

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дудин Василий Сергеевич

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

Специальность 1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель — **Кралькина Елена Александровна**,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты — **Лебедев Юрий Анатольевич**,
доктор физико-математических наук,
доцент,
Институт нефтехимического синтеза
им. А.В. Топчиева Российской академии наук,
лаборатория №14 «Плазмохимии и физико-
химии импульсных процессов»,
главный научный сотрудник

Скворцова Нина Николаевна,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии
наук», Центр плазменных и микроволновых
технологий, отдел физики плазмы,
главный научный сотрудник

Селиванов Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук,
Государственный научный центр Российской
Федерации «Исследовательский центр имени
М.В. Келдыша»,
отдел разработки плазменных двигателей,
начальник отдела

Защита диссертации состоится « 22 » октября 2026 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет МГУ, ауд. Н-16.

E-mail: diss.sov.013.7@org.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3999>

Автореферат разослан «__» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

И.Н. Карташов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 электрореактивных двигателей (ВЭРД), использующих забортные 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 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 внешних 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 fI , 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 газоразрядной камере (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 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.

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 сссм.
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 заборных газов остаточной атмосферы, коэффициент использования рабочего тела (заборных 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 сссм.
3. На рабочих режимах прототипов ВЧ ионного двигателя, работающих на заборных газах, концентрация плазмы ниже, а температура 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

Основные результаты диссертации были представлены соискателем на научных семинарах кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ИОФ РАН, ИНХС РАН, а также в 7 докладах на российских и международных конференциях:

- Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2024, 2026).

- Международное совещание «Сложные системы заряженных частиц и их взаимодействие с электромагнитным излучением – 2025» CSCPIER-2025 (ИОФ РАН, Москва, 2025).
- Научные конференции МГУ «Ломоносовские чтения», секция Физика (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 2024, 2025).
- XI Международный аэрокосмический конгресс (МАИ, Москва 2024).
- Всероссийская (с международным участием) конференция «ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ» (ФНТП- 2023) (Казань, 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 страницы печатного текста, включающих 65 рисунков и 7 таблиц. Библиография содержит 118 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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]:

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

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

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 scst – стандартных кубических сантиметрах в минуту, 1 scst = 2.65 · 10¹⁹ частиц/мин = 4.42 · 10¹⁷ 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 fI , поступающих в ГРК двигателя, в условиях практически фиксированного потока энергии, формируемого солнечными панелями.

Полная мощность, потребляемая двигателем при работе, выражается [A4]:

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

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} 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.

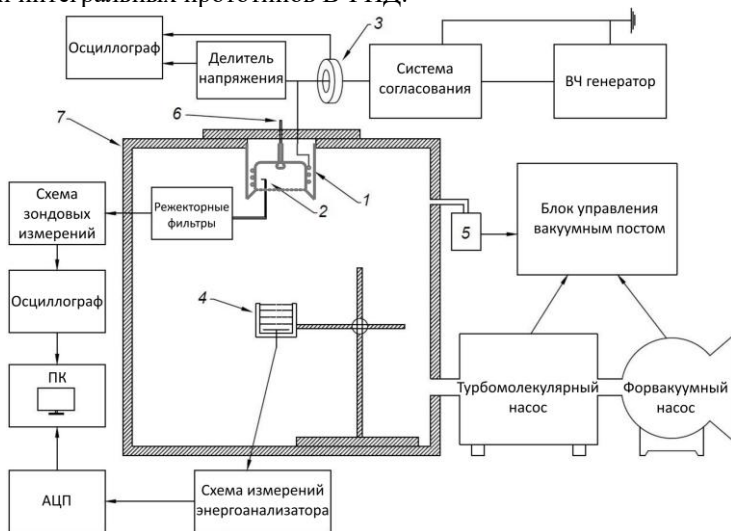


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. 1 – прототип индуктивного ВЧ ИД в заземлённом кожухе, 2 – зонд Ленгмюра, 3 – пояс Роговского, 4 – четырехсеточный энергоанализатор, 5 – широкодиапазонный датчик давления, 6 – газосвод, 7 – вакуумная камера.

