

На правах рукописи



МЕЛЬНИКОВ АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ
ПОСТОЯННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2019

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хартов Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Кралькина Елена Александровна**
доктор физико-математических наук, ФГБОУ
ВО «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова», ведущий научный
сотрудник кафедры «Физическая электроника»

Пильников Александр Васильевич
кандидат технических наук, Акционерное общество
«Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения», ведущий специалист.

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации — федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

Защита состоится 09 декабря 2019 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» https://mai.ru/upload/iblock/29f/Melnikov_A.V._dissertatsiya.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
доктор технических наук, профессор

 Зув Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из востребованных на сегодняшний день направлений развития космической техники является разработка перспективных низкоорбитальных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с длительным сроком активного существования (САС). В настоящее время для решения задач ДЗЗ в России всё чаще начинают использоваться так называемые малые космические аппараты (МКА) с массой менее 1000 кг. Переход на аппараты данного класса позволяет значительно снизить сроки и затраты на изготовление, открывая перспективную возможность формирования низкоорбитальных спутниковых систем, которые смогут существенно повысить периодичность наблюдения или даже обеспечить непрерывный мониторинг земной поверхности. Однако для повышения разрешения целевой аппаратуры МКА, имеющих определённые ограничения по массе и габаритам, целесообразно снижение высоты их рабочей орбиты до 250...300 км. При этом стоит учитывать, что при движении на данных высотах КА будет испытывать значительное аэродинамическое сопротивление остаточной атмосферы Земли, что в случае отсутствия корректирующей двигательной установки (КДУ) приведёт к заметному снижению САС. Применение для компенсации аэродинамического торможения КДУ с жидкостным ракетным двигателем (ЖРД) повлечёт за собой сокращение массы полезной нагрузки. Поэтому наиболее подходящим в данном случае является использование для коррекции орбиты электроракетных двигательных установок (ЭРДУ).

В настоящее время ЭРДУ на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) успешно эксплуатируются на российских МКА ДЗЗ серии Канопус-В и их модификациях, обеспечивая, при высоте орбиты 500...520 км, пятилетний САС. Однако, с учётом роста требований к сроку службы и тенденции к снижению рабочей орбиты наиболее перспективным для низкоорбитальных МКА становится использование сеточных ионных двигателей (ИД), характеризующихся более высокими, по сравнению с СПД, показателями времени работы и удельного импульса, и потребляющих при отработке того же суммарного импульса меньшее количество рабочего тела (РТ).

В России разрабатывается два типа сеточных ИД, различающихся организацией процесса ионизации атомов РТ: ионные двигатели с ионизацией в разряде постоянного тока (ИДПТ), построенные по схеме Кауфмана, и с ионизацией в безэлектродном разряде - высокочастотные ИД (ВЧИД). Следует отметить, что, хотя эффективность ионизации в разряде постоянного тока выше, чем в переменном электромагнитном поле в ВЧИД, использование индукционного безэлектродного разряда позволяет уйти от проблем, связанных (в случае ИДПТ) с наличием подверженного ионному распылению катода-эммитера, разрушение которого снижает ресурс работы двигателя. Кроме того, при

эксплуатации ВЧИД снижаются требования по чистоте ксенона и в целом появляется возможность использования практически любого РТ. Уменьшается также масса конструкции двигателя и системы его электропитания. Благодаря многочисленным исследованиям по выбору формы, материала и размеров разрядной камеры (РК); по оптимизации параметров индуктора (расположения и способа намотки, количества витков, частоты переменного тока), и ионно-оптической системы (ИОС), современные модели ВЧИД мощностью до 1 кВт, незначительно уступают по характеристикам аналогичным моделям ИДПТ. Это, с учетом очевидных преимуществ по массе и ресурсу, позволяет рекомендовать ВЧИД к использованию в КДУ перспективных низкоорбитальных МКА ДЗЗ с повышенным САС.

При проектировании МКА ДЗЗ необходимо также учитывать, что сила аэродинамического сопротивления на низких орбитах зависит от большого количества различных факторов (времени суток, солнечной и геомагнитной активности, времени года и т.д.) и может изменяться более, чем в 10 раз. Поэтому для снижения запаса РТ двигателя КДУ должны обеспечивать широкий диапазон дросселирования тяги. ВЧИД обладает возможностью регулирования тяги за счёт изменения как вкладываемой высокочастотной (ВЧ) мощности, так и расхода РТ. Но переход на пониженный уровень тяги сопровождается заметным снижением эффективности работы двигателя, что делает поиск и исследование новых способов улучшения характеристик ВЧИД востребованной и актуальной на сегодняшний день задачей.

В целом повышение интегральных параметров ВЧИД возможно, как за счёт оптимизации ИОС по максимальному извлекаемому ионному току, так и за счёт совершенствования рабочего процесса в РК. Одним из основных факторов, негативно влияющих на эффективность ионизации РТ в ВЧИД, является наличие потерь, связанных с амбиполярной диффузией заряженных частиц к стенкам РК, где происходит их активная рекомбинация. Уменьшение данных потерь можно обеспечить за счёт использования в области ВЧ разряда дополнительного постоянного магнитного поля, которое будет снижать подвижность электронов в радиальном направлении, практически не влияя при этом на их движение в сторону ИОС. В результате увеличивается количество ионов, извлекаемых ИОС, что и приведёт в конечном итоге к повышению эффективности работы двигателя. Для оценки возможного улучшения интегральных характеристик ВЧИД за счёт дополнительного постоянного магнитного поля в рамках данной работы был проведён ряд экспериментальных исследований.

Объектом исследования являются лабораторные модели высокочастотного ионного двигателя малой мощности с интегрированным в их конструкцию дополнительным источником постоянного магнитного поля.

Целью работы является разработка рекомендаций по созданию моделей ВЧИД малой мощности с повышенной эффективностью за счёт использования в области ВЧ разряда дополнительного постоянного магнитного поля рупорно-аксиальной конфигурации.

Основные задачи диссертации:

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Разработка различных конструкций дополнительной магнитной системы для исследования характеристик лабораторных моделей ВЧИД малой мощности.
2. Проведение экспериментальных исследований влияния параметров дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики лабораторных моделей ВЧИД.
3. Оценка воздействия на интегральные характеристики лабораторной модели ВЧИД различных конфигураций дополнительной магнитной системы.
4. Исследование влияния дополнительного постоянного магнитного поля на распределение локальных параметров плазмы на выходе из разрядной камеры в сечении вблизи ИОС.
5. Разработка и испытание лабораторной модели ВЧИД малой мощности с дополнительным магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом.
6. Разработка инженерной математической модели для оценки влияния выбора параметров дополнительной магнитной системы на интегральные характеристики ВЧИД.
7. Выработка рекомендаций по созданию моделей ВЧИД малой мощности с повышенной эффективностью.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования интегральных параметров лабораторных моделей ВЧИД малой мощности с дополнительным постоянным магнитным полем, позволяющим повысить эффективность их работы при дросселировании тяги.
2. Результаты исследования распределения локальных параметров плазмы в РК ВЧИД при наличии в области ВЧ разряда дополнительного постоянного магнитного поля.
3. Результаты расчёта параметров плазмы и интегральных характеристик ВЧИД, полученные с использованием разработанной инженерной математической модели.

Методология и методы исследования

В работе применялись эмпирические и теоретические методы исследования. В ходе экспериментов использовались современные методики регистрации параметров ВЧИД и контактного исследования локальных параметров плазмы тройным электростатическим

зондом. Инженерная математическая модель построена с учётом известных принципов теории физики плазмы газового разряда.

