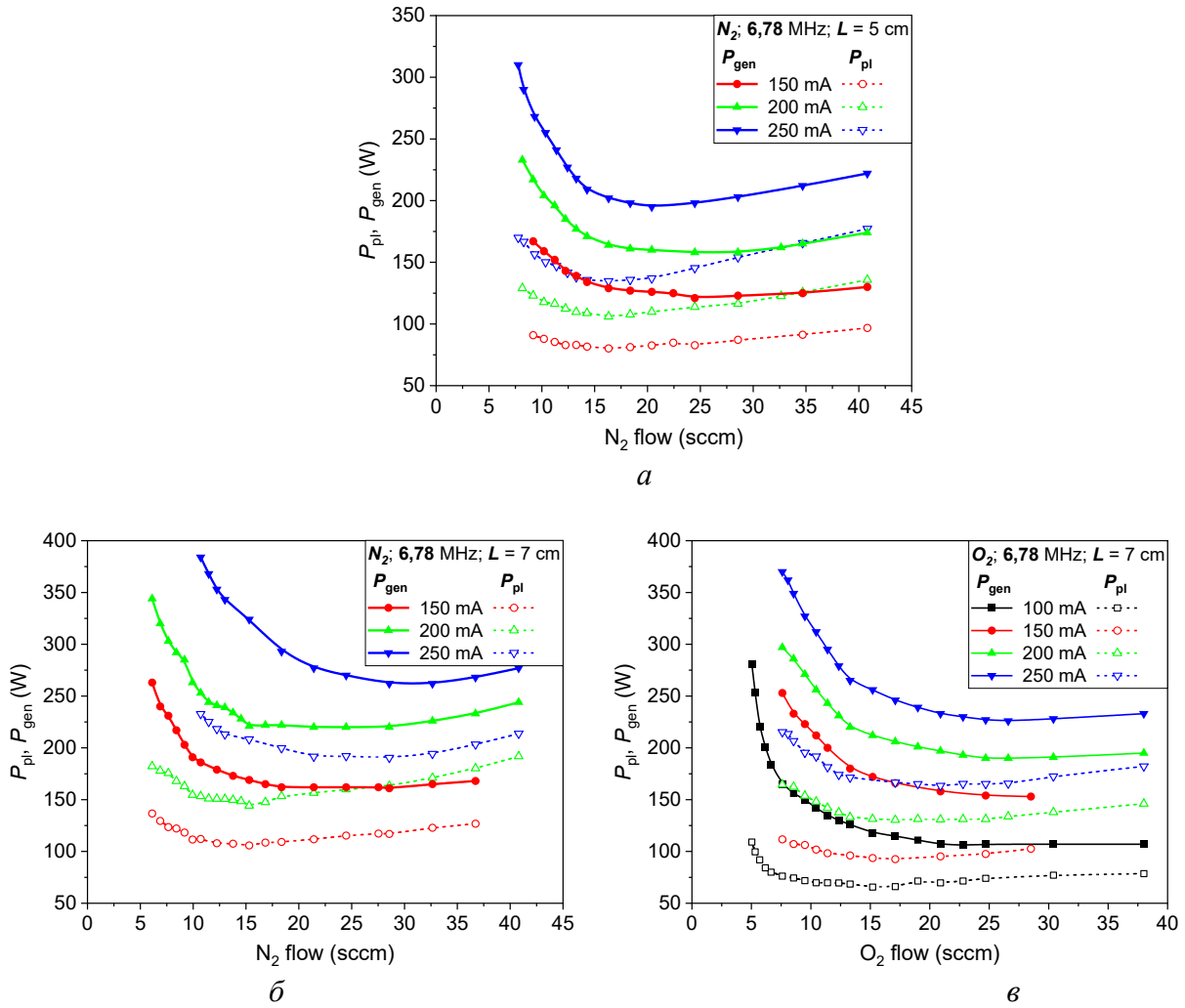


Рисунок 22. Зависимости мощности генератора P_{gen} (сплошные кривые) и мощности, вложенной в плазму P_{pl} (пунктир), необходимых для извлечения ионного тока i_{beam} заданной величины от расхода рабочего газа fl . Рабочая частота 6.78 МГц, длина ГРК $L = 5$ и 7 см. а, б – азот, в – кислород.

Полученные кривые имеют стандартный вид: в области больших расходов газов требуемая мощность слабо зависит от расхода, а по мере уменьшения fl , при достижении некоторого критического расхода fl_{crit} , энергозатраты на извлечение данного значения ионного тока начинают резко расти. Дальнейшее понижение расхода газа приводит к срыву разряда.

Наложение внешнего магнитного поля на разряд, горящий на частоте 13.56 МГц в источнике плазмы длиной 7 см, не приводит к качественным изменениям зависимостей $P_{gen}(fl)$ при $i_{beam} = \text{const}$ (см. рис. 23). Однако, при $B > 0$ проявилась интересная особенность. Магнитное поле с индукцией порядка B_{II}^* (~ 70 Гс) ухудшает характеристики источника плазмы при больших расходах газов ($fl > 20$ sccm) и существенно улучшает их при малых расходах

(5 – 10 sccm) как азота, так и кислорода. Особенно ярко это проявляется при малых значениях ионного тока.

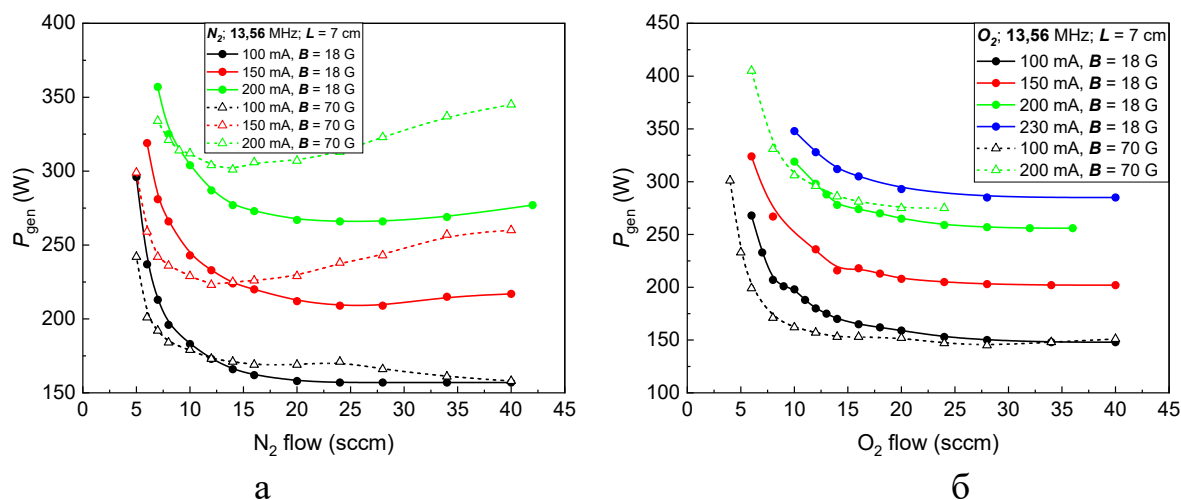
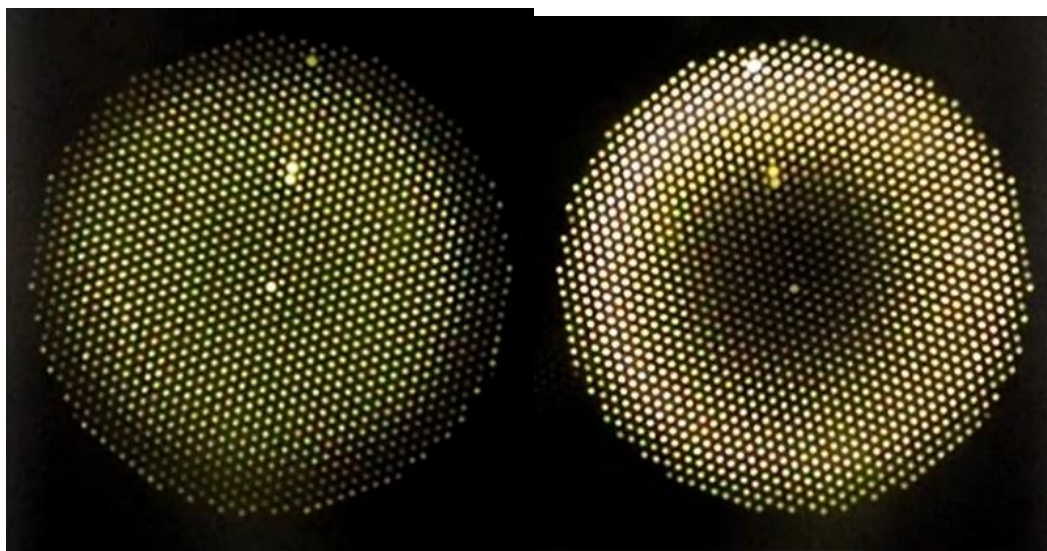


Рисунок 23. Зависимость мощности ВЧ генератора, необходимой для извлечения тока заданной величины от расхода рабочего газа. Рабочая частота 13,56 МГц, длина ГРК – 7 см. Сплошные линии $B = 18$ Гс, пунктир $B = 70$ Гс. а – азот, б – кислород.

Рассмотрим, что происходит в области малых fl . Наличие внешнего продольного магнитного поля затрудняет уход электронов на стенки ГРК, тем самым увеличивая время жизни электронов в разряде и интенсифицируя процессы ионизации. Это обеспечивает возможность поддержания ВЧ разряда в ГРК при более низких концентрациях нейтральных компонент плазмы, тем самым расширяя диапазон существования разряда в сторону меньших расходов.

При магнитных полях с индукцией $B \sim 70$ Гс радиус Лармора электронов становится значительно меньше радиуса источника плазмы, при этом электроны теряют энергию в непосредственной близости от места, где они ее приобретают. Увеличение давления сопровождается ухудшением проникновения ВЧ полей в плазму, в связи с этим область нагрева электронов локализуется вблизи стенок ГРК [57, 59]. Этот эффект сопровождается перераспределением свечения плазмы по радиусу ГРК (см. рис. 24). Радиальное перераспределение плотности и температуры электронов, по-видимому, и приводят к увеличению энергозатрат на получение ионного тока заданной величины при расходах газов более 20 sccm.



а

б

Рисунок 24. Фотографии разряда азота без магнитного поля (а) и при $B \sim B_{II}^* \sim 70$ Гс (б).

Эксперименты показали, что при уменьшении расхода газов происходит не только повышение требуемых энергозатрат, но и изменение компонентного состава плазмы. Качественно изменение компонентного состава плазмы в настоящей работе было проанализировано на основе измерений интенсивности свечения компонент плазмы при уменьшении расхода азота и кислорода. Полученные результаты представлены на рис. 25. Величины интенсивности свечения каждой компоненты плазмы нормировались на значение, измеренное при максимальном из рассмотренных расходах газа.

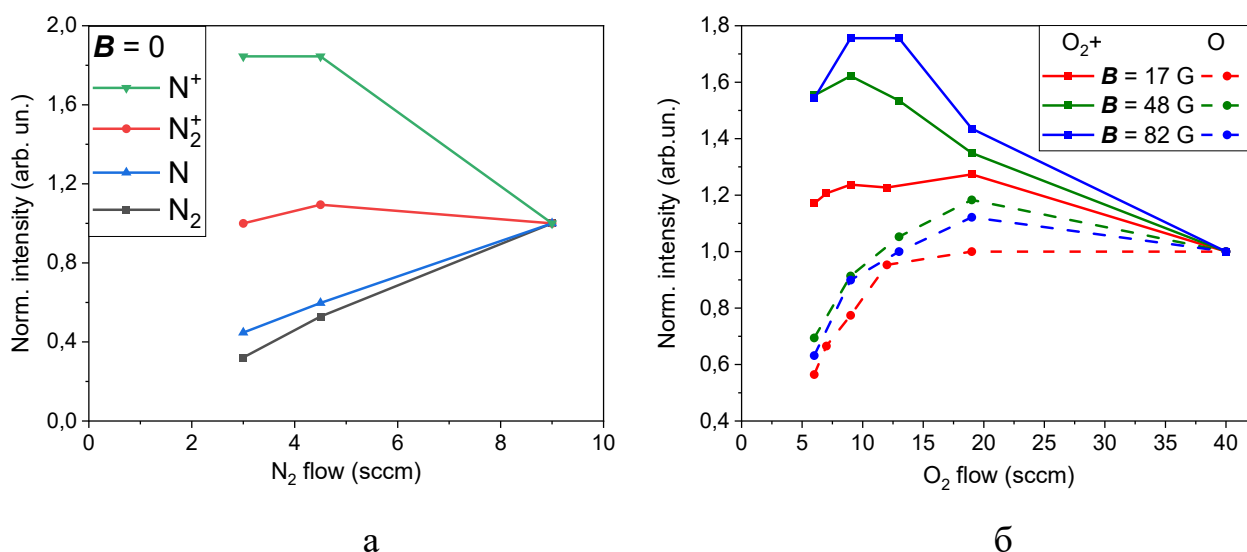


Рисунок 25. Зависимость интенсивности свечения компонент плазмы от расхода газов. $L = 9$ см, 13.56 МГц, $P_{gen} = 200$ Вт. а – азот, $B=0$; б – кислород, $B = B_I^* \div B_{II}^*$.

Как и следовало ожидать, интенсивность свечения нейтральных компонент плазмы азота при отсутствии магнитного поля убывает с уменьшением расхода газов (см. рис. 25а). Интенсивность полос молекулярного иона азота I_{mi} более сложно зависит от fl : с уменьшением расхода сначала возрастает, а затем падает. Интенсивность свечения атомарного иона азота в области расходов $4.5 \div 9$ sccm увеличивается существенно быстрее, чем интенсивность свечения молекулярного иона, что свидетельствует об изменении соотношения между концентрациями атомарных и молекулярных ионов в разряде.

Влияние индукции внешнего магнитного поля на компонентный состав плазмы изучалось на примере разряда в кислороде. К сожалению, измерить интенсивность свечения молекул кислорода и атомарного иона кислорода не удалось. рис. 25б демонстрирует, что интенсивность линий нейтрального атомарного кислорода с уменьшением расхода проходит через небольшой локальный максимум при $fl = 20$ sccm и уменьшается. Рост B сопровождается увеличением величины локального максимума. Зависимость интенсивности полосы молекулярного иона кислорода от расхода кислорода при $B = 17$ Гс близка к аналогичной зависимости молекулярного иона азота. Однако, рост магнитного поля сопровождается существенным ростом интенсивности при расходах $10 - 15$ sccm.

Наблюдавшееся увеличение необходимого энерговклада в разряд и поведение интенсивности свечения компонент плазмы при уменьшении расхода газа может быть связано с существенными изменениями концентрации и температуры электронов, поэтому на следующем этапе были выполнены зондовые измерения параметров плазмы в центральной части ГРК.

Зависимость температуры электронов от расхода азота, измеренная при $P_{gen} = 200$ Вт показана на рис. 26.

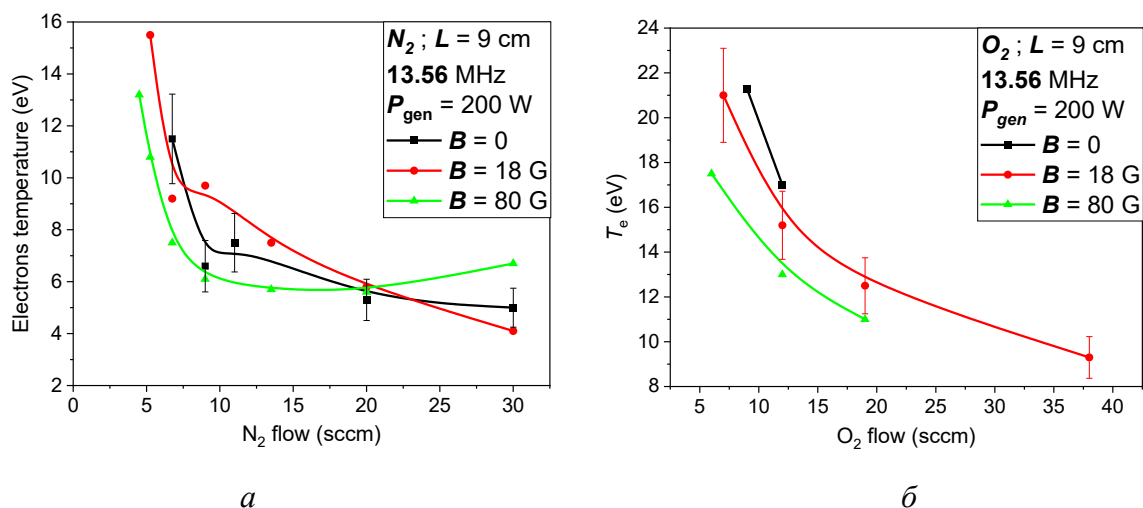


Рисунок 26. Зависимость температуры электронов от расхода азота (а) и кислорода (б) при магнитных полях 0, 18 и 80 Гс. $L = 9$ см. $f = 13.56$ МГц.

Как видно, уменьшение расхода газа в диапазоне расходов 5 – 9 sccm приводит к резкому росту температуры электронов T_e , обеспечивающему увеличение скорости ионизации в условиях понижения концентрации нейтралов. Увеличение T_e и связанного с температурой электронов плавающего потенциала сопровождается повышением потерь энергии на стенках ГРК вследствие выноса энергии электронами и ионами. Это, в свою очередь, приводит к росту мощности, требуемой для поддержания разряда, что и наблюдалось экспериментально.

Еще одним следствием роста температуры электронов является рост степени диссоциации и диссоциативной ионизации молекул в разряде в результате увеличения скорости указанных процессов. Это приводит к изменению соотношения между числом атомарных и молекулярных ионов в разряде, что также наблюдалось экспериментально.

Известно, что между плазмой и эмиссионным электродом ИОС формируется слой пространственного заряда, в котором падает напряжение, равное плавающему потенциалу, который в свою очередь пропорционален температуре электронов. Таким образом, можно ожидать, что при малых расходах газа энергия ионов на выходе из ИД будет существенно превышать энергию, соответствующую потенциалу, поданному на эмиссионный электрод.

На рис. 27 показаны функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ), измеренные при различных расходах азота для рабочих частот 13.56, 6.78 и 4 МГц

соответственно при мощности ВЧ генератора 240 Вт и магнитном поле 82 Гс, длина ГРК составляла 9 см. По оси абсцисс отложена энергия ионов $\Delta E_i = E - eU$, приобретаемая ими в слое пространственного заряда вблизи эмиссионного электрода ИОС. Здесь E – энергия ионов, измеренная энергоанализатором. Как видно, уменьшение расхода азота сопровождается существенным ростом энергии ионов, причем средняя энергия ионов значительно превышает значения, оцененные на основании плавающего потенциала. Вывод справедлив, как при работе на частоте 13.56 МГц, так и на частоте 6.78 МГц. Однако, сравнение ФРИЭ, измеренных на двух частотах, показывает, что уменьшение частоты сопровождается существенным уширением энергетического распределения ионов. Дальнейшее уменьшение частоты до 4 МГц не сопровождалось существенными изменениями ФРИЭ (см. рис. 28).

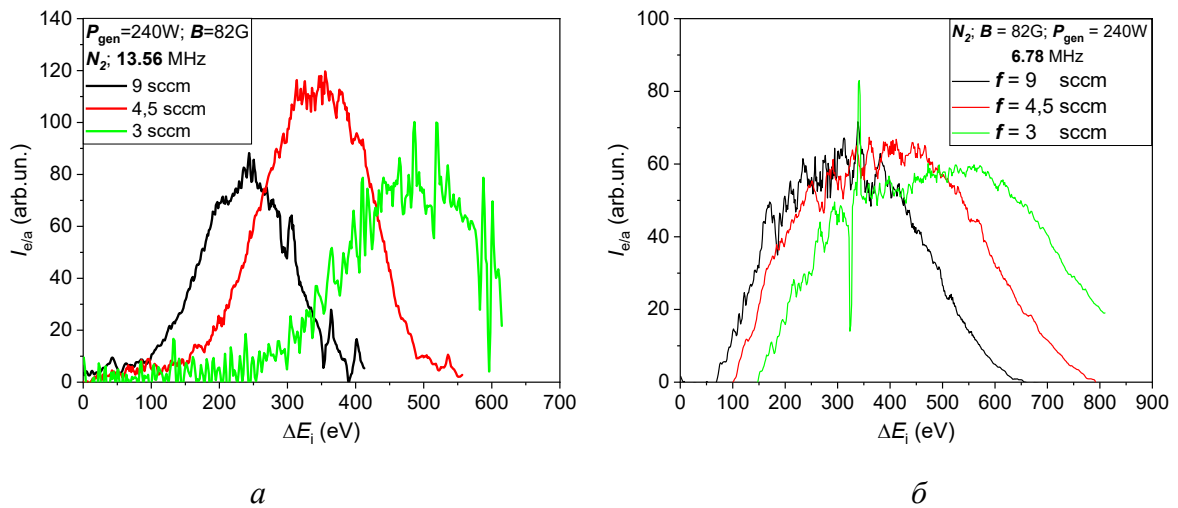


Рисунок 27. Функции распределения ионов по энергиям при расходах азота 3, 4.5 и 9 sccm. $L = 9$ см, $P_{gen} = 240$ Вт, $B = 82$ Гс, азот. а) $f = 13.56$ МГц, б) $f = 6.78$ МГц.