Схема рабочей установки представлена на Рисунок 1. 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 $1 \cdot 10^{-5}$ Тор. Работа насосов контролируется через блок управления. Давление измеряется с помощью широкодиапазонной лампы (5). 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 4, 6,78, 13,56 и 27,12 МГц.

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.

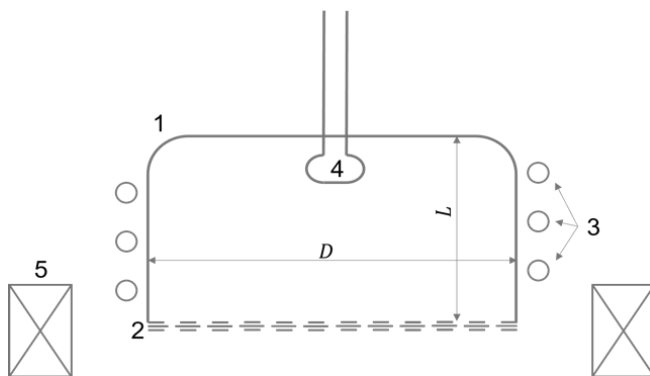


Рисунок 2. Схема лабораторного прототипа ВЧ ИД с внешним магнитным полем.

Схема лабораторного прототипа ВЧ ионного двигателя, основанного на индуктивном разряде, показана на Рисунок 2. Прототип ВЧ ИД состоит из кварцевой ГРК, 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. 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 3,0 мм, 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 [4, 5].

Для качественного анализа компонентного состава плазмы использовался спектральный метод [6]. 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 [A1] и вида рабочего газа [A1]. На Рисунок 3 показаны типичные зависимости влияния магнитного поля на извлекаемый ионный ток i_{beam} от рабочей частоты ($L = 9$ см, азот). Можно видеть, что в рассмотренном диапазоне $0 - 100$ Гс находятся два локальных максимума ионного тока [A2] (при резонансных значениях индукции магнитного поля $B_I^* = 19$ Гс и $B_{II}^* = 50-80$ Гс). Уменьшение длины ГРК и рабочей частоты приводит к снижению влияния магнитного поля. При этом на низких частотах ток без магнитного поля оказывается больше.

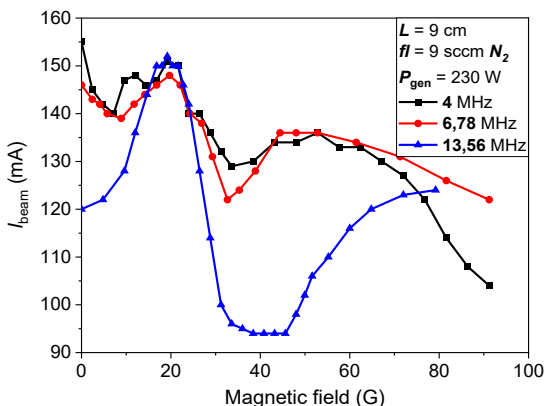


Рисунок 3. Зависимость ионного тока от индукции магнитного поля. Черная, красная и синяя кривые соответствуют рабочим частотам 4, 6.78 и 13.56 МГц. Азот, расход 9 см. см³/мин, длина ГРК 9 см.

В таблице 1 показаны значения магнитного поля B_I^* и B_{II}^* , 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 достигнутые значения тока ионов существенно ниже, чем на других частотах, 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.