Научная новизна результатов исследований:

1. Впервые экспериментально показано, что наличие дополнительного постоянного магнитного поля рупорно-аксиальной геометрии приводит к улучшению интегральных характеристик ВЧИД малой мощности.

2. На основании анализа экспериментальных данных распределений локальных параметров плазмы в выходном сечении РК доказано предположение, обосновывающее улучшение интегральных характеристик модели ВЧИД малой мощности при дросселировании тяги, за счёт эффекта увеличения концентрации и выравнивания температуры электронов по радиусу при наличии рупорно-аксиального магнитного поля.

3. По результатам системных исследований различных конфигураций дополнительного постоянного магнитного поля показано, что его топология, обеспечивающая стабильную работу и улучшение интегральных характеристик ВЧИД малой мощности, в широком диапазоне дросселирования тяги, достигается при значениях индукции осевой и радиальной составляющих на срезе разрядной камеры уровня 0,5 и 0,3 мТл соответственно.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Доказана возможность улучшения интегральных характеристик моделей ВЧИД малой мощности при дросселировании тяги за счёт использования дополнительного постоянного магнитного поля рупорно-аксиальной конфигурации.

2. Определены режимы работы двигателя малой мощности и параметры дополнительного магнитного поля, при которых наблюдается улучшение интегральных характеристик.

3. Экспериментально подтверждена возможность использования постоянного магнита в качестве источника дополнительного рупорно-аксиального магнитного поля в ВЧИД, что снижает массу и упрощает конструкцию двигателя.

4. Предложена инженерная математическая модель, позволяющая с минимальными временными и материальными затратами оценить влияние дополнительного постоянного магнитного поля рупорно-аксиальной конфигурации на интегральные характеристики ВЧИД и на распределение локальных параметров плазмы в его РК.

5. Разработаны рекомендации по созданию моделей ВЧИД малой мощности. Найденные технические решения защищены патентом на полезную модель.

Достоверность приведенных в данной работе результатов исследований обусловлена использованием сертифицированного оборудования и современных, апробированных ранее, методик измерений, сбора и обработки экспериментальных данных.

Экспериментальные результаты, полученные на лабораторных моделях двигателя без использования дополнительного магнитного поля, согласуются с данными исследований других авторов.

Личный вклад соискателя

При непосредственном участии автора:

1. Модернизированы лабораторные модели ВЧИД, в конструкцию которых был интегрирован источник дополнительного постоянного магнитного поля.
2. Проведены все исследования, представленные в данной работе.
3. Произведена обработка экспериментальных данных, на основе которой были построены зависимости различных параметров, позволяющие оценить улучшение характеристик двигателя при использовании дополнительного постоянного магнитного поля.
4. Разработана инженерная математическая модель для оценки влияния дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД и на локальные параметры плазмы в его РК и проведены расчёты для лабораторной модели ВЧИД.

Апробация результатов исследования

Основные результаты экспериментальных исследований обсуждались на семинаре кафедры «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и были доложены на 7-ми российских и международных конференциях: «16-ой и 17-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва, 2017 г., 2018 г.); XLIV и XLV Международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2018 г., 2019 г.); 7-ой Российско-Германской конференции по электроракетным двигателям - новые вызовы (Марбург, 2018 г.); 11-ой конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2018 г.) и на XLIII Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2019 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 9 работ: 3 – статьи в рецензируемых научных изданиях из рекомендованного ВАК перечня; 6 – тезисы докладов на научных конференциях. Получен патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включает в себя 101 рисунок, 16 таблиц, а также список литературы, содержащий 108

наименований. Текст содержит следующие разделы: введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; определен объект исследования, сформулированы цель и основные задачи исследования; отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; обоснована достоверность полученных в работе результатов; указана апробация результатов исследования на семинарах, конференциях и в публикациях автора работы; приведено краткое описание структуры и глав на диссертации.

В первой главе рассмотрено состояние разработки современных ЭРД, пригодных для эксплуатации на низкоорбитальных МКА ДЗЗ. Обоснована возможность использования ВЧИД в качестве исполнительного элемента ЭРДУ для МКА. Обозначены преимущества и недостатки ВЧИД по сравнению с другими типами ИД.

Дано описание принципа работы ВЧИД и его основных конструктивных элементов. Отмечены характерные для данных двигателей параметры плазмы. Проанализирован процесс ионизации в РК ВЧИД и выделены основные факторы, влияющие на эффективность работы двигателя.

Приведен краткий обзор современных подходов к физико-математическому моделированию плазмы индуктивного ВЧ разряда как для ВЧИД, так и для ВЧ технологических устройств.

Рассмотрены основные методы повышения эффективности работы ВЧИД. На основе анализа приведенных в литературе результатов исследований ВЧ источников ионов с дополнительным магнитным полем в области ВЧ разряда был сделан вывод о возможности использования постоянного магнитного поля рупорно-аксиальной конфигурации для повышения эффективности ионообразования в РК ВЧИД. В заключительной части главы сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального оборудования, использованного в работе для исследования лабораторных моделей ВЧИД. Приведена схема испытательного стенда, даны характеристики применяемых измерительных приборов.

Описаны конструкции лабораторных моделей ВЧИД с источниками дополнительного постоянного магнитного поля, процедура исследования их интегральных характеристик, а также методика измерения локальных параметров плазмы в РК. Представлены результаты оценки погрешности измерений.

Экспериментальные исследования проводились в МАИ на стенде с вакуумной камерой объемом 0,4 м³. Безмасляная система откачки стенда обеспечивала поддержание

динамического вакуума во время экспериментов на уровне не ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. В большинстве экспериментов использовались стендовые системы электропитания и подачи РТ. Используемый генератор Seren R601 позволял работать с ВЧ мощностью от 1 до 600 Вт в диапазоне частот от 1,7 до 2,1 МГц. Для минимизации потерь ВЧ мощности во внешней подводящей к двигателю цепи устанавливались механические согласующие устройства. В системах питания рабочим телом использовались расходомеры, тарированные с использованием внесистемной единицы – стандартный кубический сантиметр в минуту (ст. см³/мин, множитель пересчета в массовый расход ксенона – 0,0977 мг/с). Для удобства сравнения полученных результатов с экспериментальными данными других авторов ст. см³/мин использован далее в тексте в качестве единицы, характеризующей расход ксенона.