Для того, чтобы разобраться в причинах существенного ускорения электронов в приэлектродном слое и уширения ФРИЭ при частотах менее 13.56 МГц, оценим, какие значения должна иметь концентрация плазмы, чтобы обеспечить токи ионов в диапазоне 100 – 300 мА при замене ксенона на азот и кислород. Ток ионов связан с концентрацией плазмы хорошо известной формулой:

$$i_{beam} = 0,6 \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} n_e S \quad (4.1.1)$$

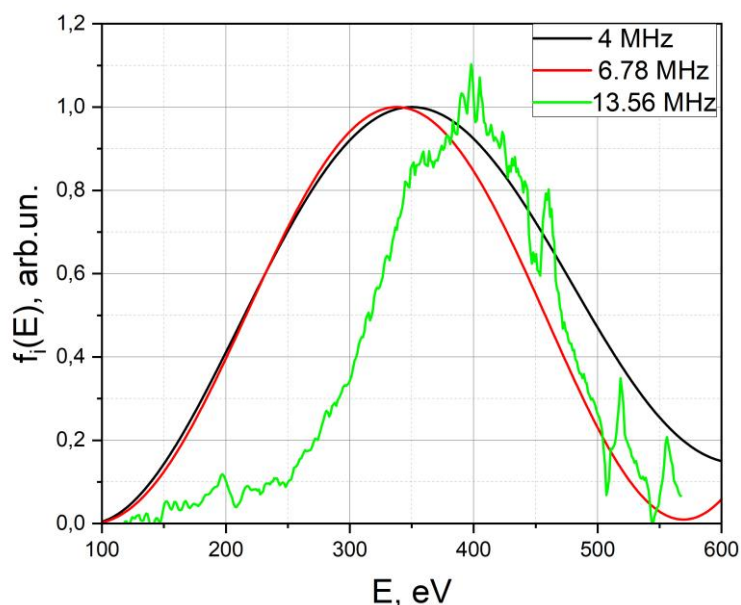


Рисунок 28. Зависимость функции распределения ионов по энергиям от рабочей частоты (4, 6.78 и 13.56 МГц). $L = 9$ см, $fl = 9$ ссм, $P_{gen} = 240$ Вт, $B = 82$ Гс, азот. ФРИЭ нормированы на максимальное значение.

На рис. 29 представлены значения концентрации электронов, рассчитанные с помощью выражения (18) для различных рабочих тел в предположении, что температура электронов равна 10 эВ. Последнее приводит к недооценке концентрации плазмы n_e в тяжелых инертных газах и переоценке – в атмосферных газах.

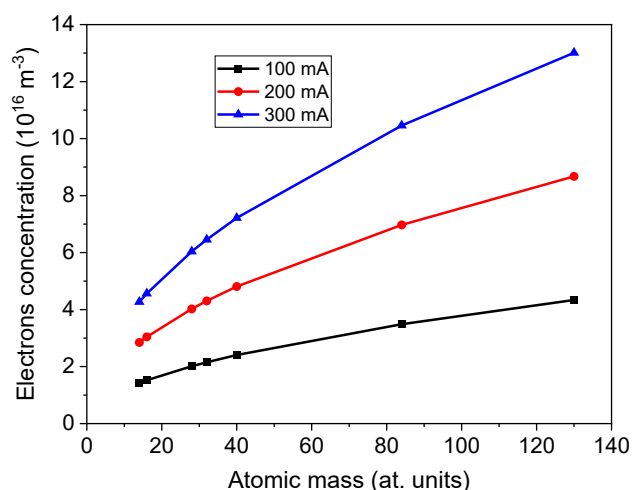


Рисунок 29. Зависимость концентрации электронов в ГРК прототипа ВЧ ИД при использовании различных рабочих газов. $T_e = 10$ эВ.

Рисунок убедительно показывает, что при использовании атмосферных газов концентрация плазмы и ее проводимость существенно ниже, чем

при использовании ксенона. В этом случае естественно предположить, что рассматриваемый разряд в ГРК уже не является чисто индуктивным, а обладает заметной емкостной составляющей [30], в частности благодаря наличию емкостной связи между индуктором и эмиссионным электродом. Это приводит к появлению слоя объемного заряда вблизи электрода, падение потенциала в котором определяется амплитудой ВЧ напряжения между антенной и эмиссионным электродом.

Автор диссертации предполагал, что уменьшение рабочей частоты приведет к приближению ΔE к величине V_{pl} , однако, этого не произошло. Более того, энергетическое распределение ионов сильно уширилось. Объяснение последнему эффекту было найдено на основании оценок ионной ленгмюровской частоты ω_{Li} (см. рис. 30). Простые вычисления показали, что при рабочих частотах генератора менее 13.56 МГц при концентрациях плазмы, типичных для разряда в атмосферных газах выполняется неравенство:

$$\omega_{Li} \geq \omega_{gen} \quad (4.1.2)$$

что и приводит к уширению ФРИЭ. Здесь $\omega_{gen} = 2\pi f$ – круговая рабочая частота. В этом случае ионы успевают пересечь слой за времена меньшие, чем период изменения внешнего ВЧ поля [107]. При этом энергия ионов, ускоренных в слое, зависит от фазы ВЧ напряжения, при которой ионы попадают в слой.

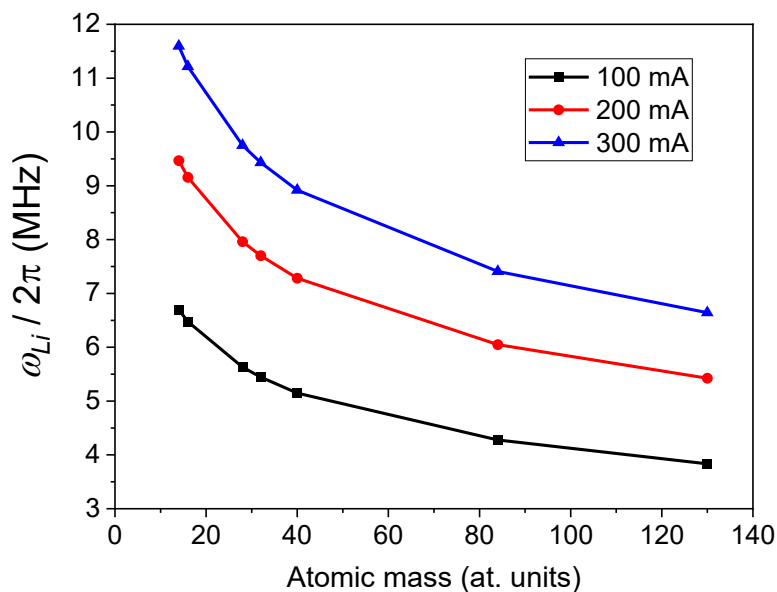


Рисунок 30. Оценки ленгмюровской ионной частоты $\omega_{Li}/2\pi$, проведенные на основании значений концентрации электронов, представленных на рис. 29.

4.2 Характеристики прототипов воздушных ВЧ ИД, основанных на рассмотренных индуктивных источниках плазмы

В Главе 2 было показано, что критически важными параметрами источников плазмы с точки зрения возможности их использования в качестве прототипов ВЧ ИД является достигаемый коэффициент использования рабочего тела (КИРТ) и полные энергозатраты на генерацию потока ускоренных ионов, обеспечивающие получение порогового значения удельного импульса. Результаты, представленные в предыдущем разделе, позволяют определить диапазон достигнутых КИРТ $\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl}$ и соответствующих γ величин «цены иона» $C_i = P_{gen}/i_{beam}$. Вычисленные на основании экспериментальных результатов зависимости C_i от γ для прототипа ВЧ ИД с ГРК длиной 5 см показаны на рис. 31. Для сравнения на том же рисунке нанесены известные из литературы данные немецкой научной группы [8], изучавшей работу ВЧ ионного двигателя RIT-10 на кислороде и азоте. Как видно, результаты работы [8] удовлетворительно соотносятся с полученными в настоящей работе. Отметим, что ГРК двигателя, исследуемого в работе [8], имела форму полусферы, что затрудняет его интеграцию в воздушный электрореактивный двигатель.

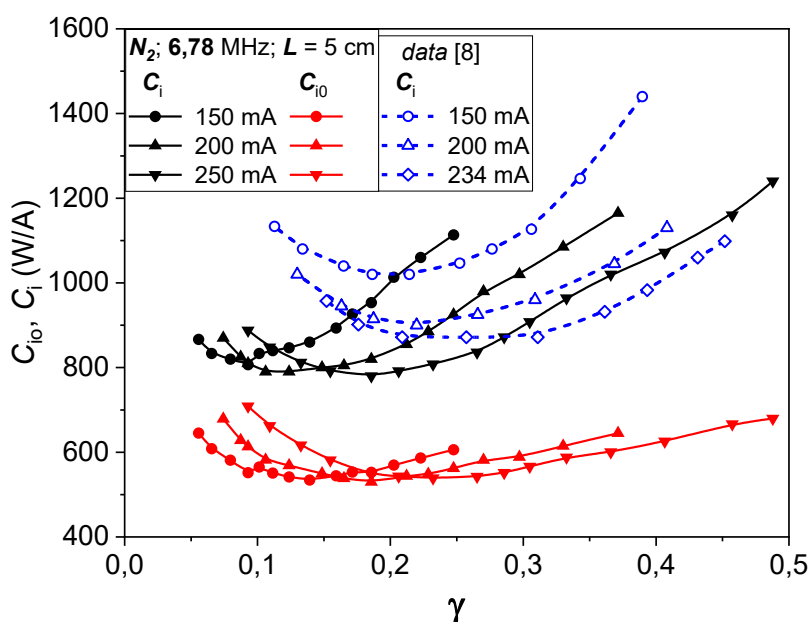


Рисунок 31. Зависимости «цены иона» C_i (чёрные кривые) и C_{i0} (красные кривые), от коэффициента использования рабочего газа γ . Рабочая частота 6,78 МГц, длина ГРК – 5 см, азот. Синие кривые с пустыми символами – результаты немецкой группы, исследовавшей работу двигателя RIT-10 на атмосферных газах [8].

Зависимости C_i от γ для прототипа ВЧ ИД с ГРК длиной 7 см показаны на рис. 31. При работе на азоте максимальные достигнутые значения γ_{max} лежат в диапазоне $0.3 \div 0.5$, при этом область существенного роста «цены иона» начинается уже при коэффициенте использования рабочего тела порядка 0.15. В случае использования кислорода рост «цены иона» при увеличении КИРТ выражен слабее, значения γ_{max} растут с увеличением извлекаемого тока i_{beam} и изменяются так же, как и в азоте в диапазоне $0.3 \div 0.5$. Однако надо иметь в виду, что в лабораторных условиях, в отличие от ситуации на УНОО, в ГРК прототипа ИД поступает молекулярный кислород, который легко диссоциирует в разряде, тем самым увеличивая концентрацию нейтральных частиц по сравнению с ситуацией, когда в ГРК поступал бы атомарный кислород. Поэтому основная часть проведённых в работе измерений для характеристики источника ионов как прототипа ВЧ ИД выполнена именно для разряда азота.

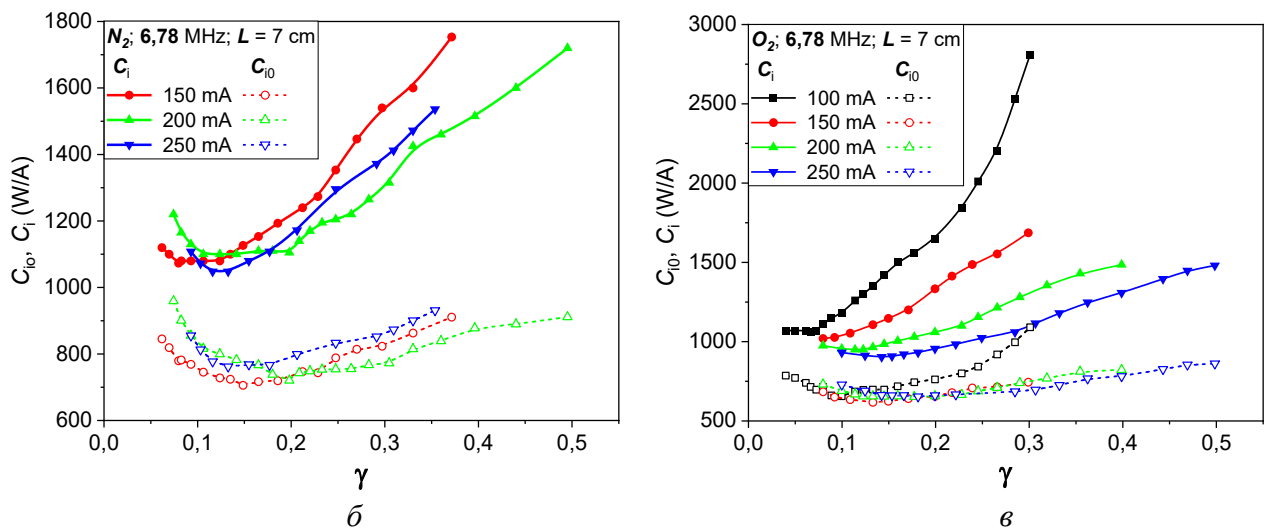


Рисунок 32. Зависимости «цены иона» C_i , рассчитанной по мощности ВЧ генератора (сплошные кривые), и C_{i0} , рассчитанной по мощности, вложенной в плазму (пунктир), от коэффициента использования рабочего газа γ . Рабочая частота 6.78 МГц, длина ГРК $L = 7$ см. а, – азот, б – кислород.

Помимо кривых $C_i(\gamma)$ на рис. 32 приведены зависимости «цены иона» $C_{i0} = P_{pl}/i_{beam}$, рассчитанные по значениям мощности P_{pl} , вложенной в плазму, от коэффициента использования рабочего тела. Можно видеть, что значения C_{i0} существенно ниже C_i . Кроме того, C_{i0} с увеличением γ растет существенно медленнее, чем C_i . Сократить разрыв между C_i и C_{i0} в данной работе не удалось. Предполагается, что положительный результат может быть достигнут

при использовании специального ВЧ генератора, расположенного в вакууме в непосредственной близости от антенны, что уменьшит потери ВЧ мощности в антенне и во внешней цепи источника ионов.

Возможность увеличения коэффициента использования рабочего тела при работе на малых значениях ионного тока была проанализирована в экспериментах с ГРК длиной 9 см. На рис. 33 показаны результаты, полученные при работе на рабочих частотах 4 и 13.56 МГц при различных величинах внешнего магнитного поля.

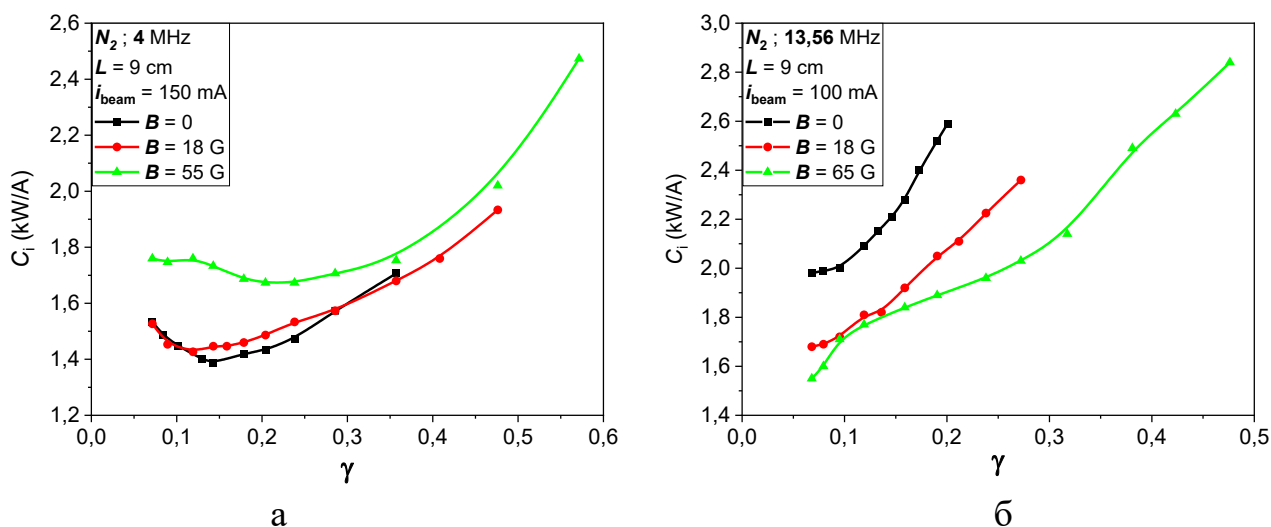


Рисунок 33. Зависимости «цены» иона, от коэффициента использования рабочего тела γ . Азот, длина ГРК – 9 см. а – 4 МГц, б – 13.56 МГц.

Эксперименты показали, что при работе с ГРК длиной 9 см наложение на разряд магнитного поля, соответствующего второму локальному максимуму зависимости $i_{beam}(B)$, сопровождается увеличением максимально возможных значений коэффициента использования рабочего тела уже не только для стандартной рабочей частоты 13,56 МГц, но и для более низких частот 6,78 и 4 МГц (см. рисунок 31). Напомним, что при работе с ГРК длиной 7 или 5 см на данных частотах влияние магнитного поля на характеристики разряда практически не проявлялось.

Полная сводка значений C_i и максимально достигнутых коэффициентов использования рабочего тела γ_{max} , полученных в настоящей работе при изменении длины ГРК и рабочей частоты, приведена в таблице 5.

Таблица 5. Величины «цены иона» и максимальные достигаемые в экспериментах КИРТ для различных прототипов ВЧ ИД при работе на азоте.

L см	f МГц	i_{beam} мА	γ_{max}	C_{i0} Вт/А	C_i Вт/А
5	6.78	150	0.24	600	1100
		200	0.37	650	1150
		250	0.5	700	1250
7	6.78	150	0.37	900	1700
		200	0.5	900	1700
	13.56	100	0.28	1500	2400
		150	0.42	1250	2000
		200	0.40	1200	1700
	27.12	70	0.1	—	3600
9	4	170	0.64	1300	2350
	6.78	150	0.48	1400	2100
	13.56	100	0.47*	1200	2800
		160	0.75	1450	2850
		200	0.47	1250	2150

«*» в данной таблице отмечен случай, когда γ_{max} не был достигнут по техническим причинам: был достигнут нижний предел шкалы расходомера.

Оценим далее величины полных энергозатрат P_{tot} , требуемых для достижения I_{sp}^* . Алгоритм нахождения P_{tot} состоял в следующем:

1. Для каждого фиксированного расхода газа измерялась зависимость ионного тока от мощности ВЧ генератора. По найденным значениям P_{gen} , i_{beam} и fl рассчитывались цена иона C_i и КИРТ γ . Пример измеренных зависимостей $i_{beam}(P_{gen})$ для разных fl показан на рис. 34.

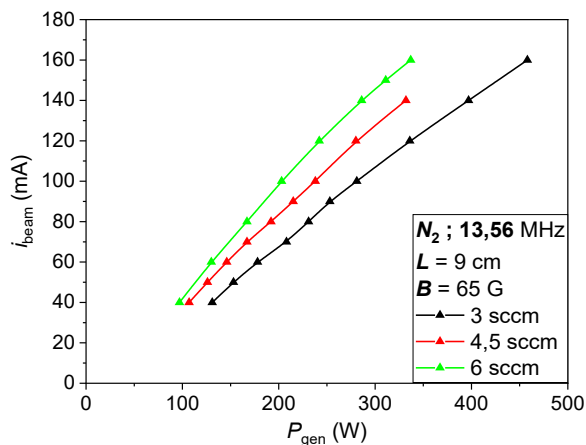


Рисунок 34. Зависимость тока ионов от мощности ВЧ генератора при расходах азота 3, 4.5 и 6 сссм. $L = 9$ см, рабочая частота 13.56 МГц, азот.

2. Для каждого значения γ из формулы (2.3.3) рассчитывалась величина напряжения эмиссионного электрода U_{sp} , необходимого для достижения I_{sp}^* . Вычисленные зависимости $U_{sp}(\gamma)$ для $I_{sp}^* = 30 - 50$ км/с показаны на рис. 35. При расчетах было сделано упрощающее предположение, что пучок ускоренных ионов состоит только из атомарных ионов.

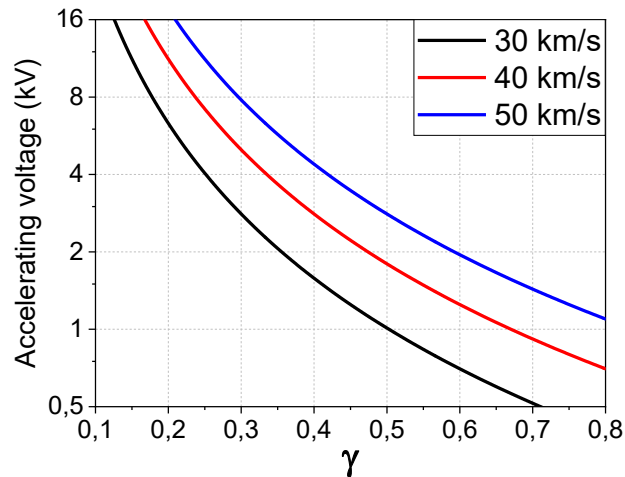


Рисунок 35. Зависимость напряжения U_{sp} на эмиссионном электроде ИОС, необходимого для достижения различных значений удельного импульса I_{sp}^* при работе на азоте в предположении чисто атомарного ионного потока на выходе из двигателя от коэффициента использования рабочего тела γ .