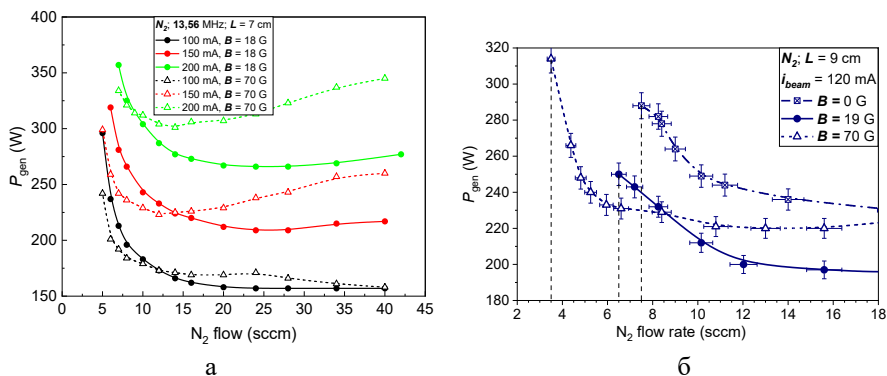


Рисунок 4. Зависимость мощности ВЧ генератора, необходимой для извлечения тока заданной величины, от расхода рабочего газа при внешних магнитных полях, соответствующих максимумам B_I^* и B_{II}^* . Рабочая частота 13.56 МГц, азот. а) длина ГРК = 7 см; б) длина ГРК = 9 см. Сплошные линии – $B = 18$ Гс, пунктир – $B = 70$ Гс, штрих-пунктир – $B = 0$.

Влияние магнитного поля на свойства разряда в прототипах ВЧ ИД не исчерпывается только улучшением вложения ВЧ мощности в плазму при некоторых значениях B . Это отчетливо видно из рис. 4, где показаны

зависимости мощности ВЧ генератора P_{gen} необходимые 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. Рисунок 4 показывает, что 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 интенсификацией 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. Полученные результаты представлены на рис. 5. Величины интенсивности свечения каждой компоненты плазмы нормировались на значение, измеренное при максимальном из рассмотренных расходов газа.

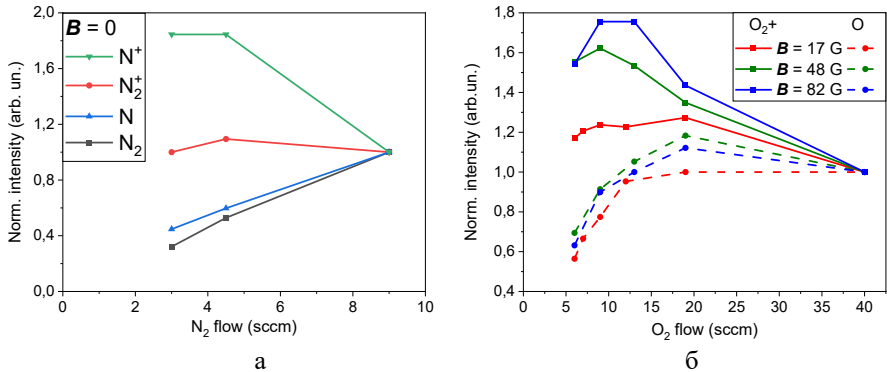


Рисунок 5. Зависимость нормированной интенсивности свечения компонент плазмы от расхода газов. $L = 9$ см, $f = 13.56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт.

a – азот, $B = 0$; b – 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. 5а). Интенсивность полос молекулярного иона азота I_{mi} более сложно зависит от fl (рис. 5б): с уменьшением расхода сначала возрастает, а затем падает. Интенсивность свечения атомарного иона азота в области расходов 4.5 – 9 sccm увеличивается существенно быстрее, чем интенсивность свечения молекулярного иона, что свидетельствует об изменении соотношения между концентрациями атомарных и молекулярных ионов в разряде.

Наблюдавшееся увеличение необходимого энерговклада в разряд 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.

Зависимость температуры электронов от расхода азота, измеренная при $P_{gen} = 200$ Вт показана на рис. 6 [A4].