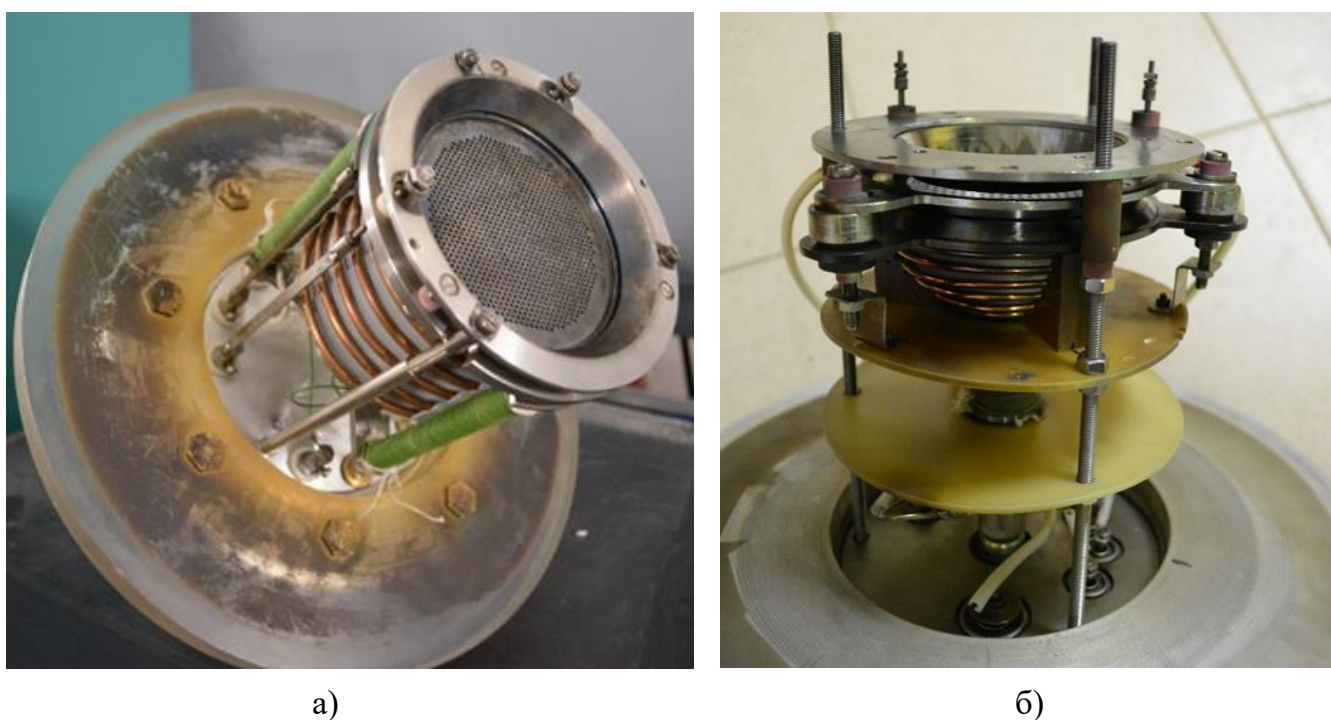


Рисунок 1 – Фотографии лабораторных моделей ВЧИД с интегрированной магнитной системой: а) с диаметром пучка 100 мм; б) с диаметром пучка 80 мм.

Исследовались две лабораторные модели ВЧИД: с диаметром пучка 100 мм, которая была оснащена цилиндрической РК и водоохлаждаемым индуктором, и с диаметром пучка 80 мм с полусферической РК с радиационно-охлаждаемым индуктором. Общий вид исследуемых лабораторных моделей с интегрированными в их конструкцию дополнительными МС показан на фотографиях на рисунке 1. Для каждой из моделей были спроектированы и изготовлены дополнительные магнитные системы с использованием обмоток постоянного тока. Для 100 мм образца была изготовлена комплексная магнитная система (МС), охватывающая РК и включающая в себя магнитопровод, выполненный из магнитопроводящей стали марки СТ-3 и четыре обмотки – 3 боковых и 1 центральную. За счёт сложной конструкции в МС формировалось два магнитных полюса, одним из которых

являлся газовод, а другим – фланец фиксации эмиссионного электрода. На 80 мм двигателе в качестве источника дополнительного магнитного поля использовалась только одна обмотка, которая была сцентрирована и зафиксирована вне РК вокруг газовода. В обоих случаях магнитные системы создавали в объёме РК рупорно-аксиальную конфигурацию дополнительного постоянного магнитного поля, что было подтверждено натурным моделированием и численными расчётами в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

В разделе главы, посвящённом описанию методики исследования интегральных характеристик ВЧИД, представлены процедура проведения эксперимента и результаты оценки погрешности измерений, а также приведены соотношения для расчёта интегральных параметров двигателя – тяги, удельного импульса, коэффициента использования рабочего тела (КиРТ), цены иона и тягового КПД.

Для оценки влияния дополнительного постоянного магнитного поля на эффективность работы ВЧИД регистрировались как традиционные для данного типа двигателей гиперболические зависимости вкладываемой ВЧ мощности от расхода РТ при постоянном извлекаемом токе ионного пучка (при отсутствии и при наличии дополнительного магнитного поля), так и зависимости величины извлекаемого тока от расхода и ВЧ мощности при различных значениях тока в обмотке МС. Также, для некоторых режимов работы двигателя, оценивалось влияние силы тока в обмотке МС на извлекаемый ток ионного пучка.

Исследование локальных параметров плазмы в одном из сечений РК лабораторной модели ВЧИД с диаметром пучка 80 мм при наличии и при отсутствии дополнительного магнитного поля производилось с использованием методики измерения токов тройным электростатическим зондом, которая не требует каких-либо активных или пассивных мер компенсации ВЧ помех, что значительно упрощает проведение эксперимента и обработку полученных результатов. Для обеспечения наименьшего искажения экспериментальных данных во время зондовых измерений при выборе геометрии коллекторов зонда были учтены характерные для ВЧИД параметры плазмы и наличие дополнительного постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований лабораторных моделей ВЧИД.

Первая серия экспериментов была осуществлена на лабораторной модели с диаметром пучка 100 мм и цилиндрической РК. В результате испытаний данной модели двигателя было подтверждено, что наличие дополнительного постоянного магнитного поля в области РК приводит к увеличению извлекаемого ионного тока пучка до 15 мА (в диапазоне от 50 до 200 мА, что соответствовало дросселированию тяги от 3,3 до 13,2 мН)

при одних и тех же значениях подаваемой ВЧ мощности и расхода РТ. Однако в некоторых случаях, при переходе на высокие значения извлекаемого ионного тока пучка – свыше 200 мА, было обнаружено снижение величины извлекаемого ионного тока при наличии дополнительного магнитного поля. В области существования положительного эффекта были определены значения силы тока в обмотках дополнительной МС, которые соответствовали максимальному улучшению параметров двигателя. Оптимальные токи в обмотке МС лежали в диапазоне 0,6...0,9 А. С использованием полученных данных были построены зависимости по постоянному току ионного пучка при наличии и при отсутствии дополнительного магнитного поля. Анализ этих зависимостей показал, что для обеспечения одного и того же значения извлекаемого ионного тока при наличии дополнительного магнитного поля требуется меньший расход РТ – на ~ 1 ст. см³/мин, при фиксированной ВЧ мощности. Это в свою очередь приводит к повышению КиРТ, которое на данной лабораторной модели при некоторых режимах работы достигало 10 %. Прирост тягового КПД составлял от 0,6 до 6 %, а удельного импульса от 580 до 5700 м/с. С учётом достигнутого положительного эффекта последующие эксперименты проводились с использованием модели-прототипа двигателя малой мощности, отличием которой был не только меньший диаметр пучка – 80 мм, но и наличие полусферической РК с радиационно-охлаждаемым индуктором.