3. Значения i_{beam} , C_i и U_{sp} были использованы для расчета полных затрат мощности на генерацию и ускорение пучка ионов P_{tot} по формуле (2.3.1). Рассчитанные значения P_{tot} в зависимости от КИРТ γ для различных расходов азота и длин ГРК источников плазмы показаны на представленных ниже рисунках.

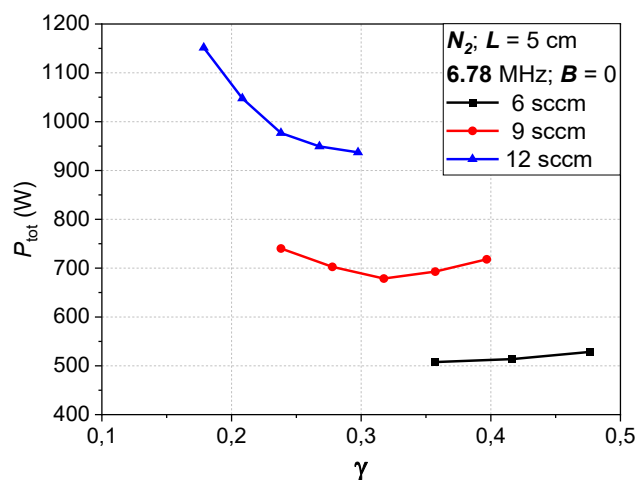


Рисунок 36. Зависимость полной мощности, необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы от коэффициента использования рабочего тела при расходах азота 6, 9 и 12 sccm. $L = 5$ см, $f = 6.78$ МГц, $B = 0$.

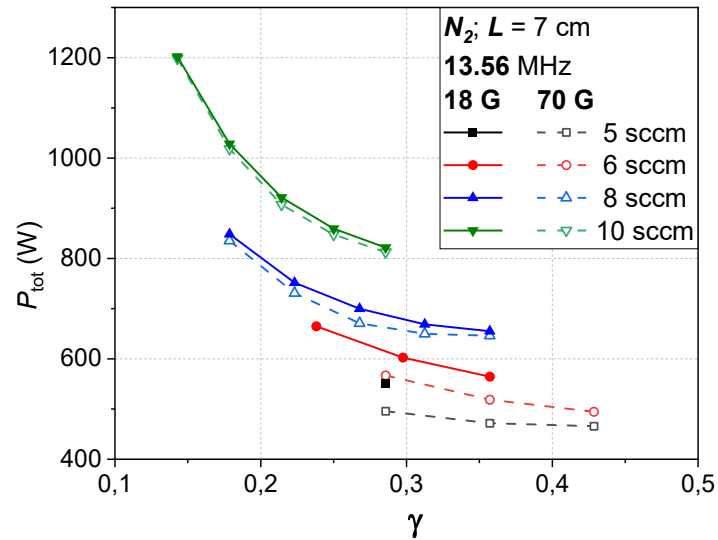


Рисунок 37. Зависимость полной мощности, необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы от коэффициента использования рабочего тела при расходах азота 5, 6, 8 и 10 sccm. $L = 7$ см. $f = 13.56$ МГц. $B = 18$ Гс (сплошные кривые), $B = 80$ Гс (пунктир).

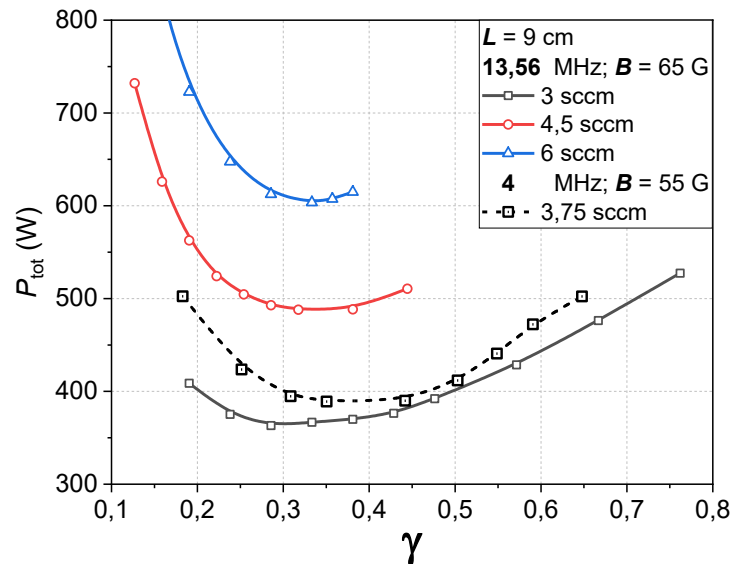


Рисунок 38. Зависимость полной мощности, необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы от КИРТ при различных расходах азота. $L = 9$ см. $f = 13.56$ МГц, $B = 65$ Гс (сплошные кривые); $f = 4$ МГц, $B = 55$ Гс (пунктир).

Анализ рисунков показывает, что значения P_{tot} немонотонно зависят от КИРТ, а именно, наблюдается минимум $P_{tot}(\gamma)$ при γ^* , лежащих в диапазоне $0.3 \div 0.4$. Немонотонность зависимости полной мощности, требуемой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы, можно объяснить следующим образом: при малых значениях КИРТ $\gamma < \gamma^*$ полные энергозатраты растут за счет необходимости ускорения ионов до высоких энергий (см рисунок 32), в области высоких значений КИРТ $\gamma > \gamma^*$ энергозатраты увеличиваются в связи с ростом мощности, требуемой для поддержания разряда с высокой степенью ионизации.

С ростом расхода газа полные энергозатраты при фиксированном коэффициенте использования рабочего тела возрастают, т.к. для достижения γ^* требуются более высокие значения ионного тока.

Наименьшие энергозатраты при условии для диапазона расхода газа (2.2.1) характерны для прототипа ВЧ ИД, оснащенного ГРК длиной 9 см при наличии внешнего магнитного поля. Значения полной мощности, полученные при работе на частотах 4 и 13.56 МГц близки друг к другу. Однако, только при использовании частоты 4 МГц область оптимальных КИРТ оказывается меньше значений коэффициентов использования рабочего тела, при которых наступает резкий рост энергозатрат на поддержание разряда.

4.3 Основные итоги

Эксперименты, представленные в настоящей Главе показали, что удельный импульс не менее 30000 м/с, необходимый для компенсации сопротивления остаточной атмосферы, может быть достигнут в экспериментах с прототипом ВЧ ИД с газоразрядной камерой длиной 9 см, при использовании внешнего магнитного поля с индукцией 50 – 80 Гс и расходах остаточных газов, поступающих в ВЧ ИД, 3 – 6 сссм при полных затратах мощности на генерацию пучка ионов не более 600 Вт.

Известно, что рабочая точка двигателя выбирается при таком расходе газа fl_{crit} , что при $fl < fl_{crit}$ начинают расти энергозатраты на поддержание выбранного тока ионов. Значения коэффициента использования рабочего тела $\gamma = 0.3 - 0.4$, необходимые для достижения удельного импульса 30000 м/с, удается получить только при значениях расхода, меньших fl_{crit} . Этот факт имеет негативные последствия. Средние энергии ионов существенно превышают значения V_{pl} , оцененные на основании измерений температуры электронов, и быстро растут с уменьшением расхода азота. Это негативно сказывается на ресурсе и характеристиках прототипа ВЧ ИД: быстрые ионы распыляют электроды ИОС, что сопровождается запылением диэлектрических стенок ГРК и ухудшением вложения ВЧ мощности в плазму.

Глава 5. Исследование особенностей работы прототипов ВЧ ИД на смесях атмосферных газов с инертными

Результаты, представленные в Главе 4 продемонстрировали наличие ряда негативных эффектов, которые могут препятствовать длительной работе ВЧ ИД при использовании исключительно атмосферных газов. Для того, чтобы минимизировать отмеченные недостатки, в настоящей Главе рассмотрена возможность использования смеси забортных и инертных газов, запасенных на борту КА, в качестве рабочего тела ВЧ ИД, предназначенного для работы на ультранизких околоземных орбитах.

5.1 Физические особенности ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления при работе на смесях атмосферных газов с инертными

В Главе 4 было показано, что при изменении индукции внешнего магнитного поля B , наложенного на индуктивный ВЧ разряд, горящий в газоразрядной камере ВЧ ИД длиной 9 см на частоте 13.56 МГц, наблюдается немонотонное изменение извлекаемого ионного тока i_{beam} . Было обнаружено существование двух локальных максимумов ионного тока i_{beam} : в диапазоне $B = 0 - 80$ Гс (см. рис. 20б). Первый максимум наблюдался в области 18 Гс, второй – в области 50 – 70 Гс. Появление локальных максимумов i_{beam} связано с увеличением доли мощности ВЧ генератора, поступающей в разряд, которое сопровождается ростом плотности плазмы. Эффект возникает в результате бесстолкновительного поглощения энергии волн, возбуждаемых в разряде при определенных, резонансных значениях магнитного поля. Положение резонансов определяется геометрическими размерами источника плазмы, рабочей частотой, концентрацией электронов, а также частотой столкновений. Добавка инертного газа к разряду в азоте и кислороде неизбежно приводит к изменению концентрации электронов и частоты столкновений, в связи с этим в разряде на смеси возможно смещение положения локальных максимумов ионного тока. Это может затруднить разработку магнитной системы двигателя, которая должна быть пригодна для работы, как исключительно на забортных газах, так и на их смеси с инертными.

Указанные соображения послужили основанием для изучения зависимостей $i_{beam}(B)$ при добавке аргона и криптона к разряду в азоте и кислороде. Результаты экспериментов показаны на рис. 39 – рис. 41.

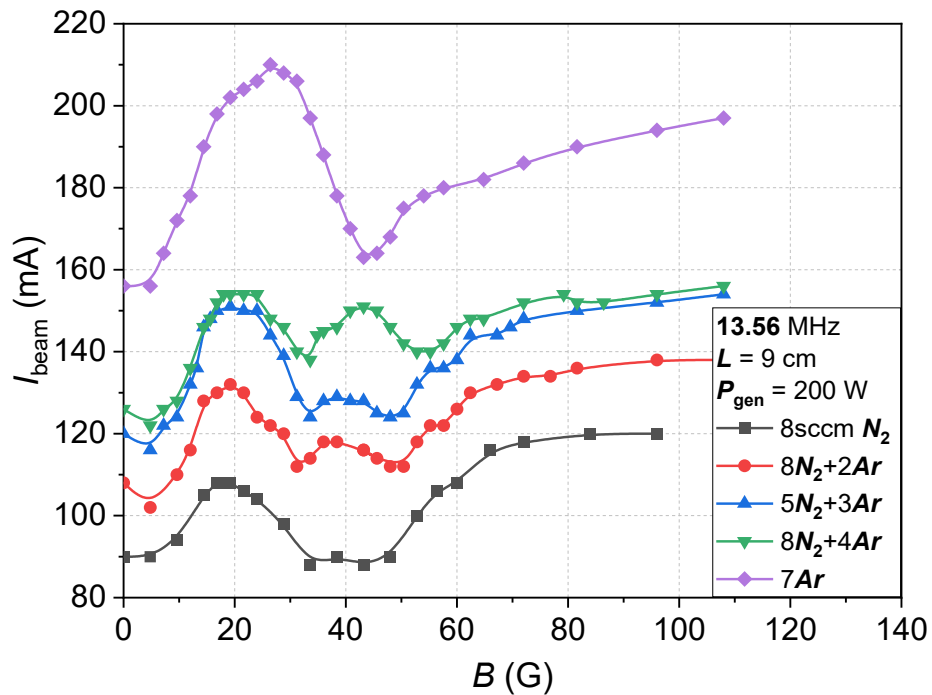


Рисунок 39. Зависимости ионного тока от магнитного поля в прототипе длиной $L = 9$ см для смесей газов с разным содержанием аргона, от чистого азота к чистому аргону. $f = 13,56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт.

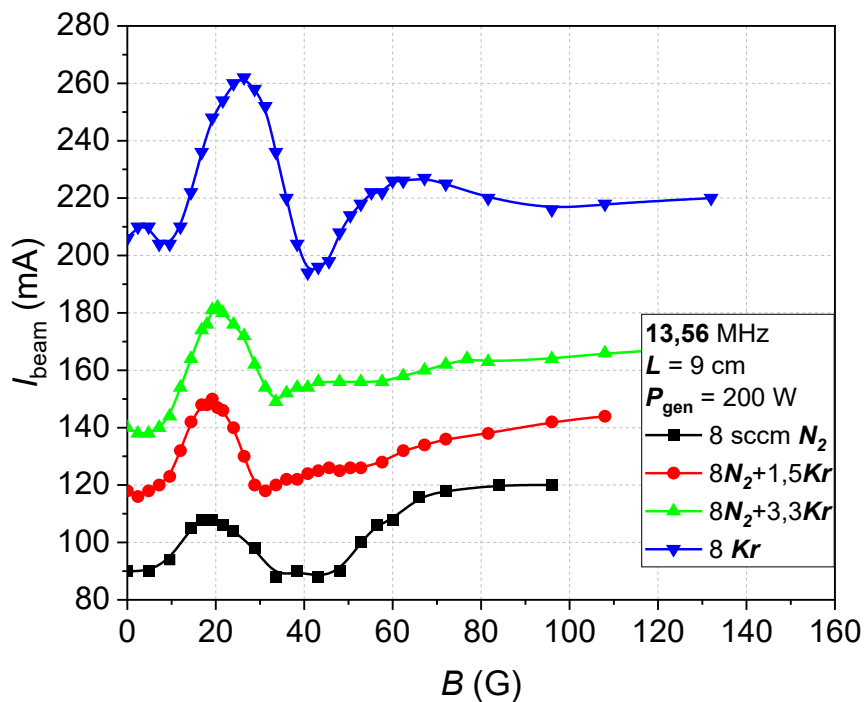


Рисунок 40. Зависимости ионного тока от магнитного поля в прототипе длиной $L = 9$ см для смесей газов с разным содержанием криптона, от чистого азота к чистому криптону. $f = 13,56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт.

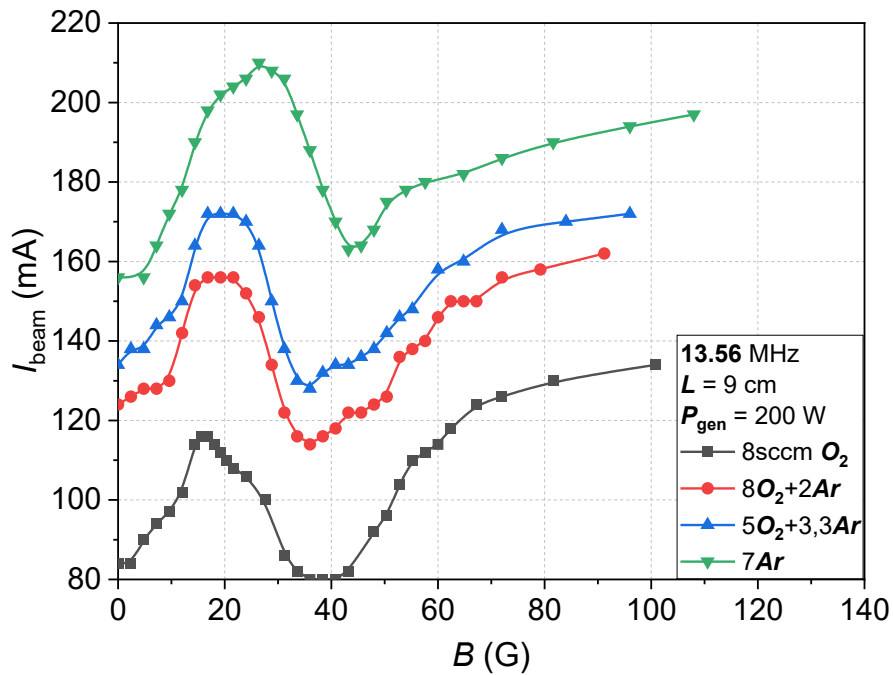


Рисунок 41. Зависимости ионного тока от магнитного поля в прототипе длиной $L = 9$ см для смесей газов с разным содержанием аргона, от чистого кислорода к чистому аргону. $f = 13,56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт.

Как и следовало ожидать, увеличение расхода инертных газов, поступающего в ГРК ВЧ ИД, приводит к росту абсолютных величин ионного при всех рассмотренных значениях магнитного поля. Положение локальных максимумов в области $B_I^* \sim 20$ Гс и $B_{II}^* \sim 50 - 80$ Гс остается практически неизменным, однако в случае смеси азота с аргонem (см рис.5.1) появляется третий локальный максимум i_{beam} в области $B \sim 40$ Гс, то есть при значениях магнитного поля, при которых в чистом азоте наблюдается минимум ионного тока. С увеличением доли аргона в смеси величина ионного тока в области третьего максимума растет, а его положение смещается в область больших B , так что в чистом аргоне третий максимум перекрывается с максимумом при $B_{II}^* \sim 50 - 80$ Гс.

Параллельно с измерением ионного тока была изучена зависимость эффективности поглощения ВЧ мощности $\eta_{RF} = \frac{P_{pl}}{P_{gen}}$ от магнитного поля. Результаты оценки η_{RF} показаны на рис. 42. Можно видеть, что в разряде в смесях газов также, как и в чистых атмосферных газах, положение локальных максимумов ионного тока коррелирует с положениями локальных максимумов η_{RF} . Необходимо отметить, что увеличение расхода инертного газа, поступающего

в разряд, сопровождается увеличением доли мощности ВЧ генератора, поглощенной плазмой.

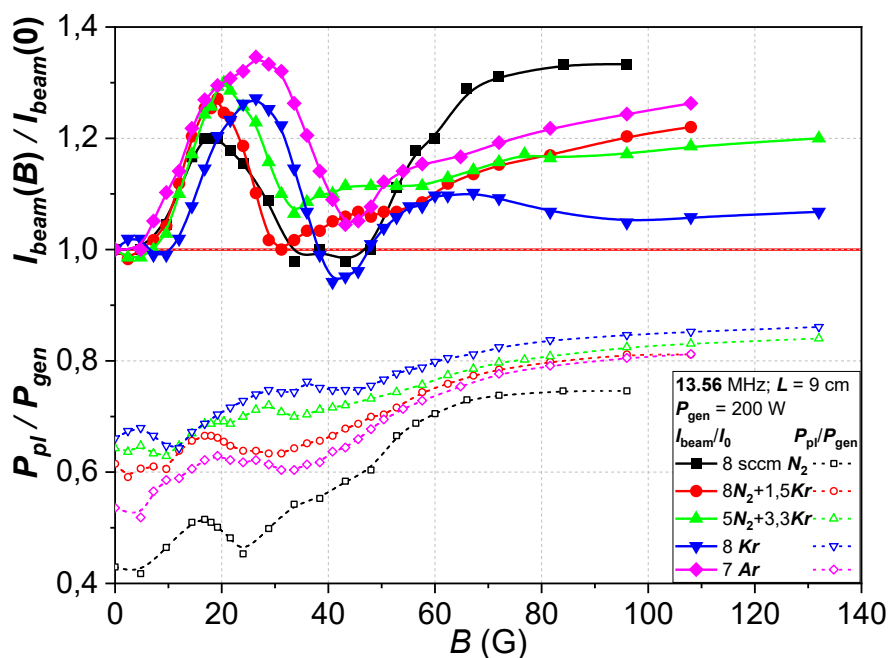


Рисунок 42. Нормированные зависимости ионного тока от магнитного поля $i_{beam}(B)/i_{beam}(0)$ и эффективность вложения ВЧ мощности в плазму $\frac{P_{pl}}{P_{gen}}(B)$ от магнитного поля для смеси азота с добавками криптона. Дополнительно на график добавлена зависимость $i_{beam}(B)$ чистого аргона.

Выполненные эксперименты убедительно показали, что добавка инертных газов к разряду в азоте и кислороде, во-первых, не привела к существенному изменению положения локальных максимумов ионного тока, а, во-вторых, позволила повысить значения ионного тока на $20 \div 35\%$ и тем самым снизить энергозатраты на поддержание разряда.

На рис. 43 представлены результаты по измерению мощности, требуемой для поддержания разряда, позволяющего получить ток заданной величины, от расхода кислорода при условии, что в ГРК источника плазмы поступает только кислород, а также смесь кислорода с аргоном. Расход аргона fl_{Ar} составлял 1.6 sccm. Как видно, в области больших расходов кислорода $fl_{O_2} > 20$ sccm затраты ВЧ мощности в двух рассмотренных случаях близки друг к другу. Это неудивительно, т.к. при условии, что $fl_{Ar} \ll fl_{O_2}$ концентрация атомов аргона мала по сравнению с концентрацией нейтральных компонент кислородной плазмы. При малых расходах кислорода $fl_{O_2} < 20$ sccm затраты мощности на генерацию

разряда при наличии аргона в разряде становятся существенно ниже, чем в чистом кислороде, причем разница в требуемых значениях мощности быстро возрастает с уменьшением fl_{O_2} . Это объясняется значительным вкладом ионизации атомов аргона в формирование плотности плазмы.