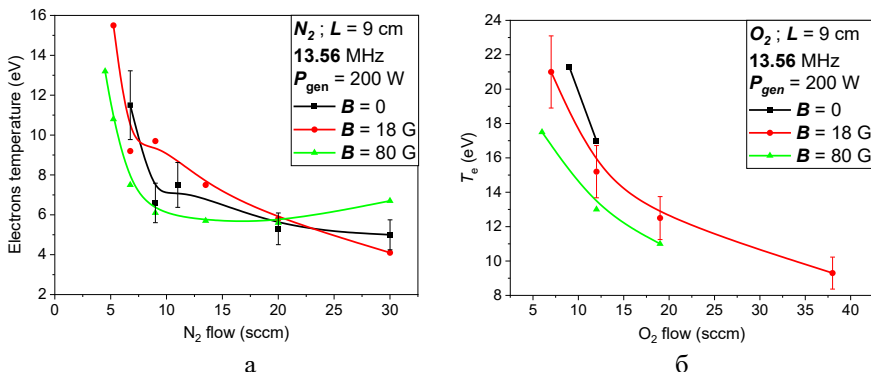


Рисунок 6. Зависимость температуры электронов от расхода азота (а) и кислорода (б) при магнитных полях 0, 18 и 80 Гс. $L = 9$ см. $f = 13.56$ МГц.

Как видно, уменьшение расхода газа в диапазоне 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. Функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ), измеренные на оси источника на расстоянии ≈ 50 см от ИОС показаны на рис. 7. По оси абсцисс отложена энергия ионов $\Delta E_i = E - eU$, приобретаемая ими в слое пространственного заряда вблизи эмиссионного электрода ИОС.

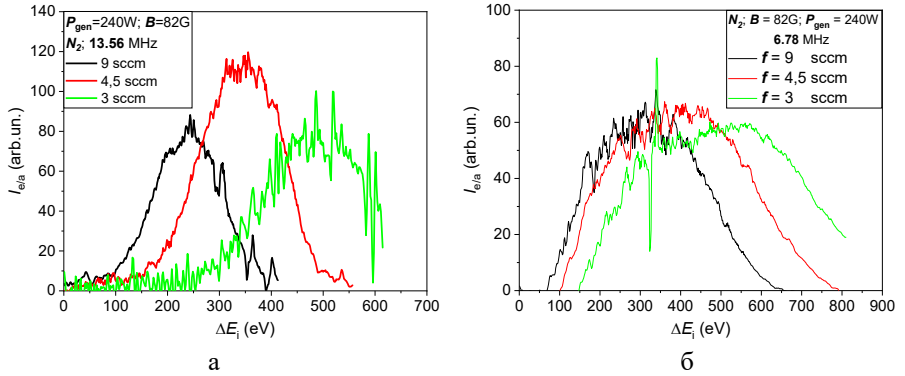


Рисунок 7. Функции распределения ионов по энергиям при расходах азота 3, 4.5 и 9 sccm. $L = 9$ см, $P_{gen} = 240$ W, $B = 82$ Гс, азот. а) $f = 13.56$ МГц, б) $f = 6.78$ МГц.

ФРИЭ заметно уширяется, а средняя энергия растёт с уменьшением расхода азота. 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} (рис. 8). 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 [A4].

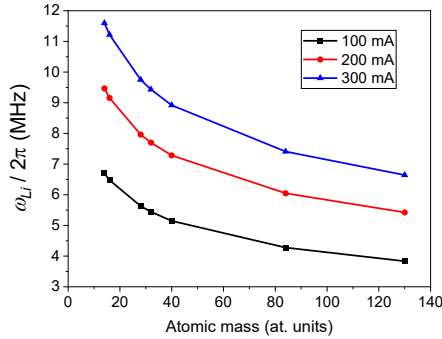


Рисунок 8. Оценки ленгмюровской ионной частоты $\omega_{Li}/2\pi$, проведённые на основании значений концентрации электронов, представленных на рисунке 35.

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

Используя кривые $P_{gen}(fI)$ и $P_{pl}(fI)$, измеренные при $i_{beam} = const$, можно определить КИРТ $\gamma = \frac{i_{beam}}{e \cdot fI}$ 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.