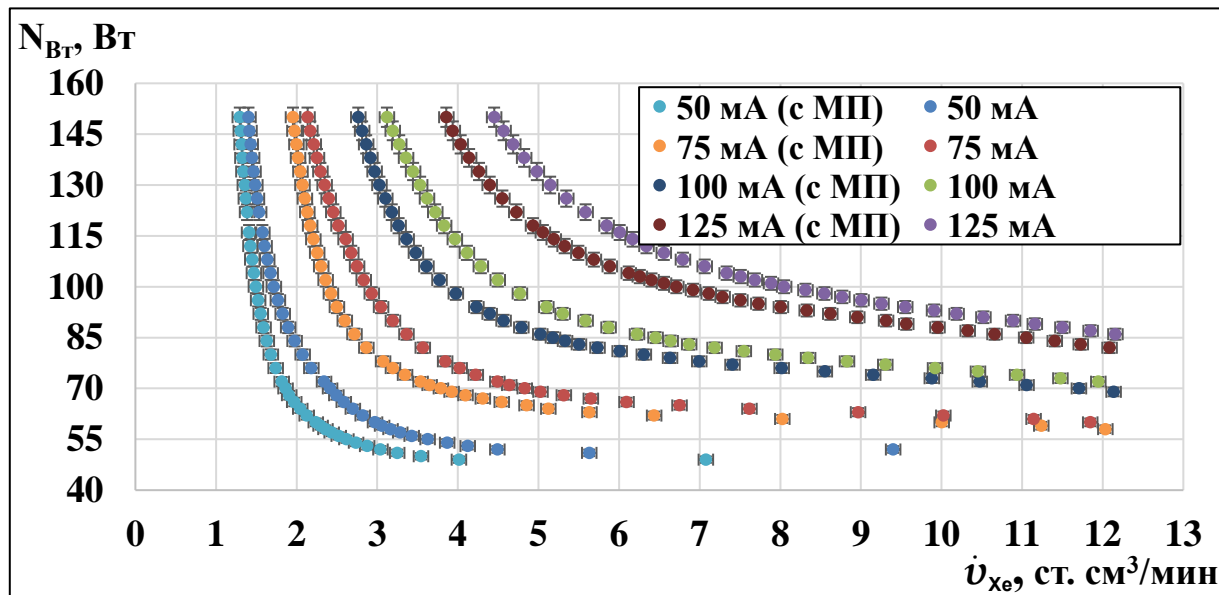


Рисунок 2 – Зависимости ВЧ мощности от расхода ксенона для лабораторной модели с диаметром пучка 80 мм при наличии и при отсутствии дополнительного магнитного поля.

При исследовании лабораторной модели с диаметром пучка 80 мм положительное влияние дополнительного постоянного магнитного поля наблюдалось во всём рассматриваемом диапазоне режимов работы. Однако прирост извлекаемого ионного тока был несколько ниже – незначительно превышая 10 мА. Отсутствие магнитного полюса у

дополнительной МС привело к повышению оптимального значения силы тока в ее обмотке до ~ 9 А. Эффективность работы двигателя при наличии и при отсутствии дополнительного магнитного поля оценивалась, аналогично предыдущим сериям экспериментов, с использованием экспериментальных кривых-зависимостей по постоянному току ионного пучка, представленных на рисунке 2.

Как и на модели двигателя большего диаметра было зафиксировано, что дополнительное магнитное поле приводит к снижению требуемого, для обеспечения заданного ионного тока, расхода РТ при фиксированной ВЧ мощности, либо к уменьшению ВЧ мощности при сохранении одного и того же расхода РТ. Максимальное влияние магнитного поля наблюдалось в области изгиба гиперболических кривых-зависимостей, где реализуются оптимальные по эффективности режимы работы ВЧИД. Экономия РТ в данном случае также оказалась небольшой – менее 1 ст. см³/мин. Прирост интегральных характеристик модели при рассматриваемых режимах работы составил: КиРТ в диапазоне 1...8 %, тягового КПД – 1...5 %, а удельного импульса от 300 до 4700 м/с.

При анализе результатов экспериментов было сделано предположение, что причиной повышения эффективности работы лабораторных моделей ВЧИД при наличии в области ВЧ разряда дополнительного постоянного магнитного поля являлось увеличение плотности плазмы в их РК. Для подтверждения этой гипотезы было проведено измерение локальных параметров плазмы в модели двигателя с диаметром пучка 80 мм.

Исследование локальных параметров плазмы производилось в сечении РК отстоящем от ИОС на расстоянии 7 мм при трёх различных режимах работы лабораторной модели, эквивалентных току извлекаемого ионного пучка 50, 75 и 100 мА. Из-за необходимости использования во время зондовых исследований гальванической развязки, обеспечиваемой с использованием разделительного трансформатора, в экспериментах потребовалось снижение потенциала эмиссионного электрода ИОС до величин не более 750 В (пробойное напряжение обмоток трансформатора). С учётом этого для каждого рассматриваемого режима по извлекаемому току пучка было подобрано такое значение потенциала на эмиссионном электроде, которое обеспечивало бы наиболее стабильную работу двигателя. При этом напряжение на ускоряющем электроде выбиралось в соответствии с наименьшей величиной тока перехвата.

Верификация результатов зондовых измерений произведена путем сравнения полученных радиальных распределений концентрации и температуры электронов при отсутствии дополнительного магнитного поля с данными других авторов. Были отмечены как качественные, так и количественные совпадения полученных данных.

На рисунках 3 и 4 представлены типичные радиальные распределения концентрации и температуры электронов при различной силе тока в дополнительной обмотке для режима: ВЧ мощность 98 Вт и расход ксенона 3,98 ст. см³/мин.

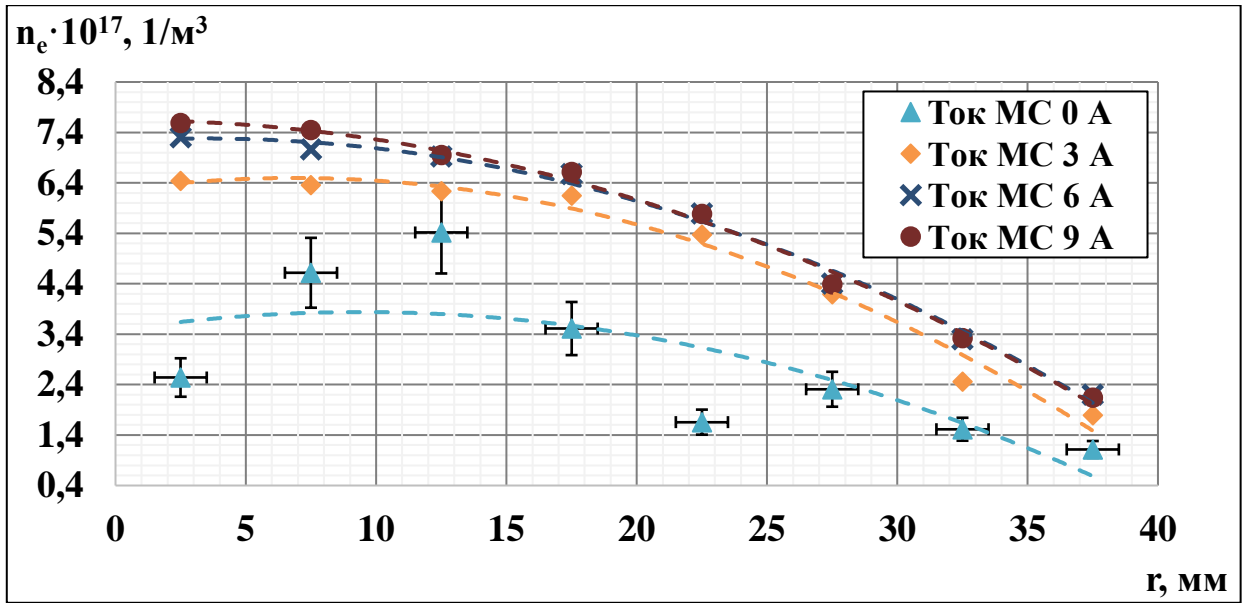


Рисунок 3 – Распределение концентрации электронов по радиусу РК.