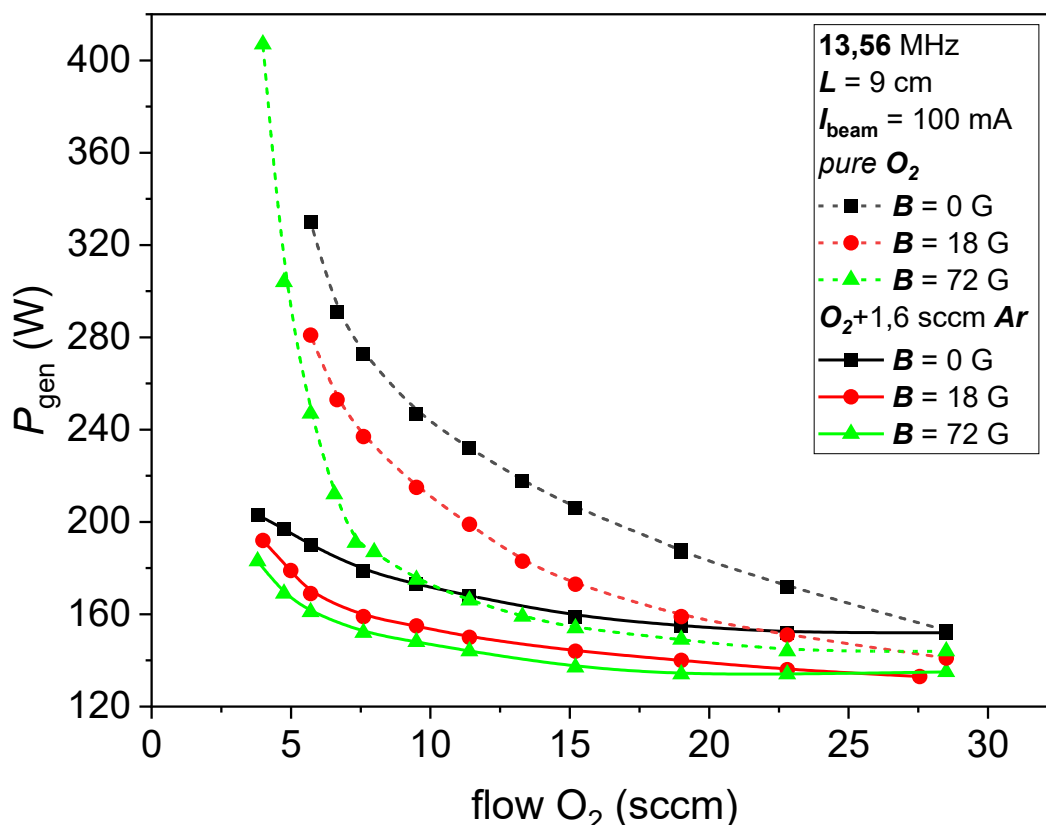


Рисунок 43. Зависимости мощности, требуемой для поддержания разряда, позволяющего получить ток заданной величины, от расхода кислорода. Пунктирные линии – чистый кислород, сплошные линии – кислород с добавкой аргона 1,6 sccm.

На рисунке рис. 44 показаны кривые $P_{gen}(fl_{N_2})$, полученные в разряде в чистом азоте, а также его смеси с аргоном или ксеноном. Вертикальной пунктирной линией отмечен расход азота (9 sccm), при котором достигнут КИРТ 0.4 при исследовании разряда в чистом азоте. Эксперименты показали, что добавка инертных газов к азоту существенно расширяет область существования разряда в сторону меньших fl_{N_2} . Кроме того, происходит значительное понижение энергозатрат на поддержание разряда в области $fl_{N_2} \sim 9$ sccm, причем характеристики разряда в смеси азота с аргоном незначительно уступают характеристикам разряда в смеси азота с ксеноном.

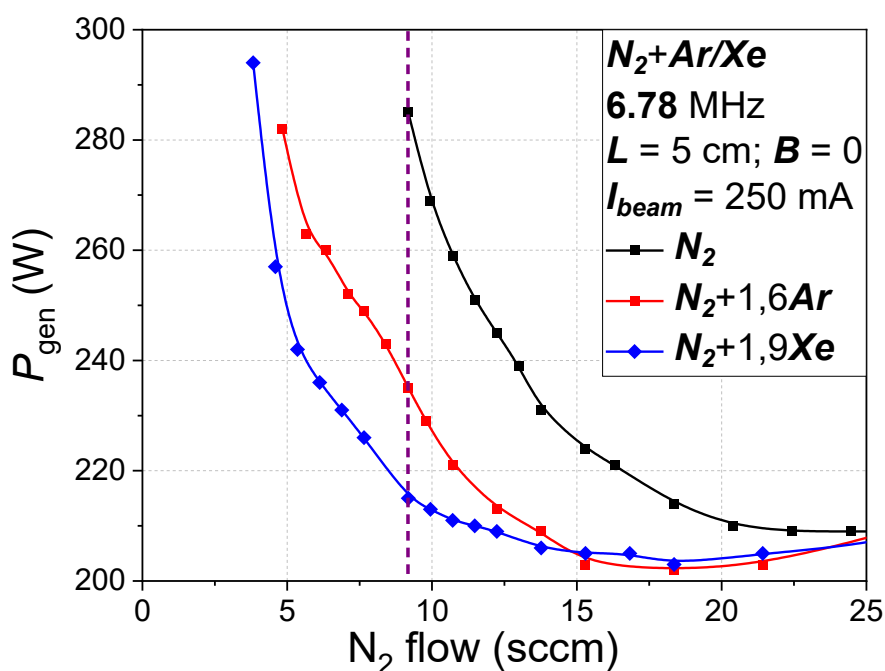


Рисунок 44. Зависимость потребляемой от генератора мощности, необходимой для извлечения из разряда ионного тока фиксированной величины 250 мА в зависимости от расхода Азота при фиксированных добавках различных инертных газов (Ar, Xe) в sccm. Длина камеры 5 см, рабочая частота 6,78 МГц.

Добавка аргона в разряд атмосферных газов существенно расширит диапазон потоков заборных атмосферных газов, в котором сможет работать ВЭРД, и *гарантирует надёжность* работы двигателя. При этом масса аргона существенно меньше массы ксенона, что приведет к уменьшению веса и стоимости рабочего тела, которое необходимо будет брать на борт космического аппарата для обеспечения стабильного полёта и возможности эффективного изменения орбиты КА.

В четвёртой главе изучалась зависимость функции распределения ионов по энергиям от рабочей частоты генератора. Было показано, что при уменьшении потока рабочего газа, поступающего в ГРК, аномально возрастает средняя энергия ионов на выходе из ИОС. Кроме того, при снижении круговой рабочей частоты ω_{gen} ниже ионной ленгмюровской ω_{Li} происходит существенное уширение ФРИЭ. На рис. 45 и рис. 46 показаны ФРИЭ, полученные в смеси азота с аргоном. Измерения проводились в прототипе с длиной ГРК 9 см, на рабочей частоте 13,56 МГц, круговая частота которой больше ионной ленгмюровской частоты.

Мощность генератора составляла 200 Вт, суммарный расход рабочих газов 8 ссст. Все три электрода ионно-оптической системы при проведении данной серии измерений были заземлены. В результатах, представленных на рисунках, ФРИЭ нормированы на площадь под кривой.

Средняя энергия ионов азота в разряде в чистом азоте почти в 2 раза больше средней энергии ионов аргона в разряде в чистом аргоне при тех же внешних условиях разряда. В то же время полуширина ФРИЭ в азоте и аргоне на частоте 13,56 МГц без магнитного поля совпадает в пределах погрешности эксперимента и составляет для обоих газов примерно 130 – 140 эВ. Закономерно, что на смеси азота с аргонном получился некий промежуточный результат.

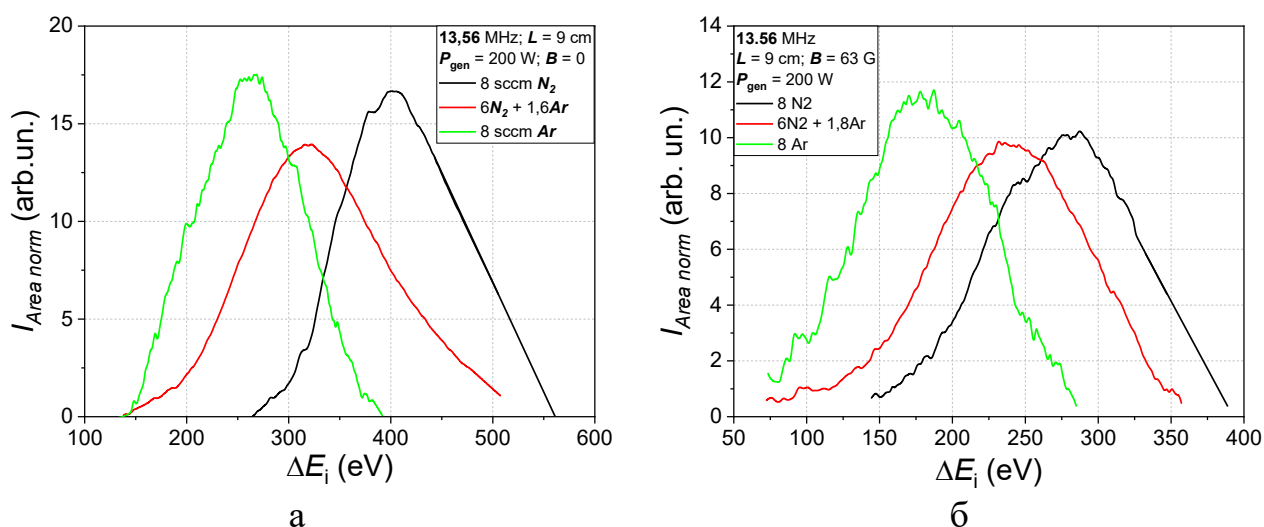


Рисунок 45. Сравнение ФРИЭ для разряда азота, аргона и их смеси. Функции распределения нормированы на площадь под кривой. $L = 9$ см, $f = 13.56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт, $fl = 8$ ссст.
а) $B = 0$, б) $B = 63$ Гс.

Применение к разряду внешнего магнитного поля величиной 63 Гс, относящегося к области B_{II}^* , приводит к сужению ФРИЭ примерно на 20 – 30 эВ, а значение средней энергии ионов в вылетающем пучке для обоих газов снижается более чем на 30 – 40%. Это наглядно видно, если поместить ФРИЭ азота и аргона на один график (см. рис. 46, нормировка ФРИЭ на площадь сделана только для каждого значения МП по отдельности).

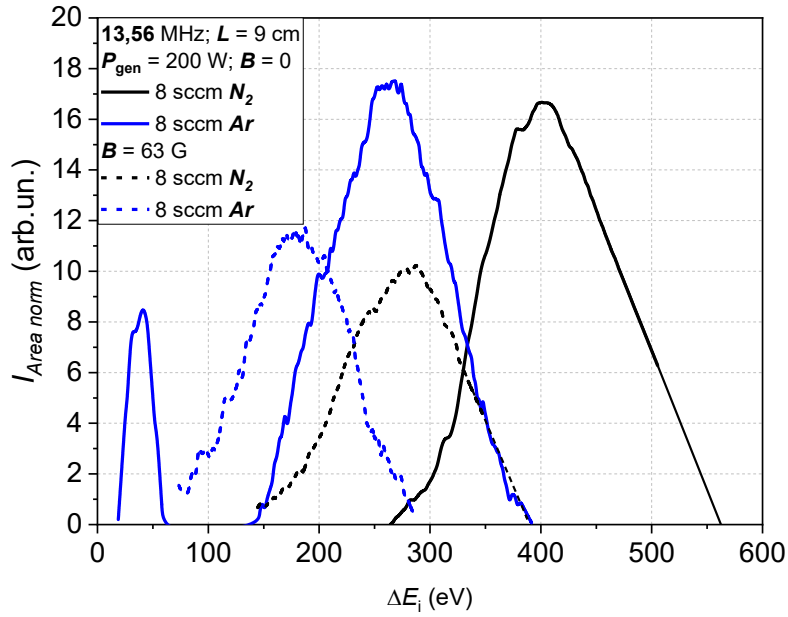


Рисунок 46. Сравнение ФРИЭ для разряда азота и аргона с магнитным полем и без.
 $L = 9$ см, $f = 13.56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт, $fl = 8$ sccm.

Проанализировав результаты, однозначно можно судить, что добавка в разряд инертного газа существенно снизит нагрузку и на эмиссионный электрод ИОС, снизит темпы его распыления и увеличит рабочий ресурс двигателя.

5.2 Влияние добавки инертного газа на концепцию ВЭРД.

Теперь рассмотрим влияние добавки инертного газа в ГРК ВЧ ИД на ключевую характеристику ВЭРД – удельный импульс двигателя I_{sp} . Для этого найдём выражение для тяги ВЭРД с учётом добавки инертного газа в поток заборных газов в ГРК и получим обновлённое выражение баланса аэродинамического сопротивления и тяги двигателя.

Как и в случае с ВЭРД, работающим только на заборных атмосферных газах, в воздухозаборник поступает тот же массовый поток заборных атмосферных газов $\mu_{in} = M_z v_{SC} n_z A_{in}$, а на вход ВЧ ИД – $\mu_{IT}^z = \eta_c \mu_{in}$. Только теперь в ионный двигатель дополнительно подаётся массовый поток инертного газа μ_{IT}^{ig} из бака на борту КА. Величины, относящиеся к заборным газам, будем отмечать индексом z , а относящиеся к инертным – индексом ig .

При определении выражения для тяги ВЭРД, без ограничения общности можем считать, что массовый поток инертного газа в ГРК ВЧ ИД составляет определённую долю k от массового потока атмосферных газов:

$$\mu_{IT}^{ig} = k \cdot \mu_{IT}^z, \quad (5.2.1)$$

Аналогично определим соотношение χ между числом частиц атмосферных и инертных газов, поступающих в ГРК ИД в единицу времени, которое пригодится в дальнейших выкладках:

$$\chi = \frac{fl_{ig}}{fl_z} = k \cdot \frac{M_z}{M_{ig}}, \quad (5.2.1a)$$

где $fl_z = \frac{\eta_c \mu_{in}}{M_z}$ – числовой поток заборных газов в ВЧ ИД, fl_{ig} – числовой поток инертного газа в ИД.

Несложно показать, что ионный ток каждой компоненты пропорционален массовому потоку газа, поступающего в ГРК. Получим, что

$$i_{beam_z} = e \gamma_z \cdot \frac{\eta_c \mu_{in}}{M_z}, \quad (5.2.2a)$$

$$i_{beam_{ig}} = e \gamma_{ig} \cdot k \frac{\eta_c \mu_{in}}{M_{ig}}, \quad (5.2.2б)$$

где e – заряд электрона, M_z – средняя масса нейтральных частиц заборных газов во входящем в ВЧ ИД потоке, M_{ig} – масса инертных газов, i_{beam_z} , $i_{beam_{ig}}$ – ток ионов заборных и инертных газов, $\gamma_z = \frac{i_{beam_z}}{e \cdot fl_z}$, $\gamma_{ig} = \frac{i_{beam_{ig}}}{e \cdot fl_{ig}}$ – коэффициенты использования заборных и инертных газов.

Так как γ_z и γ_{ig} определяются едиными параметрами разряда, то *можем считать*, что:

$$\gamma_{ig} = k_1 \gamma_z, \quad (5.2.3)$$

где коэффициент k_1 отражает существование зависимости тока ионов от сечений элементарных процессов, происходящих в разряде с участием различных компонент, в частности сечений ионизации. Тогда для полного тока ионов имеем:

$$\begin{aligned} i_{beam} &= e \gamma_z \frac{\eta_c \mu_{in}}{M_z} + e \gamma_{ig} \frac{k \eta_c \mu_{in}}{M_{ig}} = e \gamma_z \frac{\eta_c \mu_{in}}{M_z} \left(1 + \frac{k k_1 M_z}{M_{ig}} \right) = \\ &= e \gamma_z fl_z (1 + k_1 \chi) = e \gamma' fl_z, \end{aligned} \quad (5.2.4)$$

где $\gamma' = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl_z}$ – измеряемая в эксперименте величина. Назовём величину γ' гибридным коэффициентом использования рабочего тела, **ГКИРТ**:

$$\gamma' = \gamma_z(1 + k_1\chi) = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl_z} \quad (5.2.5)$$

Тяга двигателя создается ускоренными ионами заборных газов, а также ионами инертных газов:

$$\begin{aligned} T &= \sum_j \frac{i_{beam_j}}{e} M_j v_{exj} = \frac{i_{beam_z}}{e} M_z^+ \sqrt{\frac{2eU}{M_z^+}} + \frac{i_{beam_{ig}}}{e} M_{ig} \sqrt{\frac{2eU}{M_{ig}}} = \\ &= \gamma_z fl_z \sqrt{2UeM_z^+} + \gamma_{ig} fl_{ig} \sqrt{2UeM_{ig}^+} = \gamma_z fl_z \sqrt{2Ue} \left(\sqrt{M_z^+} + \chi k_1 \sqrt{M_{ig}} \right) = \\ &= \frac{\gamma_z \eta_c \mu_{in} \sqrt{2M_z^+ Ue}}{M_z} \left(1 + k_1 \chi \sqrt{\frac{M_{ig}}{M_z^+}} \right) = \gamma' \frac{\eta_c \mu_{in} \sqrt{2M_z^+ Ue}}{M_z} \cdot \frac{1 + k_1 \chi \left(\frac{M_{ig}}{M_z^+} \right)^{0.5}}{1 + k_1 \chi} \end{aligned} \quad (5.2.6)$$

где M_z^+ – средняя масса ионов заборных газов в исходящем из ВЧ ИД потоке ионов. В данном выражении влияние добавки инертного газа на увеличение тяги сосредоточено в дроби, которую обозначим как коэффициент α_z^{ig} , величина которого растёт с увеличением массы инертного газа, его расхода и коэффициента k_1 :

$$\alpha_z^{ig} = \frac{1 + k_1 \chi \left(\frac{M_{ig}}{M_z^+} \right)^{0.5}}{1 + k_1 \chi} > 1 \quad (5.2.7)$$

Сопротивление остаточной атмосферы остаётся неизменным и определяется только нейтральными частицами заборных газов:

$$D = \mu_{in} v_{sc} \frac{C_{xa} A_{ref}}{2 A_{in}}. \quad (5.2.8)$$

Напомним, что без добавки инертных газов условие компенсации сопротивления выражалось через удельный импульс двигателя I_{sp} , который должен превышать пороговое значение I_{sp}^* :

$$I_{sp} = \frac{T}{\eta_c \mu_{in}} = \gamma \frac{\sqrt{2M_z^+ Ue}}{M_z} \geq \frac{v_{sc}}{\eta_c} \frac{C_{xa} A_{ref}}{2 A_{in}} = I_{sp}^* \quad (5.2.9)$$

В случае использования добавки инертного газа, поделив сопротивление и тягу на массовый поток поступающих в ВЧ ИД атмосферных газов $\eta_c \mu_{in}$, можно получить аналогичное выражению (5.2.9) условие компенсации аэродинамического сопротивления при полёте ВЭРД на УНОО:

$$I'_{sp} = \frac{T}{\eta_c \mu_{in}} = \gamma' \frac{\sqrt{2M_z^+ Ue}}{M_z} \alpha_z^{ig} \geq \frac{v_{sc}}{\eta_c} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}} = I_{sp}^* \quad (5.2.10)$$

Величина I'_{sp} уже не является удельным импульсом двигателя, но удобна для экспериментальной оценки характеристик. Назовём величину I'_{sp} «гибридным удельным импульсом ВЭРД», который нужно сравнивать с тем же пороговым значением удельного импульса двигателя I_{sp}^* , определённым в главе 4, как и при работе ВЭРД исключительно на забортных газах.

Сравнивая выражения I_{sp} и I'_{sp} , становится очевидно, что при наличии добавки инертного газа условия получения порогового удельного импульса I_{sp}^* облегчаются, так как в терминах организации разряда в ГРК коэффициенты $\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl_z}$ и $\gamma' = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl_z}$ идентичны, а коэффициент $\alpha_z^{ig} > 1$.

5.3 Характеристики прототипов воздушных ВЧ ИД, основанных на индуктивных источниках плазмы, работающих на смеси атмосферных газов с инертными

Для оценки полной мощности ВЭРД P_{tot} , необходимой для поддержания полёта на УНОО, нужно определить ускоряющее напряжение на эмиссионном электроде ИОС U'_{sp} , требуемое для удовлетворения условию баланса тяги и сопротивления, в зависимости от гибридного коэффициента использования рабочего тела $\gamma' = \frac{i_{beam}}{e \cdot fl_z}$. Это возможно сделать на основе полученной в предыдущем параграфе формулы (2.1.10):

$$U'_{sp} = \frac{M_z^{*2}}{2eM_z^+} \left(\frac{I_{sp}^*}{\alpha_z^{ig} \gamma'} \right)^2 \quad (5.3.1)$$

Как видно, требуемое к ускоряющее напряжение на ИОС обратно пропорционально квадрату коэффициента α_z^{ig} . На рис. 47 Наглядно показано снижение требуемого ускоряющего напряжения при увеличении α_z^{ig} .