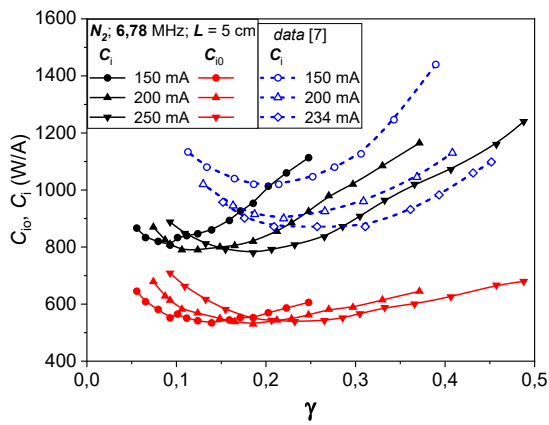


Рисунок 9. Зависимости «цены иона» C_i (чёрные кривые) и C_{i0} (красные кривые), от коэффициента использования рабочего тела γ . Рабочая частота 6.78 МГц, длина ГРК = 5 см, азот. пунктирные кривые – результаты немецкой группы, исследовавшей работу двигателя RIT-10 на атмосферных газах [7].

Рассчитанные по экспериментальным данным величины C_i и C_{i0} в зависимости от КИРТ γ показаны на рис. 9. Для сравнения на рисунке показаны известные результаты немецкой научной группы [7]. Они лежат в пределах диапазона полученных нами результатов C_{i0} и C_i .

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 2.

Таблица 2. Величины «цены иона» и максимальные достигаемые в экспериментах КИРТ для различных прототипов ВЧ ИД при работе на азоте.

L см	f МГц	i_{beat} 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

9	13.56	160	0.75	1450	2850
		200	0.47	1250	2150

*) γ_{max} не был достигнут из-за ограничения шкалы расходомера.

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 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. Результаты расчетов показаны на рис. 10а.

Зная U_{sp} и используя семейство кривых $i_{beam}(P_{gen})$, измеренных в широком диапазоне расходов газа, были рассчитаны по формуле (4) зависимости полной мощности P_{tot} от коэффициента использования рабочего тела γ для рассмотренных выше режимов работы ВЧ ИД. Они представлены на рис. 10б[А4].

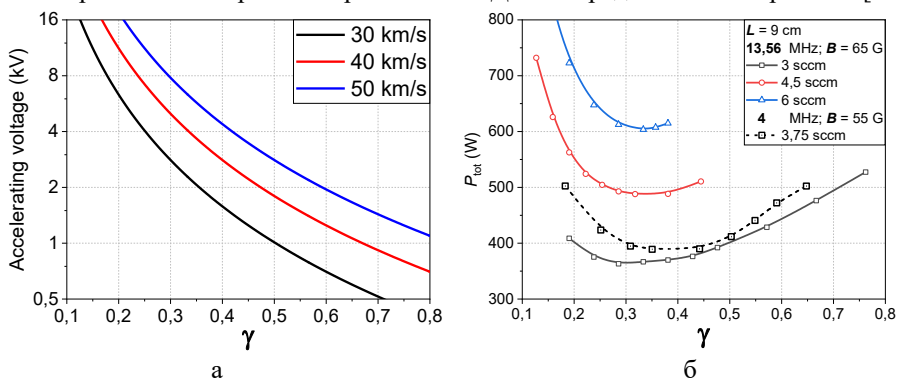


Рисунок 10. Зависимость напряжения на сетках ИОС (а) и полной мощности (б), необходимых для достижения порогового значения удельного импульса $I_{sp}^* = 30$ км/с и компенсации сопротивления остаточной атмосферы, от коэффициента использования рабочего тела γ при разных расходах азота.

$L = 9$ см, магнитное поле соответствует второму максимуму B_{II}^* .

Как видно, 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 затрат на ускорение ионов до высоких энергий, а 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, оказалось, что минимальные значения полных энергозатрат на компенсацию аэродинамического сопротивления в *требуемом широком рабочем диапазоне расходов атмосферных газов* (см. Гл. 2) 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.

Раздел 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 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.

В пятой главе, с целью минимизировать недостатки, отмеченные в конце четвертой 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.

Рис. 11 демонстрирует 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.