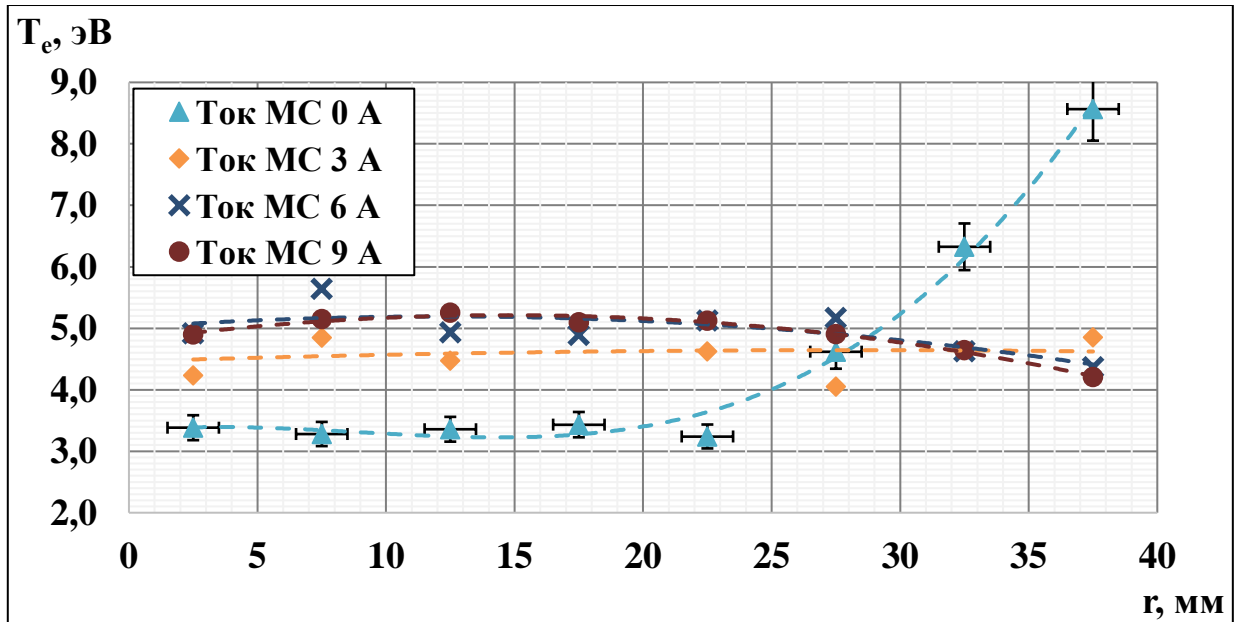


Рисунок 4 – Распределение температуры электронов по радиусу РК.

Анализ представленных на рисунках данных показывает, что наличие постоянного магнитного поля (увеличение силы тока в обмотке МС) приводит к заметному перераспределению локальных параметров плазмы по радиусу РК. Так концентрация электронов возрастает в основном в центре РК, где находится максимум индукции дополнительного постоянного магнитного поля. Температура электронов при этом выравнивается по радиусу камеры. В остальных исследованных режимах работы двигателя при наличии дополнительного постоянного магнитного поля наблюдался схожий характер изменения локальных параметров плазмы. На основании анализа полученных результатов был сделан вывод о подтверждении гипотезы о том, что причиной роста эффективности

ионизации лабораторных моделей ВЧИД является повышение концентрации электронов в совокупности с увеличением температуры в центральном объеме РК.

Следующим этапом исследования было сравнение трёх схем МС с целью поиска её наиболее эффективной конфигурации с точки зрения повышения интегральных характеристик двигателя. На лабораторной модели ВЧИД с диаметром пучка 80 мм были испытаны бесполусная, однополусная и двухполусная МС. В бесполусной схеме использовалась только обмотка постоянного тока, расположенная на оси двигателя. Однополусная схема включала в себя дополнительный магнитный полюс часть которого находилась около РК в районе газоподвода. Двухполусная схема была аналогична рассматриваемой ранее МС на лабораторной модели ВЧИД с диаметром пучка 100 мм и имела магнитопровод. В результате в объёме РК формировалось два «активных» магнитных полюса: газораспределитель и фланец для фиксации эмиссионного электрода. Сравнение эффективности рассматриваемых конфигураций МС производилось по величине прироста КиРТ и извлекаемого ионного тока пучка. Для оценки прироста КиРТ при наличии и при отсутствии дополнительного магнитного поля регистрировались кривые-зависимости ВЧ мощности от расхода РТ по постоянному току пучка. При использовании МС в каждой исследуемой точке подбиралась оптимальная сила тока в обмотке, соответствующая максимальному улучшению характеристик. Результат сравнения усреднённых значений прироста КиРТ при рассматриваемых величинах извлекаемого ионного тока приведен на рисунке 5. По результатам данного сравнения был сделан вывод о том, что наиболее эффективным при создании моделей двигателей является использование бесполусной схемы МС, так как почти при равном улучшении характеристик она обладает меньшей массой. Кроме того, на лётных образцах двигателей целесообразен переход на постоянные магниты, так как это не потребует добавления дополнительной системы электропитания и в целом положительно скажется на энергетической эффективности и надёжности двигателя. Для проверки возможности работы с постоянным магнитом была проведена дополнительная серия экспериментов.

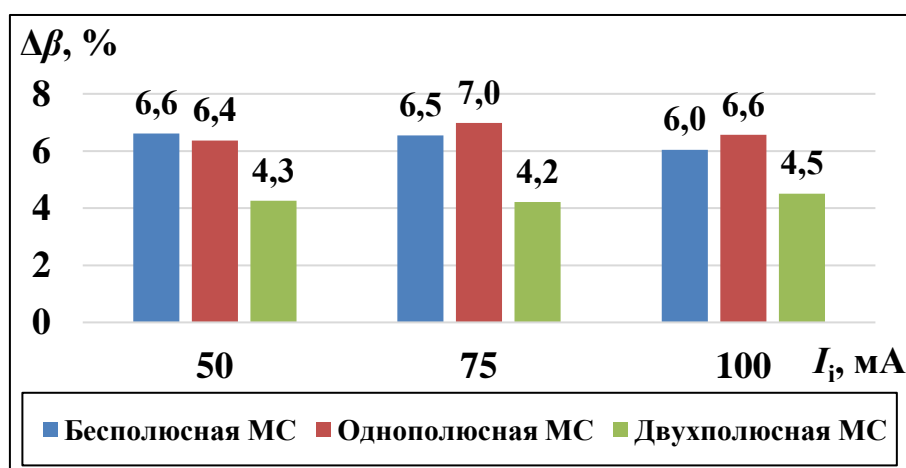


Рисунок 5 – Сравнение прироста КиРТ при использовании различных МС.

На лабораторной модели двигателя с диаметром пучка 80 мм было установлено кольцо из магнитотвердого сплава (ЮНДК 24). Для обеспечения максимально возможного улучшения интегральных характеристик в COMSOL Multiphysics, с учётом параметров магнита (геометрических размеров и индукции магнитного поля), было определено наилучшее его расположение относительно РК. Критерием для выбора являлось распределение индукции магнитного поля на срезе РК, которое должно было соответствовать экспериментально подтверждённому оптимальному режиму работы МС на основе обмотки постоянного тока. Полученные в результате кривые зависимости ВЧ мощности от расхода РТ по постоянному току ионного пучка при наличии и при отсутствии дополнительного магнита в конструкции двигателя приведены на рисунке 6.