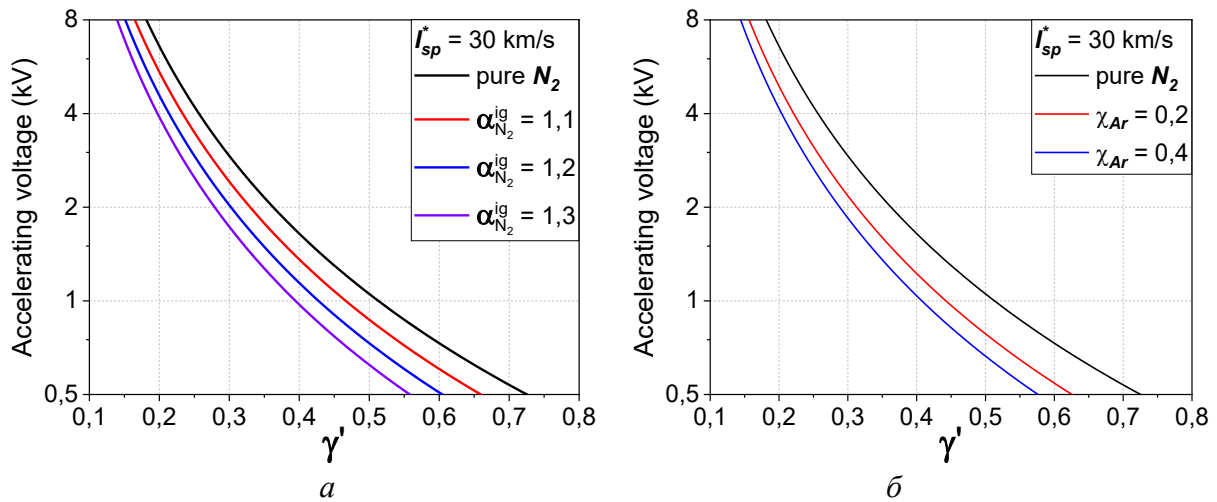


Рисунок 47. Зависимость требуемого ускоряющего напряжения U'_{sp} от ГКИРТ γ' .

- а) при увеличении $\alpha_{N_2}^{ig}$ за счёт доли инертного газа в разряде с азотом;
 б) рассчитанные при добавке доли именно аргона χ_{Ar} в разряд.

Для проведения точных оценок α_z^{ig} , U'_{sp} и P_{tot} необходимо определить коэффициент k_1 . Это можно сделать на основе экспериментальных данных, представленных на рис. 39. Пренебрегая зависимостью температуры электронов от состава смеси, в качестве оценки k_1 можно взять отношение ионных токов в чистом аргоне к ионному току в чистом азоте при соответствующем магнитном поле. При магнитном поле, соответствующем второму максимуму B_{II}^* коэффициент $k_1 \approx 1.5$, что можно считать оценкой сверху. Оценкой снизу будет значение $k_1 = 1$. U'_{sp} вычислялось в то же предположении, что молекулярные газы в смеси полностью диссоциируют и дают лишь атомарные ионы на выходе.

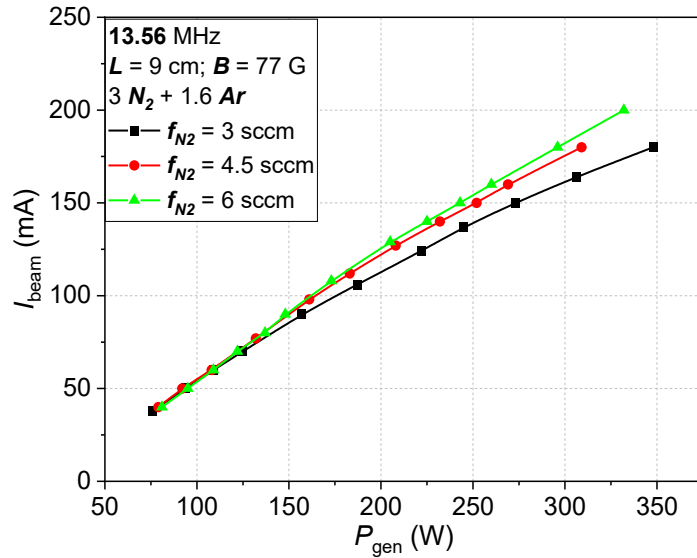


Рисунок 48. Зависимость ионного тока от мощности в смесях азота с аргоном.

Пользуясь экспериментально измеренными зависимостями ионного тока от мощности при разных фиксированных расходах азота $I_{beam}(P_{gen})|_{fl=const}$ с добавкой аргона (рис. 48) и тем же алгоритмом вычисления полных энергозатрат на работу двигателя, что и в пункте 4.2, можно получить зависимости $P_{tot}(\gamma')$. Расчёты мощности с добавкой аргона проведены для двух значений коэффициента $k_1 = 1.5$ и $k_1 = 1$ (рис. 49).

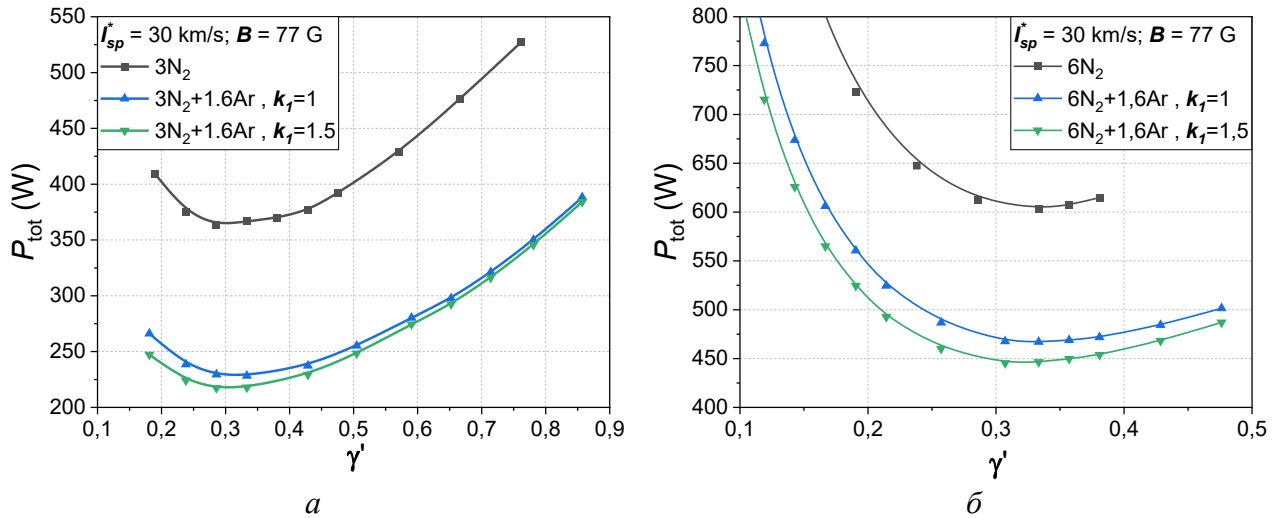


Рисунок 49. Оценки полной мощности P_{tot} , потребляемой прототипом ВЧ ИД при работе на чистом азоте и с добавкой 1,6 sccm аргона. $f = 13,56$ МГц, $L = 9$ см, $B = 77$ Гс. Чёрная кривая – чистый азот, для синей ускоряющее напряжение оценивалось при $k_1 = 1$, для зелёной – при $k_1 = 1,5$. а) $fl_{N_2} = 3$ sccm, б) $fl_{N_2} = 6$ sccm.

Как видно из рисунка, точное значение коэффициента k_1 слабо влияет на полную потребляемую двигателем мощность, однако он всё же влияет

на значение коэффициента α_z^{ig} и итоговое ускоряющее напряжение U' . Снижение U' может увеличить срок службы ИОС двигателя.

Полное сравнение потребляемой мощности ВЭРД на основе ВЧ ИД при разных расходах атмосферных газов с фиксированной добавкой аргона в разряд и без неё приведено на рис. 50. Пунктиром обозначены данные из главы 4 для чистого азота, сплошными линиями — зависимости, вычисленные с учётом дополнительного вклада ионов аргона в гибридный удельный импульс I'_{sp} . Расчёты проведены с коэффициентом $k_1 = 1,5$.

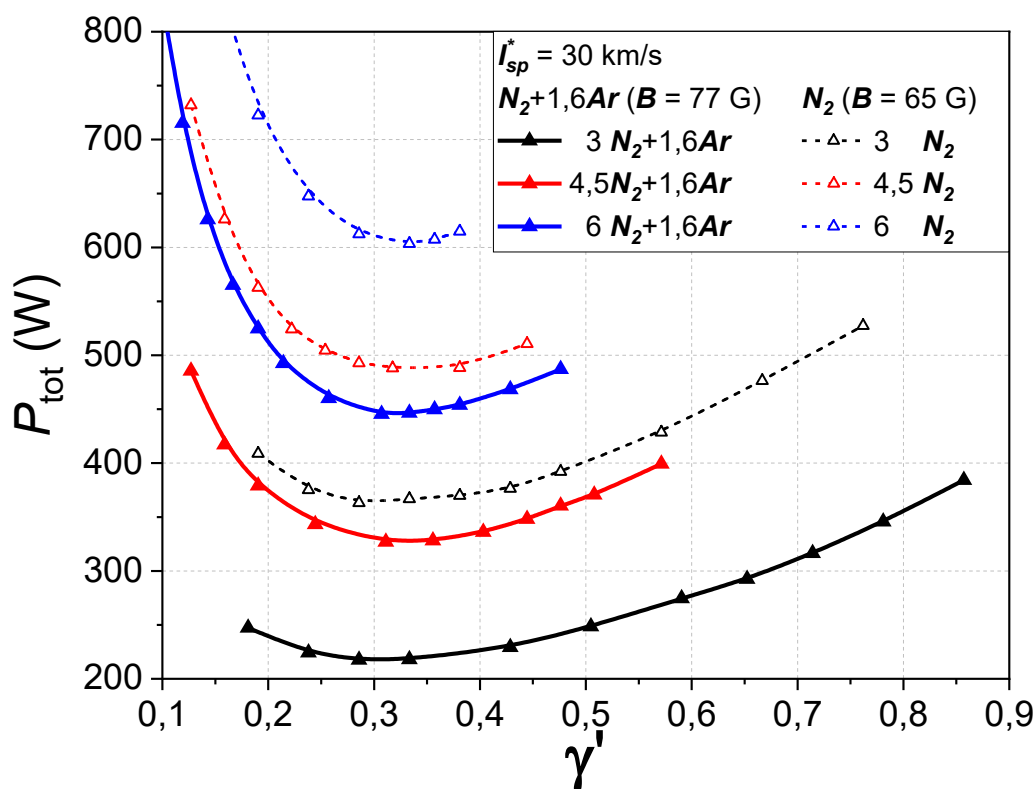


Рисунок 50. Зависимость полной мощности P_{tot} , необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы, от ГКИРТ γ' при различных расходах чистого азота (пунктирные кривые) и с добавкой аргона $fl_{Ar} = 1,6$ ссст (сплошные кривые). $L = 9$ см, $f = 13,56$ МГц, $B = B_{II}^*$. Для оценки в смеси использовался $k_1 = 1,5$.

Видно, что при использовании малой добавки аргона 1,6 ссст общие энергозатраты уменьшаются примерно на 150 Вт во всём рассмотренном диапазоне расходов азота. Это соответствует уменьшению энергозатрат от 25 до 40 % в зависимости от рабочей точки по расходу азота.

Полученный результат позволяет рассмотреть возможность повышения гибридного удельного импульса двигателя до 40000 м/с и более. Повышение

удельного импульса необходимо для использования космических аппаратов неоптимальной формы (то есть с $C_{xa} > C_{xa_{min}} = 2,2$) или изменения орбиты.

На рис. 51 приведены расчёты полной мощности, необходимой для получения гибридного удельного импульса I'_{sp} в диапазоне 30 – 50 км/с с добавкой аргона, и проведено сравнение с энергозатратами на создание удельного импульса $I_{sp} = 30$ км/с на чистом азоте.

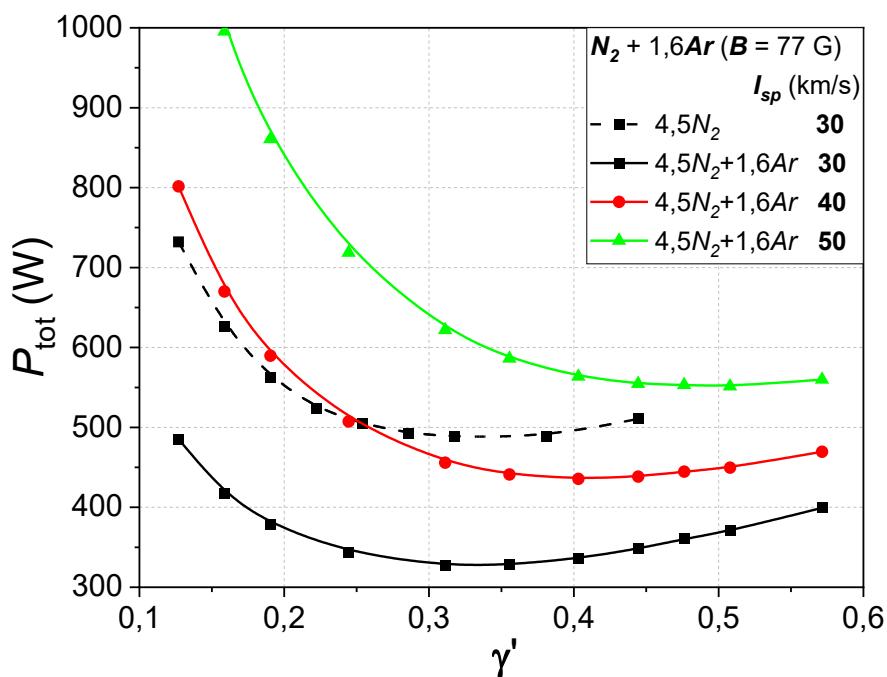


Рисунок 51. Расчёты полной мощности, необходимой для получения гибридного удельного импульса в диапазоне 30 – 50 км/с с добавкой аргона $fl_{Ar} = 1,6$ ссст (сплошные кривые), либо удельного импульса 30 км/с в чистом азоте (пунктирная кривая). Расход азота $fl_{N_2} = 4,5$ ссст. $f = 13,56$ МГц, $L = 9$ см, $B = 77$ Гс.

Как видно из графика, что за одну и ту же мощность 500 Вт, без использования инертного газа можно получить удельный импульс 30 км/с, а с добавкой аргона $\chi_{Ar} = 0,35$, можно получить в полтора раза больший гибридный удельный импульс $I'_{sp} \approx 45$ км/с. Возможность адаптировать режимы работы двигателя для временного увеличения достигаемого удельного импульса может существенно расширить область применения КА, оснащённых ВЭРД.

Анализируя рис. 50 и рис. 51, можно заметить, что ни добавка аргона, ни увеличение расхода азота практически не влияют на смещение минимума P_{tot} по γ или γ' , но при увеличении удельного импульса минимум зависимости $P_{tot}(\gamma')$ явно смещается в сторону больших КИРТ.

5.4 Основные выводы.

1. При работе на смесях газов положение локальных максимумов в области $B_I^* \sim 20$ Гс и $B_{II}^* \sim 50 - 80$ Гс остается практически неизменным, что позволяет использовать магнитное поле для улучшения параметров разряда смесей газов так же, как и в случае с чистыми газами. Снижение энергозатрат на поддержание разряда пропорционально доле инертного газа в разряде.
2. Добавка инертного газа позволяет существенно расширить рабочий диапазон ВЧ ИД по расходу атмосферных газов, а также позволяет снизить величины расхода атмосферных газов fl_{crit} , при которых начинается резкий рост энергозатрат.
3. Малая добавка инертного газа позволяет работать на «пологой ветви» цены иона при $fl_z > fl_{crit}$, что снижает среднюю энергию ионов на вылете из приэлектродного слоя. Применение магнитного поля $\sim B_{II}^*$ также снижает среднюю энергию ионов, примерно на 30%, что подтверждается измерениями ФРИЭ в смеси азота с аргоном. Оба эти факта увеличивают рабочий ресурс ВЧ ИД, снижая темпы распыления электродов ионно-оптической системы и запыления стенок ГРК.
4. Было рассмотрено влияние добавки инертного газа на концепцию ВЭРД, и условие поддержания полёта на ультранизких орбитах при использовании смеси забортных газов с инертными (гибридного рабочего тела) было выражено в терминах «гибридного» удельного импульса I'_{sp} и гибридного коэффициента использования рабочего тела γ' . Данный подход позволяет не только определять важнейшие характеристики ВЭРД на основе экспериментальных данных (ускоряющее напряжение на электродах ИОС U' , полные энергозатраты на работу двигателя P_{tot}), но и наглядно сравнивать их с режимом работы ВЭРД исключительно на забортных газах остаточной атмосферы.
5. На основе экспериментальных данных было показано снижение полной потребляемой двигателем мощности P_{tot} на ~ 150 Вт во всём рабочем диапазоне ВЭРД при добавке 1,6 ссст аргона (1,5 кг/год) в разряд забортных газов.

Снижение требуемого ускоряющего напряжения при данном расходе аргона составляет 30-40%.

6. Использование добавки аргона позволяет добиваться значительно больших значений удельного импульса при равных энергозатратах, что открывает широкие возможности для регулирования параметров орбиты и снижает требования к форме и аэродинамическим характеристикам космических аппаратов, предназначенных для полётов на ультранизких орбитах.

Глава 6. Глобальная модель ВЧ индуктивных источников плазмы низкого давления, предназначенных для получения электрореактивной тяги

6.1 Формулировка модели

Численное моделирование влияния внешних параметров (геометрических размеров прототипа ВЧ ИД, прозрачности электродов ИОС, величины мощности ВЧ генератора P_{gen} , расхода fl и типа газов, поступающих в ГРК) на характеристики источников плазмы, предназначенных для получения электрореактивной плазмы, осуществлялось с помощью численной глобальной (0-мерной) модели разряда. Она позволяет рассчитать концентрацию основных компонент плазмы, температуру электронов, ионный ток, тягу и удельный импульс. Модель основана на следующих упрощающих предположениях:

- функция распределения электронов по энергиям является максвелловской;
- реакции между частицами и взаимодействие со стенками ГРК не приводят к изменению полной массы частиц;
- концентрация нейтралов постоянна во всем объеме ГРК.

В качестве основных компонент плазмы рассматривались атомарный кислород, молекулы азота в основном состоянии, молекулярный ион азота, атом азота и его ион. Дополнительно были выполнены расчеты для смесей атмосферных газов с аргоном и ксеноном.

Столкновения тяжёлых частиц между собой, нагрев газа, а также кинетика процессов, происходящих с участием вращательных и колебательных мод молекул не рассматривались, так как давление в ГРК не превышает 1 мТор.

Значения концентрации основных компонент плазмы находились из системы дифференциальных уравнений, имевших вид:

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{\dot{N}_i}{V} + \sum_j G_{ji} - \sum_j L_{ij} + \left(\sum_j W_{ji}^+ - \sum_j W_{ij}^- \right) \frac{S_i}{V}, \quad (6.1.1)$$

где n_i – концентрация i -ой компоненты плазмы, $\dot{N}_i$ – поток частиц, поступающих в ГРК из внешнего источника, G_{ji} и L_{ij} – число элементарных процессов в единицу

времени, приводящих к рождению и потере частиц с индексом i в объеме ГРК; W_{ji}^+ и W_{ij}^- – число элементарных процессов в единицу времени, приводящих к рождению и потере частиц с индексом i на стенках ГРК и ИОС, V – объем ГРК, S_i – поверхность, куда выпадают частицы сорта i .

Предполагалось, что в объеме разряда происходит ионизация атомов инертного газа и атомов кислорода, а трехчастичной рекомбинацией их ионов можно пренебречь. При моделировании разряда в азоте рассматривались реакции ионизации атомов и молекул, диссоциация молекул и молекулярных ионов, диссоциативная ионизация и процессы рекомбинации. Основные реакции, идущие в объеме ГРК, скорости реакций и ссылки на источники сведены в таблицу 6.

Скорости элементарных процессов были заимствованы из литературы или рассчитаны на основании сечений, известных из работ [108-114] по формуле:

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{2m}{M}} \int \sigma_{ij}(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (6.1.2)$$

где $\sigma_{ij}(\varepsilon)$ – сечение процесса, при котором происходит образование частицы j при столкновении электрона с частицей i , $f(\varepsilon)$ – функция распределения электронов по энергиям.

Таблица 6. Реакции, идущие в объеме ГРК

Номер	Реакция	Данные о скорости реакции	ссылка
1	$e + O \rightarrow 2e + O^+$	Кривая 1 на рис. 52	[108]
2	$e + N_2 \rightarrow e + N + N$	Кривая 2 на рис. 52	[109]
3	$e + N_2 \rightarrow 2e + N + N^+$	Кривая 3 на рис. 52	[109]
4	$e + N_2^+ \rightarrow 2e + N^+ + N^+$	Кривая 4 на рис. 52	[110]
5	$e + N_2 \rightarrow 2e + N_2^+$	Кривая 5 на рис. 52	[109]
6	$e + N_2^+ \rightarrow 2N$	Кривая 6 на рис. 52	[110]
7	$e + N \rightarrow 2e + N^+$	Кривая 7 на рис. 52	[111]
8	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^+$	Кривая 8 на рис. 52	[112]
9	$e + Xe \rightarrow 2e + Xe^+$	Кривая 9 на рис. 52	[113]

10	$e + e + N^+ \rightarrow e + N$	$1.96 \cdot 10^{-39} (T_e/10^4)^{-6.04}$	[114]
----	---------------------------------	--	-------

Рассчитанные скорости процессов представлены на рис. 52.