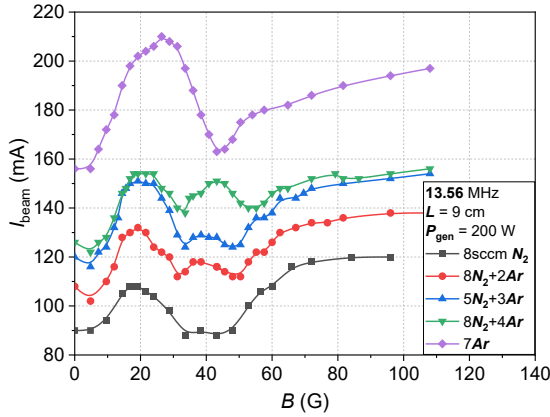


Рисунок 11. Зависимости ионного тока от магнитного поля в прототипе длиной $L = 9$ см для смесей газов с разным содержанием аргона, от чистого азота к чистому аргону. $f = 13,56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт.

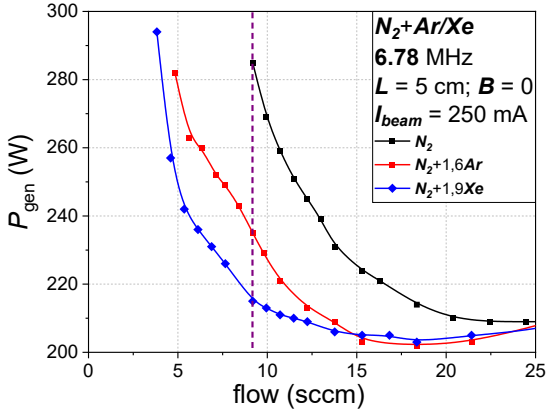


Рисунок 12. Зависимость потребляемой от генератора мощности, необходимой для извлечения из разряда ионного тока фиксированной величины 250 мА в зависимости от расхода Азота при фиксированных добавках различных инертных газов (Ar, Xe) в ссст. Длина камеры 5 см, частота 6,78 МГц.

На рис. 12 показана кривые $P_{gen}(fl_{N_2})$, полученные в разряде в чистом азоте, а также его смеси с аргонном 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 аргонном 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. Результаты исследований ФРИЭ в источнике длиной 9 см приведены на рис. 13. Средняя энергия ионов азота почти в 2 раза больше средней энергии ионов аргона при тех же внешних условиях разряда. 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 20-30 эВ, 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.

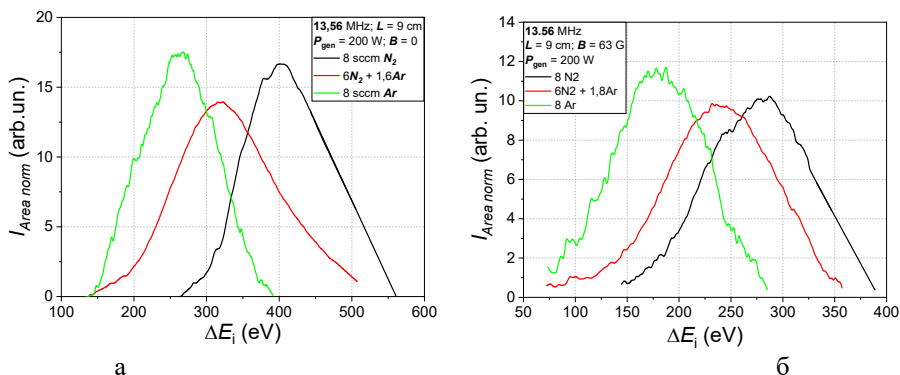


Рисунок 13. Сравнение ФРИЭ для разряда азота, аргона и их смеси. Функции распределения нормированы на площадь под кривой. $L = 9$ см, $f = 13.56$ МГц, $P_{gen} = 200$ Вт, $fl = 8$ ссст. а) $B = 0$, б) $B = 63$ Гс.

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 заборного газа, поступающего в ВЧ ИД. Величина гибридного удельного импульса, требуемого для компенсации аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы, определяется выражением:

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

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

где $\gamma' = \frac{i_{beam}}{e \cdot f l_z}$ – «гибридный» коэффициент использования рабочего тела (ГКИРТ), то есть отношение полного потока ионов, вылетающих из ВЧ ИД, к потоку забортных газов, поступающих в ВЧ ИД, M_{ig}, M_z – масса инертного и забортного газов, M_z^+ – масса ионов забортного газа. 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 забортного 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 рис. 11 при соответствующем МП как отношение токов при равном расходе соответствующих газов.