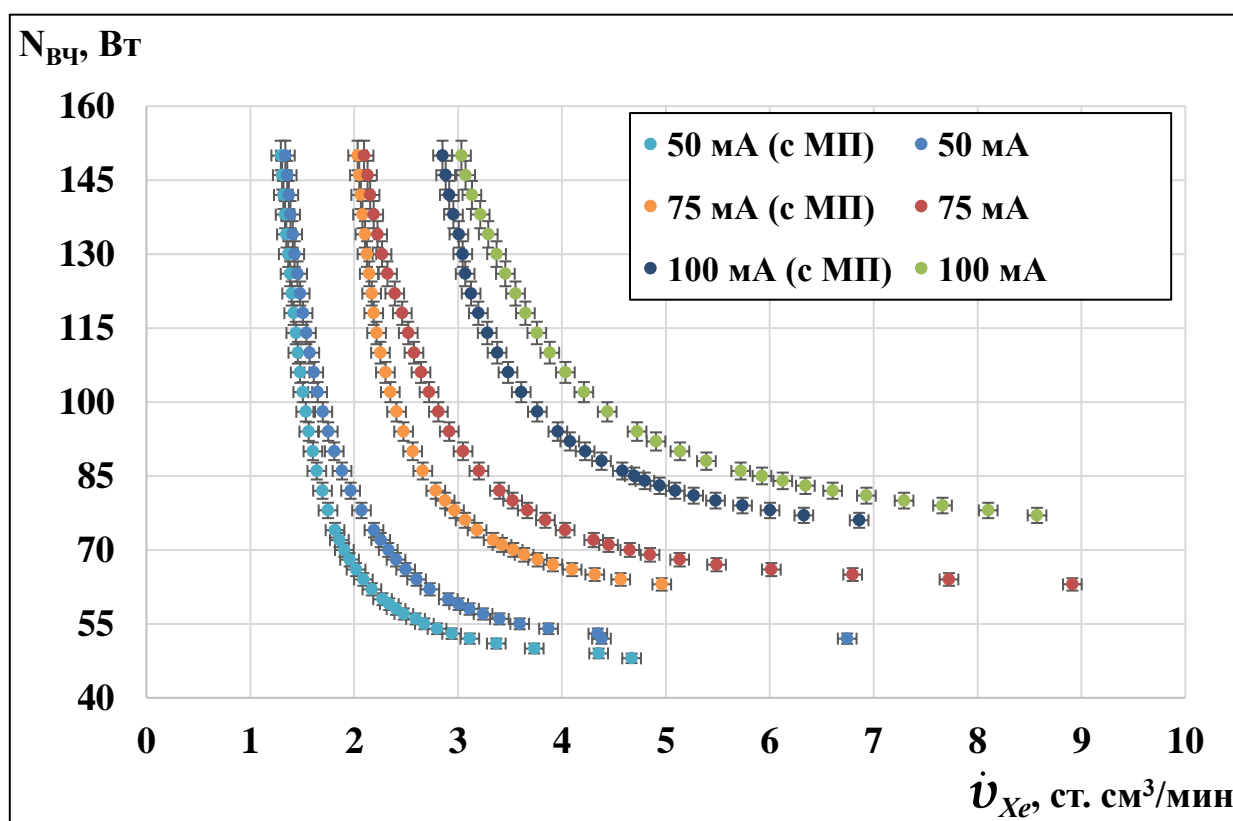


Рисунок 6 – Сравнение интегральных характеристик лабораторной модели ВЧИД с постоянным магнитом.

Использование в контрольных испытаниях ВЧ генератора с автоподстройкой частоты производства «Авант-Спейс Системс» позволило оценить потери во внешнем согласующем контуре и более точно определить тяговый КПД лабораторной модели ВЧИД. С учетом этого были построены зависимости, представленные на рисунке 7.

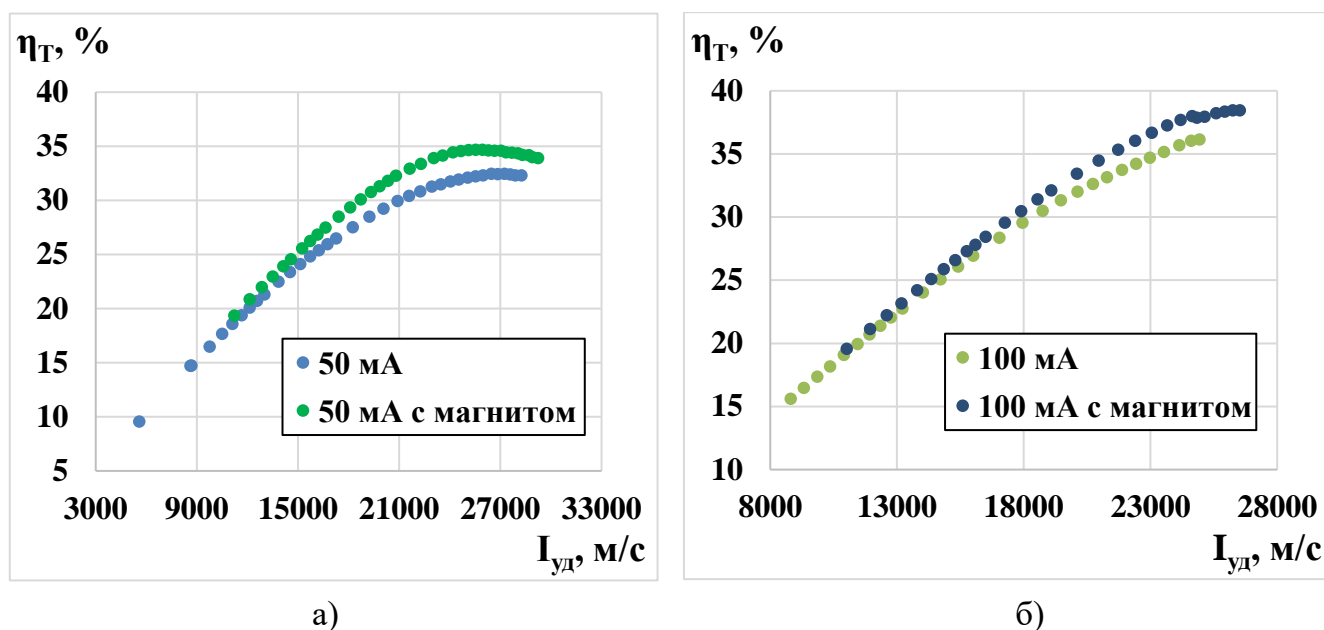


Рисунок 7 – Сравнение зависимости тягового КПД от удельного импульса при наличии и при отсутствии постоянного магнита: а) для извлекаемого ионного тока 50 мА ($P = 3,7$ мН); б) для извлекаемого ионного тока 100 мА ($P = 7,4$ мН).

Анализ результатов показал, что при использовании постоянного магнита были достигнуты практически те же параметры, что и в МС с обмоткой постоянного тока. Дополнительное магнитное поле приводит как к увеличению тягового КПД, так и к приросту удельного импульса. При работе на одной и той же вкладываемой ВЧ мощности тяговый КПД возрастает на 1,6...5%, а удельный импульс на 800...4000 м/с. При этом положительный эффект присутствует во всех исследуемых режимах работы, что позволяет использовать предложенную конфигурацию постоянного магнита для улучшения интегральных характеристик аналогичных моделей ВЧИД.