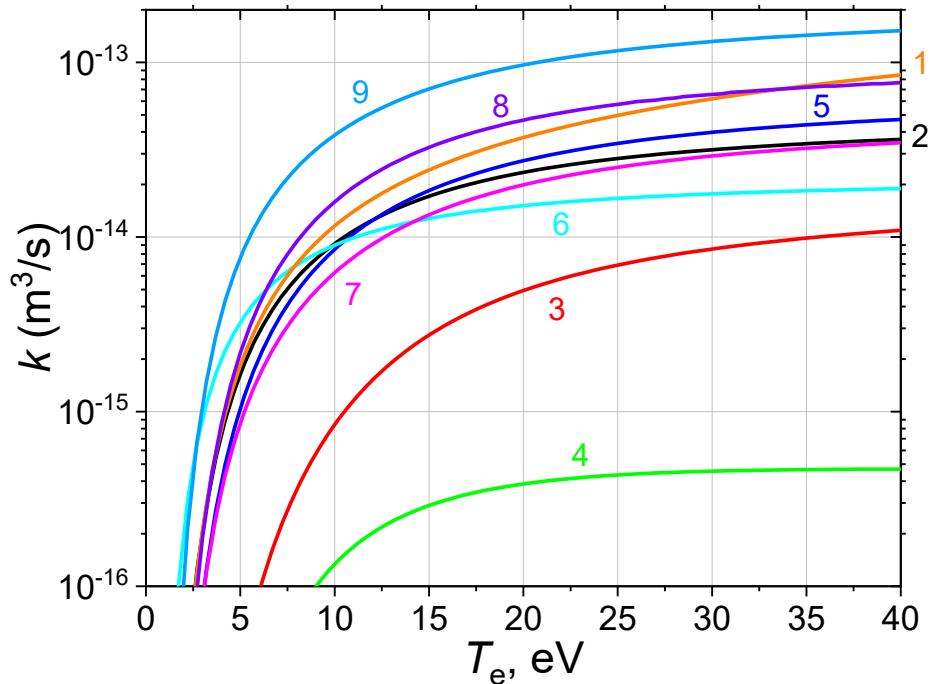


Рисунок 52. Зависимость скоростей элементарных процессов k от температуры электронов T_e . Номера рядом с кривыми в легенде соответствуют номерам реакций в Таблице 4.

При написании уравнений баланса (6.1.1) для конкретных компонент плазмы необходимо учесть, что на стенках ГРК происходят реакции, перечисленные в таблице 7. Кроме того, часть нейтральных частиц и ионов покидают ГРК через отверстия ИОС.

При описании скорости ухода заряженных частиц на стенки учитывалась зависимость концентрации заряженных частиц от координаты, при этом число ионов i , поступающих на стенки ГРК и выходящих через отверстия ИОС, вычислялось согласно выражениям [115-118]:

$$k_{i,wall} = n_i^+ u_{Bi} [h_L \pi R^2 (2 - \beta) + h_R 2\pi RL] \quad (6.1.3)$$

$$k_{i,ИОС} = n_i^+ u_{Bi} h_L \pi R^2 \beta \quad (6.1.4)$$

где u_B – скорость Бома, R и L – радиус и длина ГРК, β – прозрачность ИОС для ионов. В свою очередь значения коэффициентов h_L и h_R , используемых для учёта неоднородности плазмы по координатам ГРК, задаются формулами, которые при рассматриваемых низких давлениях имеют вид [115-117]:

$$h_L \simeq 0.86 \left[3 + \frac{L}{2\lambda_i} \right]^{-1/2} \quad (6.1.5)$$

$$h_R \simeq 0.80 \left[4 + \frac{R}{\lambda_i} \right]^{-1/2} \quad (6.1.6)$$

где λ_i – длина свободного пробега ионов. В соответствии с рекомендацией [115] при расчетах λ_i использовалось значение сечения столкновения ионов с нейтралами $100 \text{ \AA}^2$.

Таблица 7. Реакции, идущие на стенках ГРК.

Номер	Реакция	Множитель, описывающих уход ионов на стенки, с^{-1}	ссылка
1	$\text{N} + \text{wall} \rightarrow \frac{1}{2}\text{N}_2$	$\frac{1}{4}\zeta v_N [\pi R^2 h_L (2 - \beta) + 2\pi R L h_R]$ $\zeta = 0.007$	[118]
2	$\text{N}_2^+ + \text{wall} \rightarrow \text{N}_2$	$k_{i,\text{wall}} = \zeta n_i^+ u_{Bi} [\pi R^2 h_L (2 - \beta) + 2\pi R L h_R]$ $k_{i,\text{иос}} = \zeta n_i^+ u_{Bi} \pi R^2 h_L \beta$ $\zeta = 1$	[116, 117]
3	$\text{N}^+ + \text{wall} \rightarrow \text{N}$	$k_{i,\text{wall}} = \zeta n_i^+ u_{Bi} [\pi R^2 h_L (2 - \beta) + 2\pi R L h_R]$ $k_{i,\text{иос}} = n_i^+ u_{Bi} \pi R^2 h_L \beta$ $\zeta = 1$	[116, 117]
4	$\text{O}^+ + \text{wall} \rightarrow \text{O}$	$k_{i,\text{wall}} = n_i^+ u_{Bi} [\pi R^2 h_L (2 - \beta) + 2\pi R L h_R]$ $k_{i,\text{иос}} = n_i^+ u_{Bi} \pi R^2 h_L \beta$ $\zeta = 1$	[116, 117]
5	$\text{Ar}^+ + \text{wall} \rightarrow \text{Ar}$	$k_{i,\text{wall}} = n_i^+ u_{Bi} [\pi R^2 h_L (2 - \beta) + 2\pi R L h_R]$ $k_{i,\text{иос}} = n_i^+ u_{Bi} \pi R^2 h_L \beta$ $\zeta = 1$	[116, 117]

6	$\text{Xe}^+ + \text{wall} \rightarrow \text{Xe}$	$k_{i,\text{wall}} = n_i^+ u_{Bi} [\pi R^2 h_L (2 - \beta) + 2\pi R L h_R]$ $k_{i,\text{иос}} = n_i^+ u_{Bi} \pi R^2 h_L \beta$ $\zeta = 1$	[116, 117]
---	---	---	---------------

Коэффициент рекомбинации ζ – вероятность реакции при контакте частицы со стенкой. Обращает на себя внимание реакция номер 1, единственная из рассмотренных, вероятность которой < 1 . В таблице для неё указан $\zeta = 0,007$ для кварцевых ГРК, которыми были оснащены все исследуемые прототипы ВЧ ИД.

Система уравнений баланса была дополнена уравнением квазинейтральности и уравнением баланса мощности, которое имеет вид:

$$V \cdot \frac{3}{2} n_e \frac{dT_e}{dt} = W - S \cdot \left[(2T_e + V_{pl}) \sum_j n_j^+ u_{Bj} + \sum_j U_{ij} (1 + R_{cj}) n_j^+ u_{Bj} \right] + V \cdot n_e^2 \sum_j \varepsilon_j n_j^+ k_{recj}, \quad (6.1.7)$$

где V – объём ГРК, S – полная площадь внутренней поверхности ГРК, W – вкладываемая в плазму мощность, V_{pl} – потенциал плазмы, j – сорт ионов плазмы, U_i – потенциал ионизации, R_c – радиационные потери в расчёте на 1 акт ионизации, ε – энергия, выделяющаяся при рекомбинации иона в объёме, k_{rec} – скорость соответствующей реакции.

6.2 Результаты численного моделирования характеристик источников плазмы, работающих исключительно на атмосферных газах

Рассмотрение результатов расчетов начнем с зависимости мощности P_{pl} , необходимой для получения тока ионов заданной величины от расхода азота. Полученные данные представлены на рис. 53.

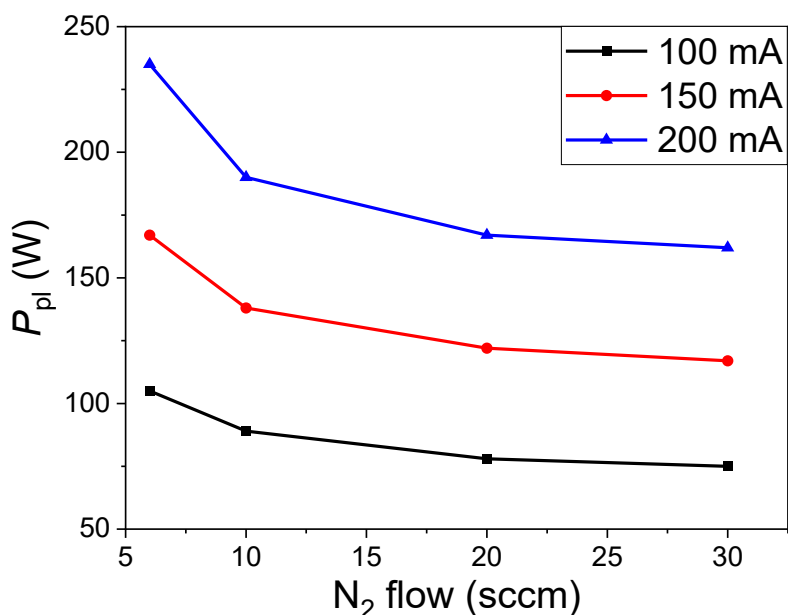


Рисунок 53. Зависимость вложенной в плазму мощности P_{pl} , необходимой для получения тока ионов заданной величины от расхода молекулярного азота. Длина ГРК 9 см.

Можно видеть, что уменьшение расхода газа сопровождается значительным ростом P_{pl} . Качественно полученные зависимости соответствуют измеренным (см. раздел 4.2).

Причина роста энергозатрат на ионизацию газа кроется в значительном увеличении температуры электронов (см. рис. 54), связанном с понижением концентрации электронов вследствие понижения концентрации нейтралов в разряде при уменьшении расхода (см. рис. 55).

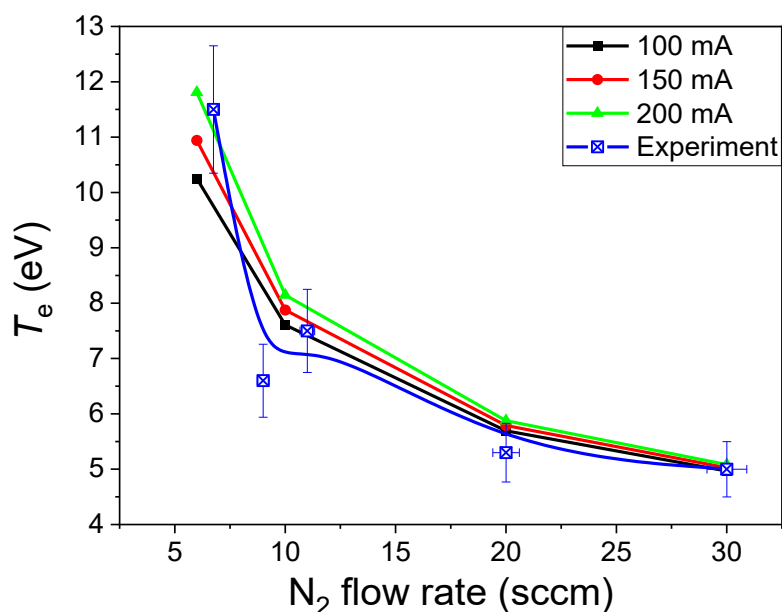


Рисунок 54. Зависимость температуры электронов в ГРК от расхода молекулярного азота при извлечении тока ионов 100, 150 и 200 мА. Дополнительно на график нанесены экспериментальные данные. Длина ГРК 9 см.

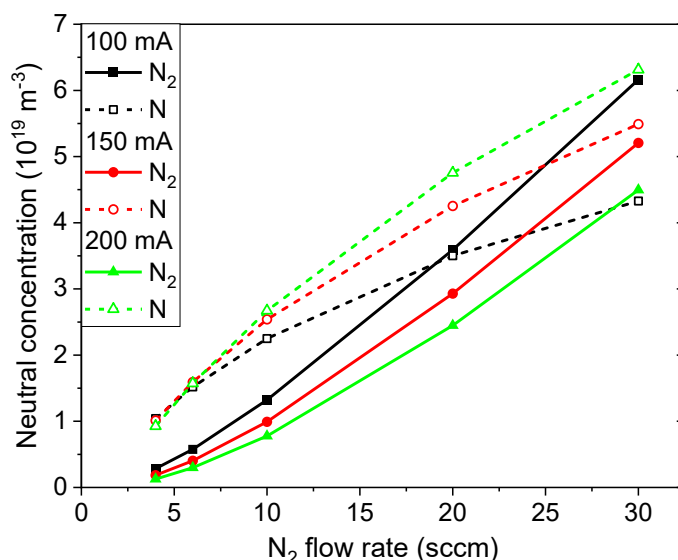


Рисунок 55. Зависимость концентрации молекул и атомов азота в ГРК от расхода молекулярного азота при извлечении тока ионов 100, 150 и 200 мА. Сплошные линии – молекулы, пунктирные – атомы. Длина ГРК 9 см.

Обращает на себя внимание, что, если при большом расходе газа в разряде доминируют молекулы азота, то при малых расходах – атомы азота. Это так же связано с ростом температуры электронов при уменьшении fl , увеличение которой приводит к повышению скорости диссоциации молекул (см. рис. 52). Немонотонная зависимость концентраций атомарной компоненты от расхода обусловлена соотношением с одной стороны скорости диссоциации молекул на атомы и их ионизации в объёме камеры, с другой – взаимодействием атомов со стенкой камеры, где они могут объединяться обратно в молекулы (см. табл. 7).

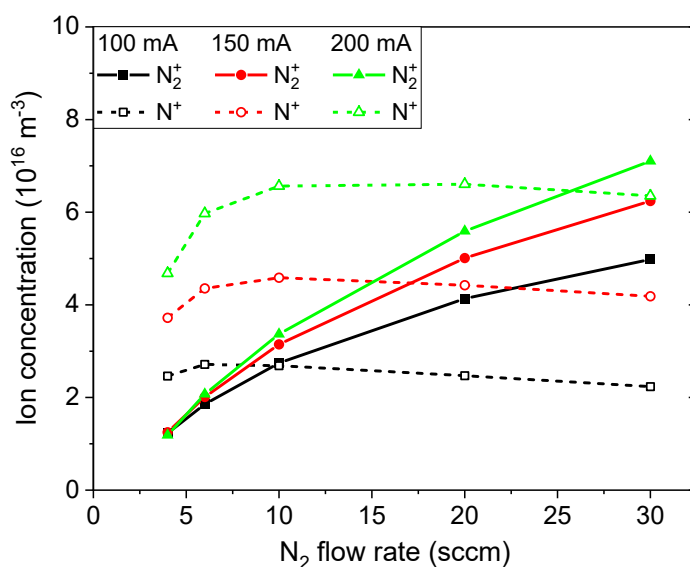


Рисунок 56. Зависимость концентрации молекулярных и атомарных ионов азота в ГРК от расхода молекулярного азота при извлечении тока ионов 100, 150 и 200 мА. Сплошные линии – молекулярные ионы, пунктирные – атомарные ионы. Длина ГРК 9 см.

Далее было детально изучено влияние свойств поверхности ГРК на характеристики разряда. В представленных на рис. 56 расчетах коэффициент рекомбинации ζ , описывающий вероятность образования молекул азота при столкновениях атомарного азота со стенками кварцевой газоразрядной камеры, был установлен на 0,007. Этот параметр может изменяться в зависимости от состава материала газоразрядной камеры. рис. 57 демонстрирует существенное влияние коэффициента рекомбинации атомов азота на стенках на компонентный состав плазмы. При $\zeta = 1$ концентрации атомов и ионов атомарного азота становятся пренебрежимо малыми, в то время как при $\zeta = 0$ атомарные компоненты доминируют в разряде. Эта вариация имеет важные последствия для характеристик двигателя, поскольку при равном извлекаемом ионном токе молекулярные ионы создают больше тяги и больший удельный импульс. В то же время, в соответствии с формулой (4.1.1), величины тока и тяги зависят не только от концентрации плазмы, массы ионов, но ещё и от температуры электронов, поэтому имеют неочевидную зависимость от ζ . Например, при расходе азота 6 сссм и $P_{pl} = 200$ Вт удельный импульс двигателя, рассчитанный для энергии ионов 1500 эВ, равен 39,8 км/с при $\zeta = 1$ и 44,6 км/с при $\zeta = 0$.

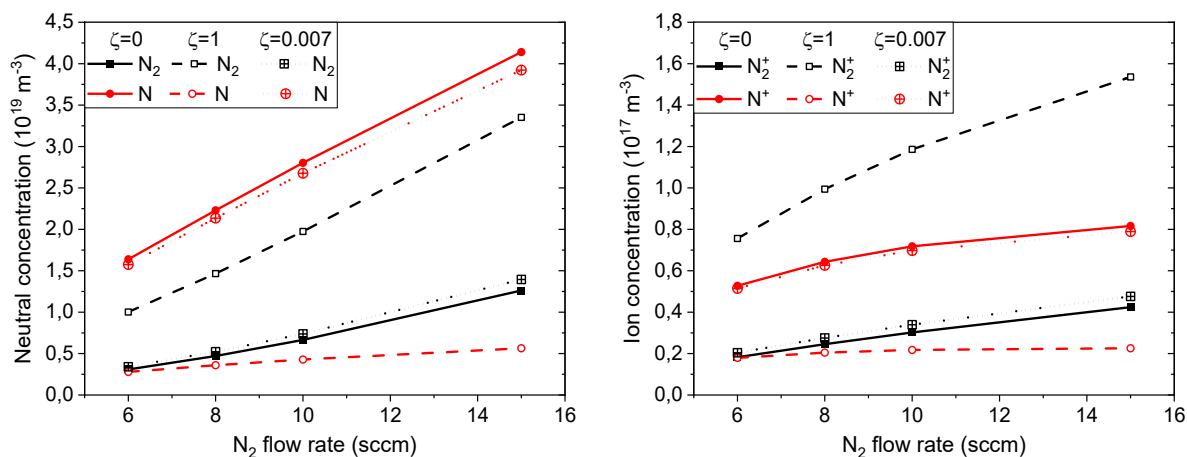


Рисунок 57. Зависимости концентраций молекул и атомов азота (а) и их ионов (б) от расхода азота. $P_{pl} = 200$ Вт при $\zeta = 0$ (сплошные линии), $\zeta = 1$ (пунктирные линии), $\zeta = 0,007$ (точечные линии). Чёрные линии – атомарные компоненты, красные – молекулярные.

Исследование было расширено для рассмотрения смесей молекулярного азота и атомного кислорода в соотношении 1:2, поступающих в прототип ВЧ ионного двигателя, что соответствует условиям полёта на УНОО 200 км [98].

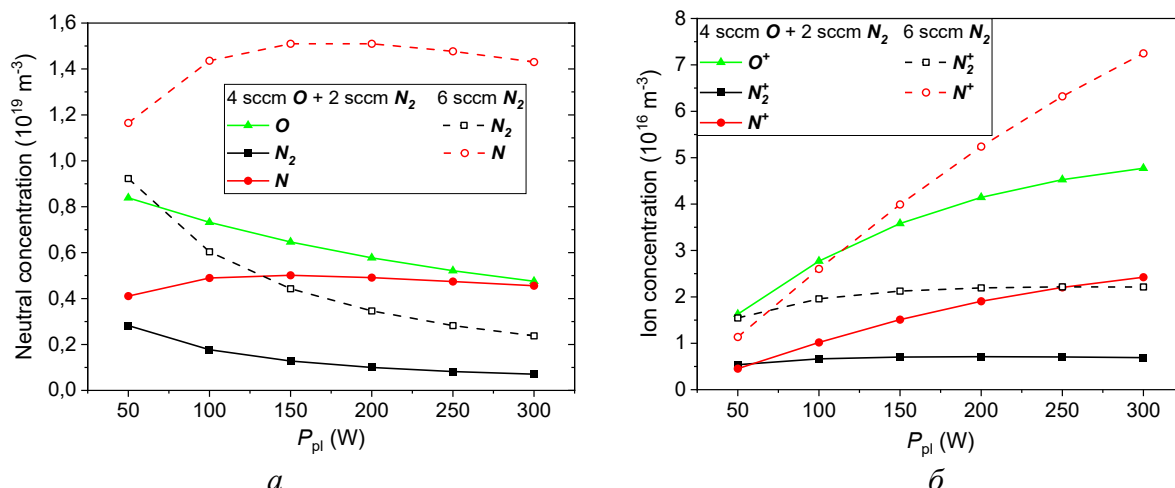


Рисунок 58. Зависимости концентраций нейтральных (а) и ионных (б) компонент плазмы от мощности, поглощаемой плазмой, P_{pl} . $\zeta = 0,007$.

Рис. 58 иллюстрирует зависимости концентраций нейтральных и ионизованных частиц от вложенной в плазму мощности при расходе смеси расходом 6 sccm в сравнении с данными для работы на чистом молекулярном азоте.

В смесях азота с атомарным кислородом увеличение мощности приводит к уменьшению концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота, в то время как концентрация атомарного азота ведёт себя немонотонно. Среди ионов наоборот, концентрация молекулярных ионов азота остаётся практически неизменной, в то время как количество ионов атомарного азота и кислорода увеличивается. Тенденции атомарных и молекулярных компонент для чистого азота при отсутствии кислорода сохраняются.