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} . Результаты представлены на рис. 14. Видно, что снижение полных энергозатрат при добавлении 1,6 sccm = 1,5 кг аргона в год составляет 150 Вт.

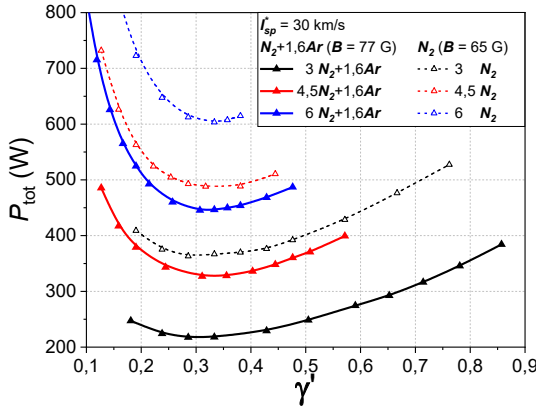


Рисунок 14. Зависимость полной мощности P_{tot} , необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы, от ГКИРТ γ' при различных расходах чистого азота (пунктирные кривые) и с добавкой аргона $f l_{Ar} = 1,6 \text{ sccm}$ (сплошные кривые). $L = 9 \text{ см}$, $f = 13.56 \text{ МГц}$, $B = B_{II}^*$. Для оценки в смеси использовался $k_1 = 1,5$.

Раздел 3. Основные итоги.

1. Положение максимумов тока по магнитному полю B_I^* и B_{II}^* в смеси газов почти не меняется, что позволяет эффективно использовать магнитное поле при работе на смеси для улучшения характеристик ВЧ ИД.

2. Добавка инертного газа позволяет существенно расширить рабочий диапазон ВЧ ИД по расходу атмосферных газов.
3. Добавка инертного газа уменьшает среднюю энергию ионов на выходе из ИОС.
4. Рассчитан вклад в тягу и удельный импульс от добавки инертного газа в разряд. Получены формулы для расчёта требуемого напряжения на ИОС при работе прототипа на смеси атмосферных газов с инертным.
5. На основе экспериментальных данных получено снижение на 150 Вт полной потребляемой мощности ВЧ ИД P_{tot} при добавке аргона 1,6 sccm.
6. Показана возможность повышения удельного импульса двигателя за счёт добавки инертного газа при равных энергозатратах для различных целевых применений.

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 кислородом и смеси «азот, атомарный кислород, аргон». Численные результаты качественно совпадают с измеренными зависимостями и объясняют закономерности, обнаруженные в эксперименте.

Сказанное подтверждают рис. 15-17, где приводятся рассчитанные значения температуры электронов и концентрации тяжелых компонент плазмы в зависимости от расхода газов.

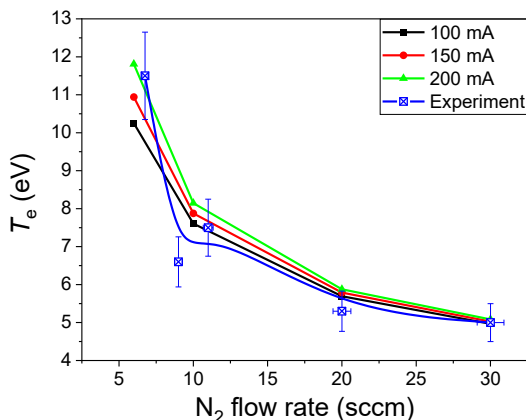


Рисунок 15. Зависимость температуры электронов в ГРК от расхода молекулярного азота при извлечении тока ионов 100, 150 и 200 мА. Дополнительно на график нанесены экспериментальные данные. Длина ГРК 9 см.