Обобщая результаты исследований, были сформулированы рекомендации по проектированию ВЧИД с дополнительным постоянным магнитным полем:

1. Топология дополнительного постоянного магнитного поля должна быть рупорно-аксиальной (максимум на оси РК) со значениями индукции осевой и радиальной составляющей этого поля на срезе РК на уровне 0,5 и 0,3 мТл соответственно.

2. Наиболее эффективным является использование бесплюсовой и однополюсной схемы дополнительной магнитной системы. Двухполюсная обеспечивает меньший положительный эффект и при этом имеет большую массу по сравнению с другими конфигурациями МС (для лабораторной модели ВЧИД с диаметром пучка 80 мм масса магнитопровода двухполюсной МС составляла около 300 г, у однополюсной – около 150 г, при массе двигателя ~ 1 кг). Чтобы обеспечить максимальное улучшение интегральных характеристик (наблюдается при использовании однополюсной схемы МС) практически не

влияя на общую массу двигателя, в качестве магнитного полюса целесообразно использовать газораспределитель.

3. Для улучшения энергомассовых характеристик ЭРДУ на основе ВЧИД в качестве источника дополнительного постоянного магнитного поля необходимо использовать постоянный магнит.

4. Материал постоянного магнита необходимо выбирать с учётом диапазона рабочих температур в месте его размещения возле газораспределителя (по экспериментальным данным во время работы двигателя нагрев может достигать 150...180°C). Наиболее подходящими являются магниты из сплава ЮНДК (максимальная рабочая температура 540 °C) или самарий кобальта (максимальная рабочая температура до 300 °C). Использование этих материалов позволит как избежать проблем с перегревом, так и обеспечить необходимую индукцию магнитного поля при компактных габаритах.

Четвертая глава посвящена описанию инженерной математической модели ВЧИД, позволяющей с минимальными временными и материальными затратами оценивать влияние дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД и на распределение локальных параметров плазмы в его РК. Для расчёта использовалась осесимметричная двумерная постановка задачи, которая решалась с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics.

При формировании модели были использованы следующие допущения:

- функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) соответствует максвелловской;
- во всём объёме плазмы соблюдается условие квазинейтральности ($n_e = n_i$);
- все выпадающие на стенки РК заряженные частицы рекомбинируют и возвращаются в объём плазмы в виде нейтральных атомов;
- при расчёте не учитываются процессы объёмной перезарядки и рекомбинации;
- нейтральные частицы имеют постоянную температуру во всём объёме РК, которая равна температуре стенки;
- для заряженных частиц используется приближённое к МГД описание;
- при расчёте используется упрощённая геометрия основных элементов двигателя (РК, индуктора, газораспределителя и ИОС) без учёта свойств их материала;
- при моделировании плазмы не учитывается ёмкостная составляющая разряда, которая может существовать за счёт межвитковых «паразитных» ёмкостей;
- модель не учитывает распространение волн в плазме.

Для получения распределения концентрации атомов по объёму РК и оценки количества нейтральных частиц, проходящих через ИОС, используется приближённое аналитическое решение для одномерной задачи о течении газа в трубе:

$$\operatorname{div} \left(\frac{u_{aT}^2 l}{4(u_{aT} + n_e \langle \sigma_i \vartheta \rangle l)} \operatorname{grad} n_a \right) = n_a n_e \langle \sigma_i \vartheta \rangle, \quad (1)$$

где u_{aT} – тепловая скорость атомов РТ, [м/с]; l – характерный линейный размер плазменного образования (в данной модели равен радиусу РК), [м]; n_e – концентрация электронов, [1/м³]; $\langle \sigma_i \vartheta \rangle$ – коэффициент ионизации, [м³/с]; n_a – концентрация атомов РТ, [1/м³]. Оно получено в предположении, что при отсутствии ионизации поток нейтральных частиц пропорционален градиенту давления.

На стенках РК задаётся граничное условие «непротекания» атомов и ионов РТ:

$$n_a u_{a\perp} + n_i u_{i\perp} = 0, \quad (2)$$

где $u_{a\perp}$ и $u_{i\perp}$ – перпендикулярные к стенке РК компоненты скорости атомов и ионов РТ, [м/с].

Для расчёта концентрации заряженных частиц в плазме используется следующее упрощённое соотношение:

$$\nabla^2 n_i = -2,5 \frac{M_i}{kT_e} (n_a \langle \sigma_i \vartheta \rangle)^2 n_i \quad (3)$$

Граничное условие на стенках РК и ИОС берётся с учётом решения Бома:

$$\frac{\partial n_i}{\partial x_n} = -2,5 \sqrt{\frac{M_i}{kT_e}} n_i n_a \langle \sigma_i \vartheta \rangle, \quad (4)$$

где x_n – нормаль к поверхности ИОС; M_i – масса иона РТ, [кг]; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Для получения распределения заряженных частиц, учитывающего наличие дополнительного постоянного магнитного поля, к результату расчёта n_i по соотношению (3) вводится поправочный коэффициент:

$$n_{i\text{мп}} = n_i e^{-\frac{e^2 A_C^2}{18 m_e k T_e}}. \quad (5)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд; A_C – векторный магнитный потенциал дополнительного постоянного магнитного поля, [Вб/м]; m_e – масса электрона, [кг]; T_e – температура электронов, [К].

Величина амплитудной скорости электронов, которую они приобретают в вихревом электрическом поле определяется следующим соотношением

$$\frac{u_{e0}^4}{2} (n_a \sigma_{ea})^2 + u_{e0}^2 \frac{3kT_e}{m_e} (n_a \sigma_{ea})^2 + u_{e0}^2 \omega^2 = \left(\frac{e \omega A_{ind}}{m_e} \right)^2, \quad (6)$$

где σ_{ea} – транспортное сечение упругого рассеяния электронов на атомах РТ, [м²]; ω – круговая частота ВЧ поля, [рад/с]; A_{ind} – амплитудное значение векторного магнитного потенциала, создаваемого индуктором, [Вб/м].

Распределение эффективной температуры электронов, включающей в себя как тепловую энергию, так и кинетическую энергию направленного движения, которую электроны набирают в азимутальном вихревом электрическом поле, рассчитывается как:

$$T_{eff} = T_e + \frac{e^2 \omega^2 A_{ind}^2}{6km_e(\omega^2 + \nu_{ea}^2)} K_{МП} \quad (7)$$

где ν_{ea} – частота электрон-атомных столкновений; $K_{МП}$ – безразмерный поправочный коэффициент, характеризующий изменение распределения эффективной температуры в РК при наличии дополнительного постоянного магнитного поля. Частота электрон-атомных столкновений определяется как:

$$\nu_{ea} = n_a \sigma_{ea} \sqrt{\frac{3kT_e}{m_e} + \frac{u_{e0}^2}{2}}. \quad (8)$$

Для определения температуры электронов T_e используется уравнение баланса энергии, в котором подводимая мощность от индуктора (левая часть) приравнивается к энергозатратам на ионизацию атомов РТ и потерям заряженных частиц на стенках РК и ИОС (правая часть):

$$\begin{aligned} & \int_V (\nu_{ea} + \nu_{ei}) n_{iМП} \frac{m_e u_{e0}^2}{4} dV = \\ & = \int_S n_{iМП} u_i \left(e \varepsilon_{eff} + \frac{3}{2} k T_{eff} + k T_e + e \Delta \varphi + \frac{5}{2} k T_w \right) dS, \end{aligned} \quad (9)$$

где ν_{ei} – частота электрон-ионных столкновений, [1/м³]; $u_i = \sqrt{\frac{eT_e}{M_i}}$ – боровская скорость ионов, [м/с]; ε_{eff} – эффективная энергия ионизации, [эВ]; $\Delta \varphi$ – пристеночный перепад потенциала, [В]; T_w – температура стенки РК, [К].