Описанная картина складывается вследствие увеличения температуры электронов, которая растёт за счёт сразу 2 факторов: увеличения вложенной в разряд мощности в расчёте на ион и снижения общей концентрации нейтральных частиц в разряде, что, как было показано выше, наиболее сильно влияет на температуру электронов.

Концентрация атомарного азота при увеличении P_{pl} сначала увеличивается с ростом температуры электронов из-за увеличения скорости диссоциации молекул азота, но при больших мощностях уменьшается из-за роста тока ионов через ИОС, уносящего частицы из разряда.

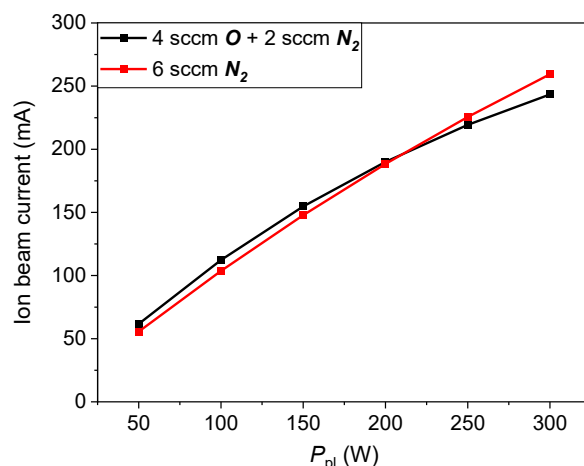


Рисунок 59. Зависимость рассчитанных значений ионного тока i_{beam} от P_{pl} .

Несмотря на различия в концентрациях компонент плазмы между разрядами в смеси азота с атомарным кислородом и в чистом азоте, рассчитанные значения ионного тока остаются практически равны (см. рис. 59). Однако значения удельного импульса в смеси молекулярного азота с атомарным кислородом оказываются значительно больше по сравнению с чистым азотом.

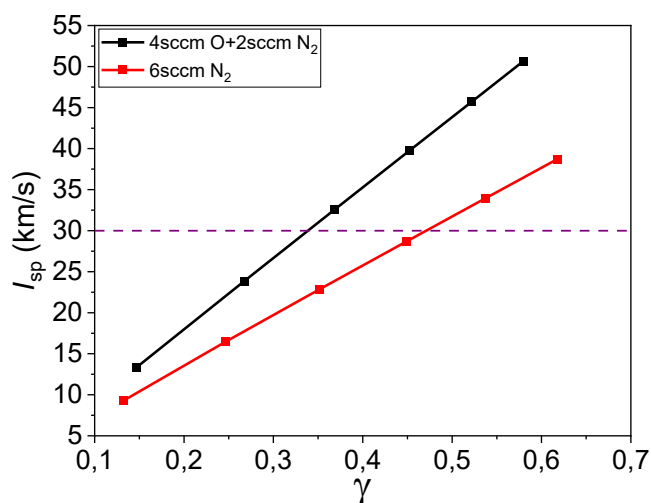


Рисунок 60. Зависимость рассчитанных значений удельного импульса I_{sp} от коэффициента использования рабочего тела γ . Расчеты I_{sp} предполагали энергию ионов равную 1000 эВ.

Это связано с тем (см. формулу I_{sp} 2.1.11), что масса ионов кислорода на выходе из ВЧ ИД равна массе нейтральных атомов кислорода на входе в ВЧ ИД, в отличие от азота, где молекулы, поступающие на вход ГРК двигателя, в значительной степени диссоциируют на атомы в разряде, и в выходящем потоке доминируют атомарные ионы азота (см. рис. 60).

6.3 Результаты численного моделирования характеристик источников плазмы, работающих на смеси атмосферных и инертных газов

На рисунке показаны результаты расчетов концентрации и температуры электронов в ГРК ВЧ ИД длиной 9 см в зависимости от мощности, вложенной в плазму, при условии, что в ВЧ ИД поступает 5 sccm азота и аргон с расходами 0 – 3 sccm.

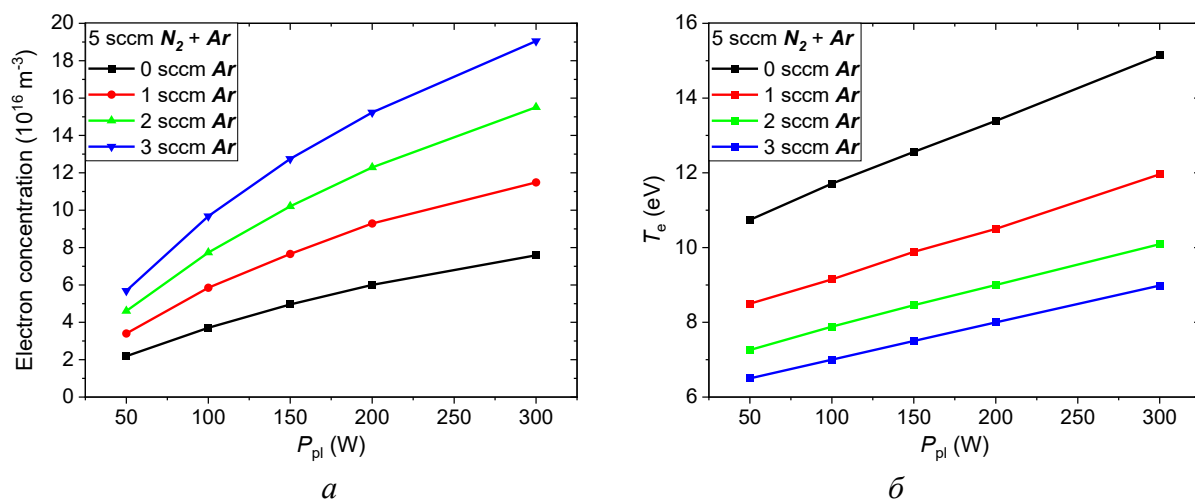
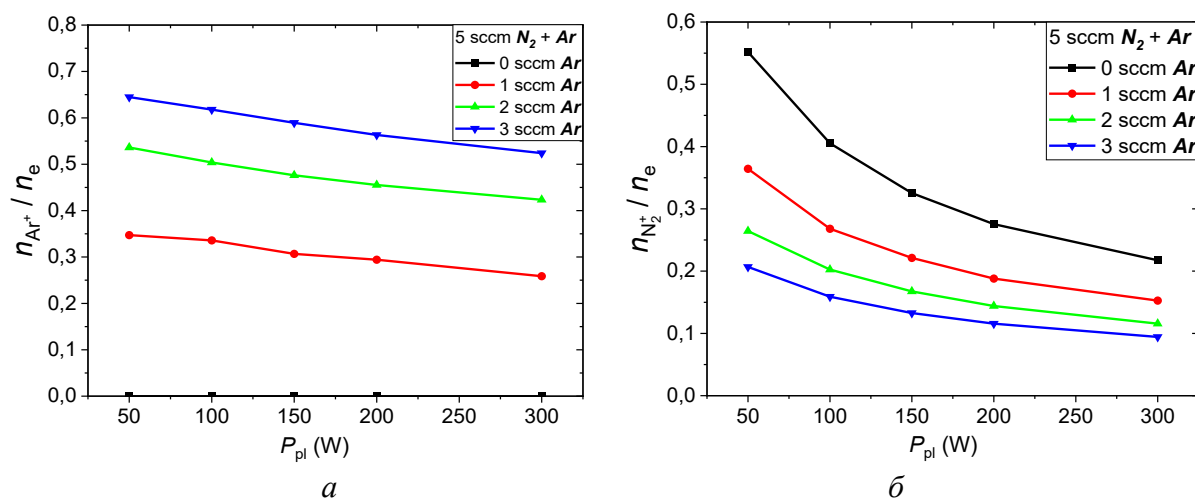
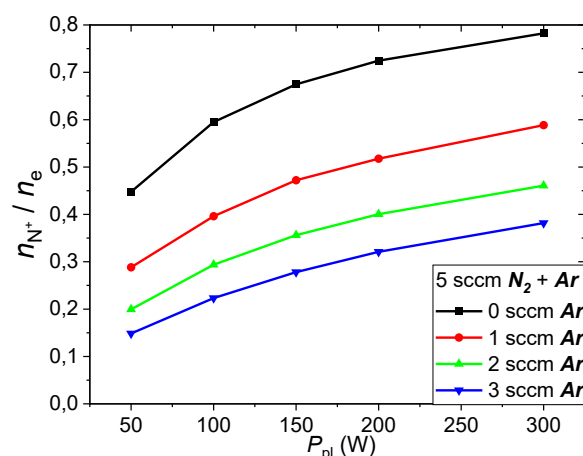


Рисунок 61. Зависимость концентрации (а) и температуры (б) электронов от величины вложенной в плазму мощности P_{pl} . Длина ГРК = 9 см, расход азота 5 sccm, расход аргона 0, 1, 2 и 3 sccm.

Для аргона характерны более высокие значения сечения ионизации, чем для молекул и атомов азота, поэтому добавка аргона к разряду в азоте сопровождается увеличением концентрации и падением температуры электронов. С ростом расхода аргона увеличивается и доля ионов Ar^+ в пучке ионов. Сказанное иллюстрирует рисунок рис. 62.

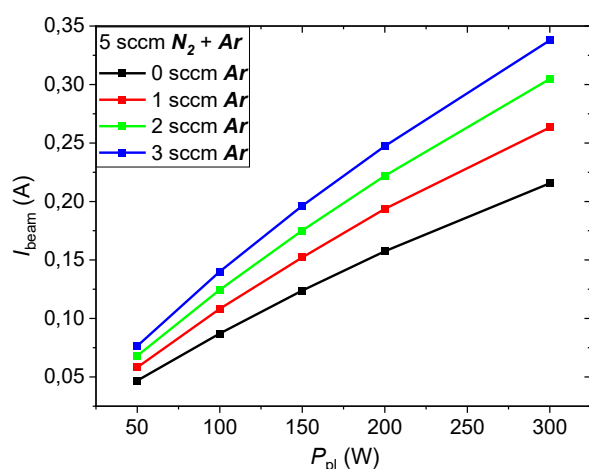




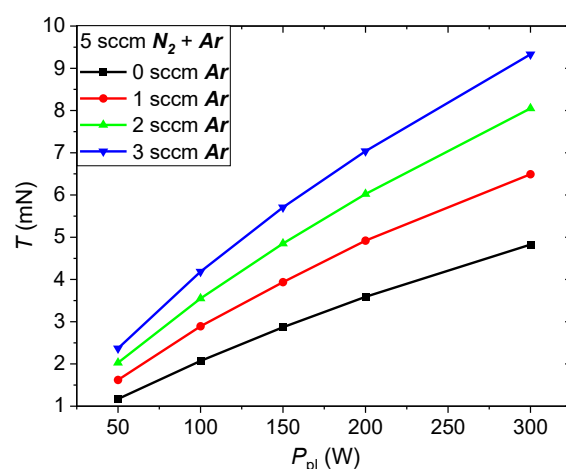
б

Рисунок 62. Зависимости доли ионных компонент в плазме от вложенной мощности для разных добавок аргона. а) доля ионов аргона n_{Ar^+}/n_e , б) доля молекулярных ионов азота $n_{N_2^+}/n_e$, в) доля атомарных ионов разряда n_{N^+}/n_e . Длина ГРК 9 см, расход азота 5 ссст, расход аргона 0, 1, 2 и 3 ссст.

Увеличение концентрации электронов и появление в пучке ионов более тяжелых частиц приводят к росту извлекаемого ионного тока и тяги (рис. 63) при тех же энергозатратах.



а



б

Рисунок 63. Зависимость ионного тока (а) и тяги (б) от величины ВЧ мощности, вложенной в плазму. Длина ГРК 9 см, расход азота 5 ссст, расход аргона 0, 1, 2 и 3 ссст.

Понять прямой вклад добавки инертного газа в тягу ВЧ ИД наглядно позволяет рис. 64. При этом видно, что чем больше добавка аргона, тем слабее улучшение характеристик, поэтому не имеет смысла добавлять в разряд излишне много инертного газа. Добавка инертного газа полностью теряет смысл, когда двигатель становится способен выдавать ту же тягу при том же расходе инертного без использования потока заборных газов.

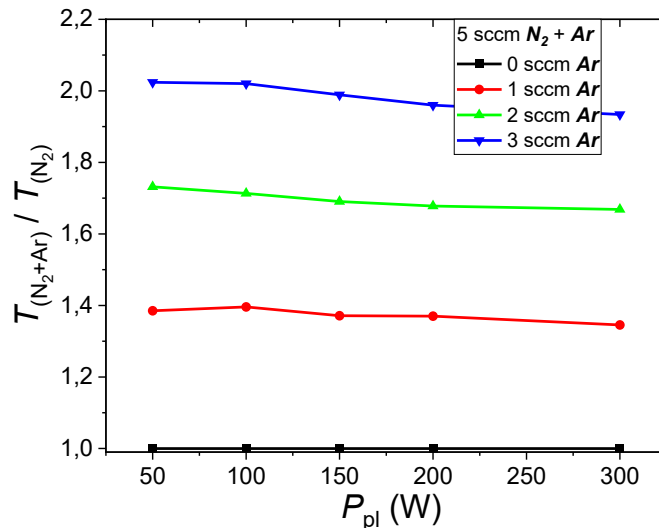


Рисунок 64. Отношения тяги, создаваемой ВЧ ИД на смесях азота с аргоном к тяге, создаваемой им без добавки инертного газа. Длина ГРК 9 см, расход азота 5 ссст, расход аргона 0, 1, 2 и 3 ссст.

График, отражающий влияние добавки инертного газа на величину гибридного удельного импульса ВЧ ИД в составе ВЭРД I'_{sp} , представлен на рис. 65.

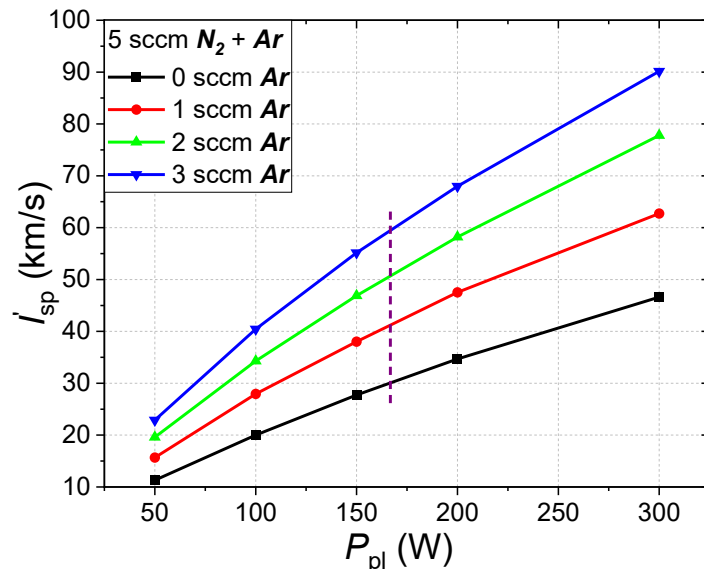


Рисунок 65. Зависимости гибридного удельного импульса I'_{sp} от вложенной в плазму мощности P_{pl} при различных добавках аргона. Энергия ионов 1500 эВ. Длина ГРК 9 см, расход азота 5 ссст, расход аргона 0, 1, 2 и 3 ссст.

Представленный график позволяет оценить, что при добавке аргона величиной всего 1 ссст (то есть $\chi_{Ar} = 0.2$) достижимые значения гибридного удельного импульса ВЧ ИД при тех затратах на поддержание разряда возрастают на 35%. Например, при $P_{pl} \approx 170$ Вт, когда на чистом азоте удельный импульс $I_{sp} = 30$ км/с, с добавкой аргона $fl_{Ar} = 1$ ссст возможно достичь $I'_{sp} = 40$ км/с (см. пунктирную линию на рис. 65), а при добавке аргона $fl_{Ar} = 1,6$ ссст можно

получить удельный импульс $I'_{sp} \approx 45$ км/с, что коррелирует с оценками гибридного удельного импульса на основе экспериментальных данных (см. Гл. 5, рис. 51).

Приведённые расчёты демонстрируют хорошее качественное согласие с экспериментально измеренными зависимостями характеристик ВЧ разряда в ГРК ВЧ ИД и интегральными характеристиками двигателя. Это позволяет сделать вывод о том, что используемая в работе глобальная модель ВЧ разряда позволяет эффективно оценивать и сравнивать характеристики ВЧ ИД при работе на смесях различных газов, включая атомарный кислород, эксперименты с которым невозможны в лабораторных условиях, и находить оптимальные режимы работы двигателя для различных внешних условий.

Заключение

1. Показано, что ключевым фактором, определяющим возможность использования конкретного электрореактивного двигателя для полетов космического аппарата на ультранизких околоземных орбитах при использовании только заборных газов, является не величина электрореактивной тяги, а достижение двигателем порогового значения удельного импульса, которое определяется только формой космического аппарата и эффективностью воздухозаборника, и не зависит от поступающего в двигатель расхода газа. Для достижения необходимого удельного импульса коэффициент использования рабочего тела должен быть не меньше 0.3 – 0.4 при энергии ионов 1000 – 2000 эВ.
2. Показано, что полные энергозатраты на работу двигателя немонотонно зависят от коэффициента использования рабочего тела. Минимум энергозатрат в рассмотренных случаях наблюдается при энергии ионов порядка 1000 – 2000 эВ и коэффициенте использования рабочего тела не хуже 0.3. Было показано, что энергозатраты возрастают с увеличением расхода заборных газов, поступающих в прототип двигателя, и уменьшаются с увеличением длины газоразрядной камеры за счёт возможности работы на меньших расходах рабочих газов.
3. Достигнут удельный импульс не менее 30000 м/с, достаточный для компенсации сопротивления остаточной атмосферы на высоте порядка 200 км при затратах мощности на генерацию разряда и ускорение ионов менее 600 Вт, расходе газов $3 \div 6$ ссст. Прототип ВЧ ионного двигателя имел газоразрядную камеру длиной 9 см, применялось внешнее магнитное поле с индукцией $50 \div 80$ Гс, диапазон расхода заборных газов удовлетворяет условиям полёта на ультранизкой околоземной орбите.
4. Показано, что на рабочих режимах прототипа ВЧ ионного двигателя, работающих на заборных газах, концентрация плазмы ниже, а температура электронов выше, чем в ВЧ ИД, работающих на ксеноне. Обнаружено, что вблизи эмиссионного электрода ИОС формируется слой пространственного

заряда, в котором происходит значительное ускорение ионов. Средняя энергия ионов тем выше, чем ниже расход атмосферных газов. Функция распределения ионов по энергиям уширяется при рабочих частотах 6.78 МГц и ниже, когда рабочая частота становится меньше ионной ленгмюровской частоты.

5. Уменьшение расхода рабочих газов сопровождается значительным увеличением температуры и понижением концентрации электронов; в спектре свечения плазмы интенсивности свечения молекул и атомов азота монотонно уменьшаются, а интенсивности свечения молекулярного и атомарного иона немонотонно зависят от расхода, проходя через локальный максимум.
6. Показано, что добавка примеси инертного газа в разряд атмосферных, поступающих в прототип двигателя позволяет понизить требования к коэффициенту использования рабочего тела, а также сгладить зависимость характеристик прототипа двигателя от суточных и сезонных колебаний концентраций нейтральных частиц на ультранизких околоземных орбитах, расширяя рабочий диапазон двигателя по расходу заборных газов.
7. Добавка инертного газа позволяет значительно увеличить концентрацию электронов в разряде и уменьшить разность потенциалов между плазмой и эмиссионным электродом, сокращая разрушительное воздействие ускоренных в приэлектродном слое ионов на эмиссионный электрод ионно-оптической системы, тем самым увеличивая рабочий ресурс двигателя.

Благодарности

От всего сердца благодарю своего научного руководителя Елену Александровну Кралькину за переданные знания, полученный опыт, безграничные поддержку и веру в меня, как в специалиста и человека, терпение, мудрость и заразительное стремление во что бы то ни стало создать то, что ещё ни у кого не получалось, но уже сейчас нужно всему человечеству.

Спасибо нашему доброму заведующему кафедрой Владимиру Савельевичу Чернышу за интерес к нашей работе и поддержку меня и других молодых специалистов, аспирантов и студентов Кафедры. Спасибо всему коллективу нашей лаборатории, и в особенности Илье Задириеву за помощь в освоении экспериментальных техник и содержательные беседы, повышающие мою общенаучную эрудицию. Спасибо коллективу кафедры Физической электроники Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за помощь в осуществлении научной деятельности. Спасибо всем моим друзьям, которые болеют за меня и ждут моей защиты, особенно Юрию Нестеренко, который некогда помог мне определить свой путь в науке и жизни.

Особую благодарность хочу выразить своей любимой жене Даше, моим любимым родителям Ирине Викторовне и Сергею Николаевичу, и моей любимой тёще Наталии Геннадьевне за вашу любовь, понимание, помощь и самоотверженную поддержку на моем пути в науке и жизни, веру в мои мечты и их осуществление.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации, в которых отражены основные результаты диссертации в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.3.9. Физика плазмы:

A1. Задириев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Никонов А.М., Швыдкий Г.В., Дудин В.С. Использование импульсного высокочастотного разряда для увеличения эффективности сеточного ионного двигателя // *Письма в Журнал технической физики*. — 2024. — Т. 50, № 17. — С. 23-25. Импакт-фактор 0,640 (РИНЦ). Авт. вклад 0,1 из 0,25 п.л.