Рис. 16 Иллюстрирует, что 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 . Необходимо отметить, что измеренная интенсивность свечения полос молекулярного иона азота убывает с fl более медленно [A4].

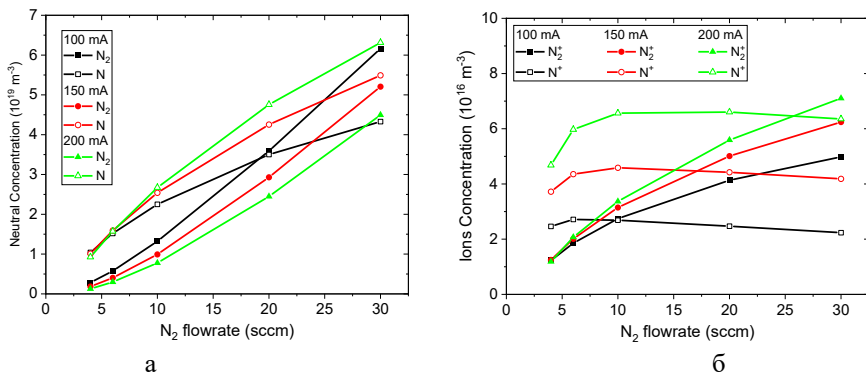


Рисунок 16. Зависимость рассчитанных концентраций молекул и атомов (а), молекулярных и атомарных ионов (б) азота в ГПК от расхода молекулярного азота при извлечении тока ионов 100, 150 и 200 мА.

Численное моделирование разряда в смеси с инертными газами показало, что добавка инертного газа сопровождается понижением температуры электронов и повышением концентрации плазмы (см. рис. 17).

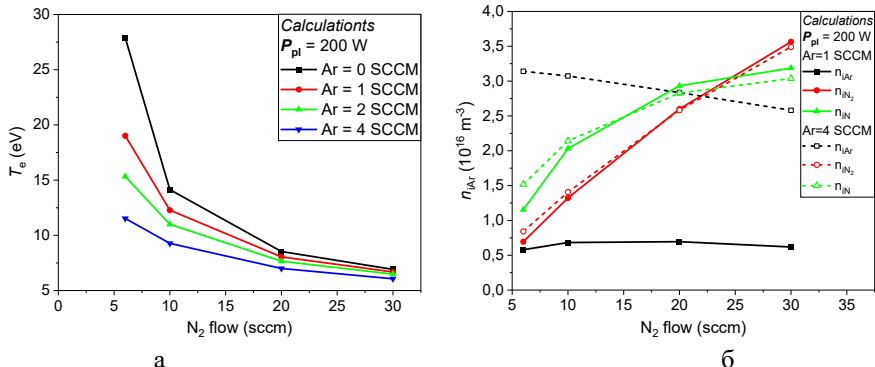


Рисунок 17. Рассчитанные параметры плазмы с добавками аргона в зависимости от расхода азота при вариации добавки аргона. В расчётах принята вложенная в плазму мощность $P_{pl} = 200 \text{ Вт}$. а – температура электронов T_e , б – концентрации ионов по компонентам.

В **Заключении** диссертации сформулированы основные выводы:

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 $3 \div 6$ г/с. 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 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. 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, в которых отражены основные результаты диссертации в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ 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., Филатов 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: AOYMWD
- 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 цитируемой литературы.

1. Romano F. RF Helicon Plasma Thruster for an Atmosphere-Breathing Electric Propulsion System (ABEP). PhD thesis at the University of Stuttgart, 2021.
2. Zheng P. et al. A Comprehensive Review of Atmosphere-Breathing Electric Propulsion Systems // *International Journal of Aerospace Engineering*. — 2020. — Vol. 2020. — Article 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. — №. 12. — SIA 15-1-SIA 15-16.
4. Лебедев Ю.А. Электрические зонды в плазме пониженного давления // М.: Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН. — 2003.
5. Ершов А.П. Метод электрических зондов Ленгмюра // М.: Физический факультет МГУ. — 2007.
6. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 472 с.
7. 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 at the Justus-Liebig-University of Giessen, 2013.