EDN: UESCNT

A2. Дудин В.С., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Задириев И.И., Двинин С.А., Локтионов Е.Ю., Никонов А.М., Швыдкий Г.В. Влияние внешнего магнитного поля на характеристики прототипа ВЧ индуктивного воздушного электроракетного двигателя // *Прикладная физика*. — 2024. — № 6. — С. 24-28. Импакт-фактор 0,801 (РИНЦ). Авт. вклад 0,3 из 0,4 п.л.

EDN: IMPVTF

A3. Вавилин К.В., Голиков А.А., Двинин С.А., Дудин В.С., Задириев И.И., Кралькина Е.А., Локтионов Е.Ю., Никонов А.М., Сазонов В.В., Филатьев А.С., Швыдкий Г.В. Исследование характеристик высокочастотного ионного двигателя с внешним магнитным полем для использования в составе воздушного электрореактивного двигателя // *Журнал технической физики*. — 2024. — Т. 94, № 12. — С. 2112-2120. Импакт-фактор 0,709 (РИНЦ).

Авт. вклад 0,5 из 0,6 п.л.

EDN: AOYMWWD

A4. Dudin V.S., Kralkina E.A., Nikonov A.M., Shvydkiy G.V., Vavilin K.V., Zadiriev I.I., Golikov A.A., Sazonov V.V., Filatyev A.S., Yanova O.V. Approach to the optimization of RF air-breathing plasma sources // *Vacuum*. — 2026. — Vol. 252. — Article 115411. Импакт-фактор 3,9 (JIF). Авт. вклад 1,0 из 1,2 п.л.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2026.115411>

Список литературы

1. Romano F. RF Helicon Plasma Thruster for an Atmosphere-Breathing Electric Propulsion System (ABEP) : PhD thesis. University of Stuttgart. Stuttgart, 2021.
2. Zheng P. et al. A Comprehensive Review of Atmosphere-Breathing Electric Propulsion Systems // International Journal of Aerospace Engineering. 2020. Vol. 2020, no. 1. Art. 8811847.
3. Picone J. M. et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2002. Vol. 107, no. A12. P. SIA 15-1–SIA 15-16.
4. Кралькина Е. А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 5. С. 519–540.
5. Лебедев, Ю. А. Электрические зонды в плазме пониженного давления : методическое пособие. Москва : ИНХС РАН, 2003. 26 с.
6. Ершов А. П. Метод электрических зондов Ленгмюра: учебно-методическое пособие. Москва : Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2007. 26 с.
7. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 472 с.
8. Lotz B. Plasma physical and material physical aspects of the application of atmospheric gases as a propellant for Ion-Thruster of the RIT-Type : PhD thesis. Justus-Liebig-University of Giessen. Giessen, 2013.
9. Kessler D. J., Cour-Palais B. G. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt // Journal of Geophysical Research : Space Physics. 1978. Vol. 83, no. A6. P. 2637–2646.
10. Kessler D. J. Collisional cascading: The limits of population growth in low earth orbit // Advances in Space Research. 1991. Vol. 11, no. 12. P. 63–66.

11. Van Put P., Van der List M., Yuce V. Development of an advanced proportional xenon feed assembly for the GOCE spacecraft // 4th International Spacecraft Propulsion Conference. 2004. Vol. 555. P. 45–52.
12. Гордеев С. В. и др. Оценка параметров прямоточного высокочастотного ионного двигателя // Труды МАИ. 2017. № 96. С. 6.
13. Ерофеев А. И. и др. Разработка воздушного прямоточного электрореактивного двигателя для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 104-110.
14. Filatyev A. S. et al. Research and development of aerospace vehicles with air breathing electric propulsion: Yesterday, today, and tomorrow // Progress in Aerospace Sciences. 2023. Vol. 136. Art. 100877.
15. Nishiyama K. Air breathing ion engine concept // 54th International Astronautical Congress. Bremen, 2003. P. S-4.
16. Tagawa M. et al. Experimental study of air breathing ion engine using laser detonation beam source // Journal of Propulsion and Power. 2013. Vol. 29, no. 3. P. 501–506.
17. Di Cara D. et al. RAM electric propulsion for low Earth orbit operation: an ESA study // 30th International Electric Propulsion Conference. Florence, 2007. Paper IEPC-2007-162.
18. Cifali G. et al. Experimental validation of a RAM-EP concept based on Hall-effect thruster // Space Propulsion 2016. Rome, 2016. Paper SP2016_3125202.
19. Andreussi T. et al. Development and experimental validation of a Hall-effect thruster RAM-EP concept // 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta, 2017. Paper IEPC 2017-377.
20. Ferrato E. et al. Development roadmap of SITAEL's RAM-EP system // 36th International Electric Propulsion Conference. Vienna, 2019. Paper IEPC-2019-886.
21. Andreussi T. et al. Development status and way forward of SITAEL's air-breathing electric propulsion engine // AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. 2019. Art. 3996.

22. Diamant K. D. Microwave cathode for air breathing electric propulsion // 31st International Electric Propulsion Conference. Ann Arbor, 2009. Paper IEPC-2009-015.
23. Diamant K. D. A 2-stage cylindrical hall thruster for air breathing electric propulsion // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, 2010. Art. 6522.
24. Hohman K. Atmospheric Breathing Electric Thruster for Planetary Exploration : Final Report NNX11AR29G. Busek Co. Inc. Natick, 2012. 42 p.
25. Valentian D., Feili D., Lotz B. Experimental characterization of HET and RIT with atmospheric propellants // 32nd International Electric Propulsion Conference. Wiesbaden, 2011. Paper IEPC-2011-224.
26. Schwertheim A. et al. Performance characterization of an air-breathing thruster neutralized by an air-breathing cathode at NewOrbit Space // 38th International Electric Propulsion Conference (IEPC-2024). Toulouse, 2024. Paper IEPC-2024-385.
27. Romano F. et al. Performance evaluation of a novel inductive atmosphere-breathing EP system // 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta, 2017. Paper IEPC-2017-184.
28. Romano F. et al. System analysis and test-bed for an atmosphere-breathing electric propulsion system using an inductive plasma thruster // Acta Astronautica. 2018. Vol. 147. P. 114–126.
29. Romano F. et al. Inductive plasma thruster (IPT) design for an atmosphere-breathing electric propulsion system (ABEP) // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. Washington, 2019. P. 1–7.
30. Romano F. et al. RF helicon-based inductive plasma thruster (IPT) design for an atmosphere-breathing electric propulsion system (ABEP) // Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. P. 476–483.
31. Romano F. et al. Intake design for an atmosphere-breathing electric propulsion system (ABEP) // Acta Astronautica. 2021. Vol. 187. P. 225–235.

32. Herdrich G. et al. System design study of a VLEO satellite platform using the IRS RF helicon-based plasma thruster // *Acta Astronautica*. 2024. Vol. 215. P. 245–259.
33. Vaidya S. et al. Development and analysis of novel mission scenarios based on Atmosphere-Breathing Electric Propulsion (ABEP) // *CEAS Space Journal*. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 689–706.
34. Fasoulas S. et al. Motivation, structure and goals of the Collaborative Research Centre 1667: Advancing Technologies of very Low-Altitude Satellites—ATLAS // *CEAS Space Journal*. 2025. P. 1–24.
35. Zheng P. et al. A Comprehensive Review of Atmosphere-Breathing Electric Propulsion Systems // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2020. Vol. 2020, no. 1. Art. 8811847.
36. Andreussi T., Ferrato E., Giannetti V. A review of air-breathing electric propulsion: from mission studies to technology verification // *Journal of Electric Propulsion*. 2022. Vol. 1, no. 1. Art. 31.
37. Zeng M. et al. Review of Plasma Thruster Technology Development for Air-Breathing Electric Propulsion Missions // *Acta Astronautica*. 2026. Vol. 245. P. 603-617.
38. Shabshelowitz A., Gallimore A. D. Performance and probe measurements of a radio-frequency plasma thruster // *Journal of Propulsion and Power*. 2013. Vol. 29, no. 4. P. 919–929.
39. Shabshelowitz A., Gallimore A. D., Peterson P. Y. Performance of a helicon Hall thruster operating with xenon, argon, and nitrogen // *Journal of Propulsion and Power*. 2014. Vol. 30, no. 3. P. 664–671.
40. Shabshelowitz A. Study of RF plasma technology applied to air-breathing electric propulsion : PhD thesis. University of Michigan. Ann Arbor, 2013.
41. Kaufman H. R., Robinson R. S. Operation of Broad Beam Sources. Alexandria : Commonwealth Scientific, 1984. 210 p.

42. Hendryx J. et al. Parametric Characterization of RF Plasma Cathode // APS Division of Plasma Physics Meeting Abstracts. 2008. Vol. 50. Abstract ID JP6.026.
43. Scholze F., Tartz M., Neumann H. Inductive coupled radio frequency plasma bridge neutralizer // Review of Scientific Instruments. 2008. Vol. 79, no. 2. Art. 02B709.
44. Scholze F., Spemann D., Feili D. Design and Performance Test of a RF Plasma Bridge Neutralizer // 36th International Electric Propulsion Conference. Vienna, 2019. Paper IEPC-2019-475.
45. Smirnov P. et al. Research and development of radio-frequency cathode neutralizer // 36th International Electric Propulsion Conference. Vienna, 2019. Paper IEPC-2019-840.
46. Godyak V., Raitses Y., Fisch N. J. RF plasma cathode-neutralizer for space applications // 30th International Electric Propulsion Conference. Florence, 2007. Paper IEPC-2007-266.
47. Бондаренко Д. А. и др. Характеристики ВЧ катода-нейтрализатора при использовании аргона в качестве рабочего газа // Прикладная физика. 2022. № 3. С. 11–16.
48. Никонов А. М. и др. Зависимость характеристик высокочастотного катода от его конструктивных параметров // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 4. С. 605–612.
49. Jahanbakhsh S., Celik M. Experimental investigation of operational parameters of a prototype radio frequency plasma cathode // 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul : IEEE, 2015. P. 593–597.
50. Löb H. W. et al. Forty years of Giessen EP-activities and the recent RIT-microthruster development // 29th International Electric Propulsion Conference. Princeton, 2005. Vol. 31. Paper IEPC-2005-031.
51. Longmier B., Hershkowitz N. "Electrodeless" Plasma Cathode for Neutralization of Ion Thrusters // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, 2005. AIAA Paper 2005-3856.

52. Кожевников В. В., Смирнов П. Е., Хартов С. А. Исследование катоданейтрализатора с геликонным разрядом // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 3. С. 131–139.
53. Hidaka Y. et al. Performance and analysis of an electron cyclotron resonance plasma cathode // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2007. Vol. 25, no. 4. P. 781-790.
54. Weatherford B. R., Foster J. E., Kamhawi H. Electron current extraction from a permanent magnet waveguide plasma cathode // Review of Scientific Instruments. 2011. Vol. 82, no. 9. Art. 093503.
55. Thomson J. J. On the Illustration of the Properties of the Electric Field by Means of Tubes of Electrostatic Induction // Philosophical Magazine. 1891. Vol. 31, no. 190. P. 149–171 ; Vol. 32. P. 321–336.
56. Pippard A. B. The Surface Impedance of Superconductors and Normal Metals at High Frequencies. II. The Anomalous Skin Effect in Normal Metals // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1947. Vol. 191. P. 385–415.
57. Godyak V. Hot plasma effects in gas discharge plasma // Physics of Plasmas. 2005. Vol. 12, no. 5. Art. 055501.
58. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. Electron energy distribution function measurements and plasma parameters in inductively coupled argon plasma // Plasma Sources Science and Technology. 2002. Vol. 11, no. 4. P. 525–543.
59. Tsendin L. D. Electron kinetics in non-uniform glow discharge plasmas // Plasma Sources Science and Technology. 1995. Vol. 4, no. 2. P. 200–211.
60. Kolobov V. I., Godyak V. A. Nonlocal electron kinetics in collisional gas discharge plasmas // IEEE Transactions on Plasma Science. 1995. Vol. 23, no. 4. P. 503–531.
61. Kortshagen U., Busch C., Tsendin L. D. On simplifying approaches to the solution of the Boltzmann equation in spatially inhomogeneous plasmas // Plasma Sources Science and Technology. 1996. Vol. 5, no. 1. P. 1–17.
62. Godyak V. A., Kolobov V. I. Negative power absorption in inductively coupled plasma // Physical Review Letters. 1997. Vol. 79, no. 23. P. 4589–4592.

63. Godyak V. A. et al. Experimental evidence of collisionless power absorption in inductively coupled plasmas // *Physical Review Letters*. 1998. Vol. 80, no. 15. P. 3264-3267.
64. Cunge G. et al. Anomalous skin effect and collisionless power dissipation in inductively coupled discharges // *Journal of Applied Physics*. 2001. Vol. 89, no. 7. P. 3580-3589.
65. Lieberman M. A., Godyak V. A. From Fermi acceleration to collisionless discharge heating // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002. Vol. 26, no. 3. P. 955-986.
66. Demirkhanov R. A., Kadysh I. Y., Khodyrev Y. S. Skin effect in a high frequency ring discharge // *Soviet Physics JETP*. 1964. Vol. 19. P. 791.
67. Weibel E. S. Anomalous skin effect in a plasma // *The Physics of Fluids*. 1967. Vol. 10, no. 4. P. 741-748.
68. Godyak V. A., Piejak R. B. Electromagnetic field structure in a weakly collisional inductively coupled plasma // *Journal of Applied Physics*. 1997. Vol. 82, no. 12. P. 5944-5947.
69. Blevin H. A., Reynolds J. A., Thonemann P. C. Measurement of the attenuation of an electromagnetic wave in a bounded hot electron plasma // *The Physics of Fluids*. 1973. Vol. 16, no. 1. P. 82-89.
70. Godyak V. Electron kinetic and electrodynamic characteristics of ICP in stochastic heating regime // *Electron Kinetics and Applications of Glow Discharges*. Boston, MA : Springer US, 1998. P. 241-255.
71. Vahedi V. et al. Analytic model of power deposition in inductively coupled plasma sources // *Journal of Applied Physics*. 1995. Vol. 78, no. 3. P. 1446-1458.
72. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. Measurement of electron energy distribution in low-pressure RF discharges // *Plasma Sources Science and Technology*. 1992. Vol. 1, no. 1. P. 36-58.

73. Александров А. Ф. и др. Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 5. С. 434–449.
74. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле // Прикладная физика. 2005. № 4. С. 70–74.
75. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 72–78.
76. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть III. Исследование влияния емкостной составляющей на параметры плазмы индуктивного ВЧ-разряда низкого давления // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 36–42.
77. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть IV. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления без магнитного поля // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 41–46.
78. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть V. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления при наличии внешнего магнитного поля // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 54–59.
79. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. Часть VI. Математическое моделирование индуктивного ВЧ разряда (самосогласованная модель) // Прикладная физика. 2006. № 5. С. 33–38.

80. Александров А. Ф. и др. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть VII. Математическое моделирование индуктивного ВЧ-разряда с емкостной компонентой (самосогласованная модель) // Прикладная физика. 2006. № 5. С. 39–46.
81. Александров А. Ф. и др. Особенности индуктивного ВЧ-разряда низкого давления. I. Эксперимент // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 9. С. 802–815.
82. Александров А. Ф. и др. Особенности индуктивного ВЧ-разряда низкого давления. II. Математическое моделирование // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 9. С. 816–827.
83. Петров А. К. и др. Параметры плазмы в ВЧ индуктивном двухкамерном источнике малой мощности при наличии внешнего магнитного поля // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 98–106.
84. Александров А. Ф. и др. Математическое моделирование индуктивного ВЧ разряда, помещенного во внешнее магнитное поле, посредством программы КАРАТ // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 44–47.
85. Неклюдова П. А. и др. Влияние внешнего магнитного поля на радиальное распределение ионного тока насыщения зонда в высокочастотном индуктивном источнике плазмы // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 42–46.
86. Неклюдова П. А. и др. Влияние внешнего магнитного поля на эффективность поглощения высокочастотной мощности в пространственно ограниченном индуктивном источнике плазмы // Прикладная физика. 2017. № 4. С. 27–31.
87. Кралькина Е. А., Никонов А. М. Волновая структура, возбуждаемая в плазме цилиндрического индуктивного источника с внешним магнитным полем // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 20–25.
88. Никонов А. М. и др. Поглощение мощности и волновая структура, возникающие в индуктивном высокочастотном источнике плазмы, помещенном в слабое внешнее магнитное поле // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 5. С. 390–400.

89. Kralkina E. et al. Power absorption, plasma parameters and wave structure in inductive RF plasma source with low value external magnetic field // *Plasma Science and Technology*. 2020. Vol. 22, no. 11. Art. 115404.
90. Ивандиков Ф. И., Задириев И. И., Кралькина Е. А. Физические процессы в маломощном индуктивном источнике плазмы в слабом внешнем магнитном поле // *Прикладная физика*. 2021. № 5. С. 38–43.
91. Yakunchikov A. et al. Simulation of rarefied gas flow inside the satellite air intake in ultra-low Earth orbit // *Acta Astronautica*. 2025. Vol. 226. P. 102–112.
92. Алексеева Е. В., Баранцев Р. Г. Аэродинамика разреженных газов. Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1963. 240 с.
93. Livadiotti S. et al. A review of gas-surface interaction models for orbital aerodynamics applications // *Progress in Aerospace Sciences*. 2020. Vol. 119. Art. 100675.
94. Rapisarda C., Roberts P. C. E., Smith K. L. Design and optimisation of a passive atmosphere-breathing electric propulsion (ABEP) intake // *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 202. P. 77–93.
95. Tisaev M. et al. Air-breathing electric propulsion: Flight envelope identification and development of control for long-term orbital stability // *Acta Astronautica*. 2022. Vol. 191. P. 374–393.
96. Hoerner S. F. Fluid-Dynamic Drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance. Midland Park, NJ : Published by the author, 1965. P. 16–35.
97. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. 508 p.
98. NRLMSIS 2.0 Atmospheric Model // Community Coordinated Modeling Center : [site]. URL: <https://nasa.gov> (accessed: 23.04.2024).
99. Гневыхов М. Н. Об 11-летнем цикле солнечной активности // *Успехи физических наук*. 1966. Т. 90, № 10. С. 291–301.

100. Козлов М. Б., Спиров Г. М. Пояс Роговского. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 118 с.
101. Середа И. Н., Целуйко А. Ф. Зондовые методы диагностики плазмы : учебное пособие. Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015. 189 с.
102. Szabo J. et al. A commercial one Newton Hall effect thruster for high power in-space missions // 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego, 2011. AIAA Paper 2011-6152..
103. Каган Ю. М., Перель В. И. Зондовые методы исследования плазмы // Успехи физических наук. 1963. Т. 81, № 3. С. 409–452.
104. Задириев И. И. Использование емкостного высокочастотного разряда низкого давления в радиальном магнитном поле для получения ускоренного потока ионов : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.08. Ин-т общ. физики им. А. М. Прохорова РАН. Москва, 2017. 130 с.
105. Гинзбург В. Л., Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме. Москва : URSS, 2012. 412 с.
106. Вавилин К. В. и др. Влияние внешних параметров на особенности высокочастотного гибридного разряда низкого давления // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2012. № 1. С. 97–100.
107. Giesekus J. et al. Multi-diagnostic characterization of inductively coupled discharges with tailored waveform substrate bias for precise control of plasma etching // Plasma Sources Science and Technology. 2025. Vol. 34, no. 11. Art. 115015.
108. Itikawa Y. Cross Sections for Electron Collisions with Oxygen Molecules // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2009. Vol. 38, no. 1. P. 1–28.
109. Itikawa Y. Cross Sections for Electron Collisions with Nitrogen Molecules // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2006. Vol. 35, no. 1. P. 31–53.
110. Peterson J. R. et al. Dissociative recombination and excitation of N_2^+ // The Journal of Chemical Physics. 1998. Vol. 108, no. 5. P. 1978–1988.

111. Morgan database // LXCat: Plasma Data Exchange Project : [site]. URL: <https://www.lxcat.net/Morgan> (accessed: 24.01.2023).
112. Raju G. G. Electron-atom collision cross sections in argon: An analysis and comments // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2004. Vol. 11, no. 4. P. 649–673.
113. Puech V., Mizzi S. Collision cross sections and transport parameters in neon and xenon // Journal of Physics D: Applied Physics. 1991. Vol. 24, no. 11. P. 1974–1985.
114. Bourdon A., Vervisch P. Three-body recombination rate of atomic nitrogen in low-pressure plasma flows // Physical Review E. 1996. Vol. 54, no. 2. P. 1888–1893.
115. Chabert P., Braithwaite N. Physics of Radio-Frequency Plasmas. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 394 p.
116. Mrozek K. et al. Global plasma modeling of a magnetized high-frequency plasma source in low-pressure nitrogen and oxygen for air-breathing electric propulsion applications // Plasma Sources Science and Technology. 2021. Vol. 30, no. 12. Art. 125007.
117. Thorsteinsson E. G., Gudmundsson J. T. A global (volume averaged) model of a nitrogen discharge: I. Steady state // Plasma Sources Science and Technology. 2009. Vol. 18, no. 4. Art. 045001.
118. Singh H., Coburn J. W., Graves D. B. Recombination coefficients of O and N radicals on stainless steel // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 88, no. 6. P. 3748-3755.