Величина извлекаемого ИОС ионного тока определяется как:

$$I_i = e \sigma_{\varepsilon\varepsilon} \int_{S_{иос}} n_{iМП} u_i dS_{иос} = 2\pi e \sigma_{\varepsilon\varepsilon} \int_0^R n_{iМП} u_i r dr. \quad (10)$$

При реализации данной инженерной модели используется метод оптимизации Нелдера-Мида, который при варьировании начальных параметров T_e , n_i и n_a , с заданной точностью (до второго знака после запятой) проверяет выполнение условия баланса энергии (9). При отсутствии баланса происходит переход к новой итерации, что повторяется до тех пор, пока не будет обеспечена требуемая сходимость расчёта.

На рисунках 8 и 9 представлено сравнение экспериментальных и полученных в результате расчёта зависимостей извлекаемого ионного тока пучка от подаваемой ВЧ генератором мощности при отсутствии и при наличии дополнительного постоянного магнитного поля для расхода ксенона 3 ст. см³/мин при различных значениях КПД индуктора, характеризующего эффективность передачи ВЧ мощности в плазму.

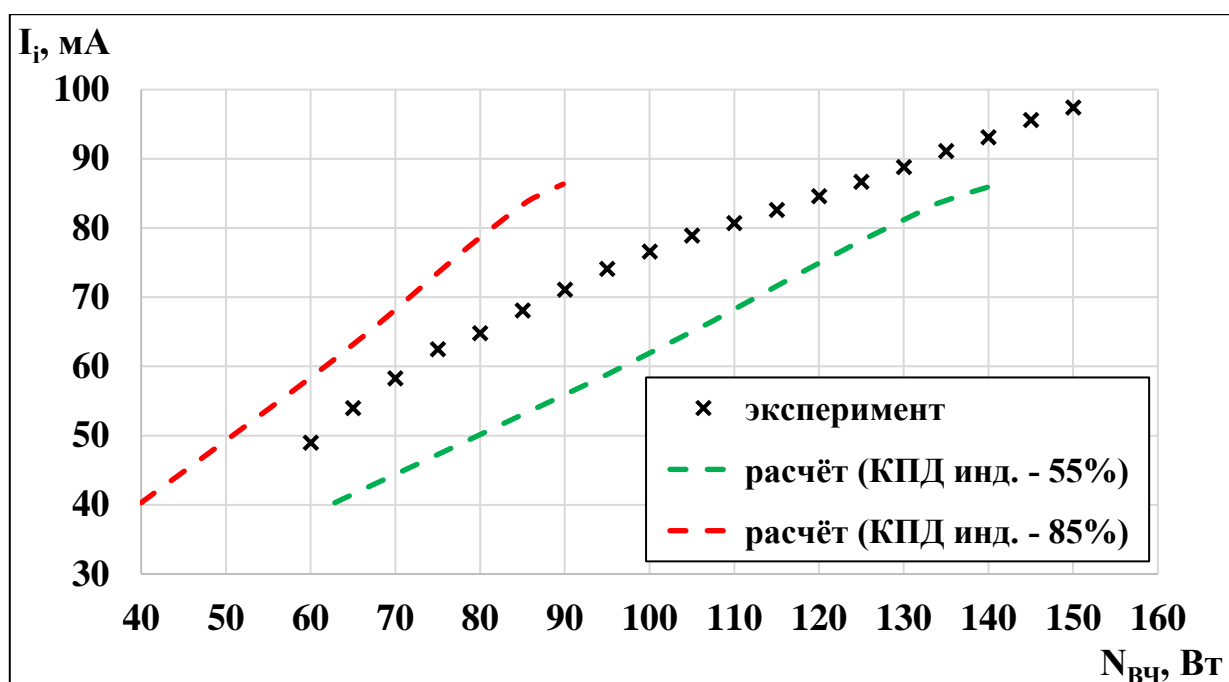


Рисунок 8 – Сравнение расчётной зависимости извлекаемого ионного тока с экспериментальными данными.

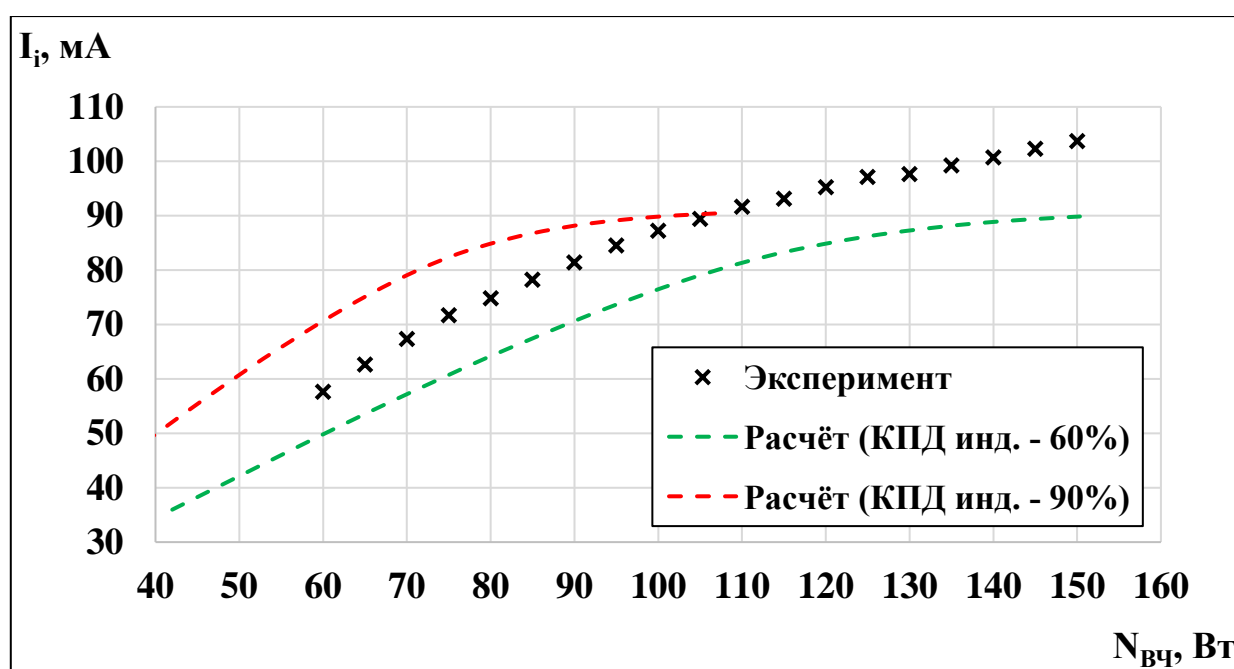


Рисунок 9 – Сравнение расчётной зависимости извлекаемого ионного тока от ВЧ мощности с экспериментальными данными, при наличии дополнительного магнитного поля (ток в дополнительной обмотке 9А).

Для оценки предсказательной способности модели при учёте влияния величины индукции дополнительного магнитного поля на интегральные характеристики, для трёх режимов работы были построены расчётные зависимости извлекаемого ионного тока от силы тока в дополнительной обмотке.

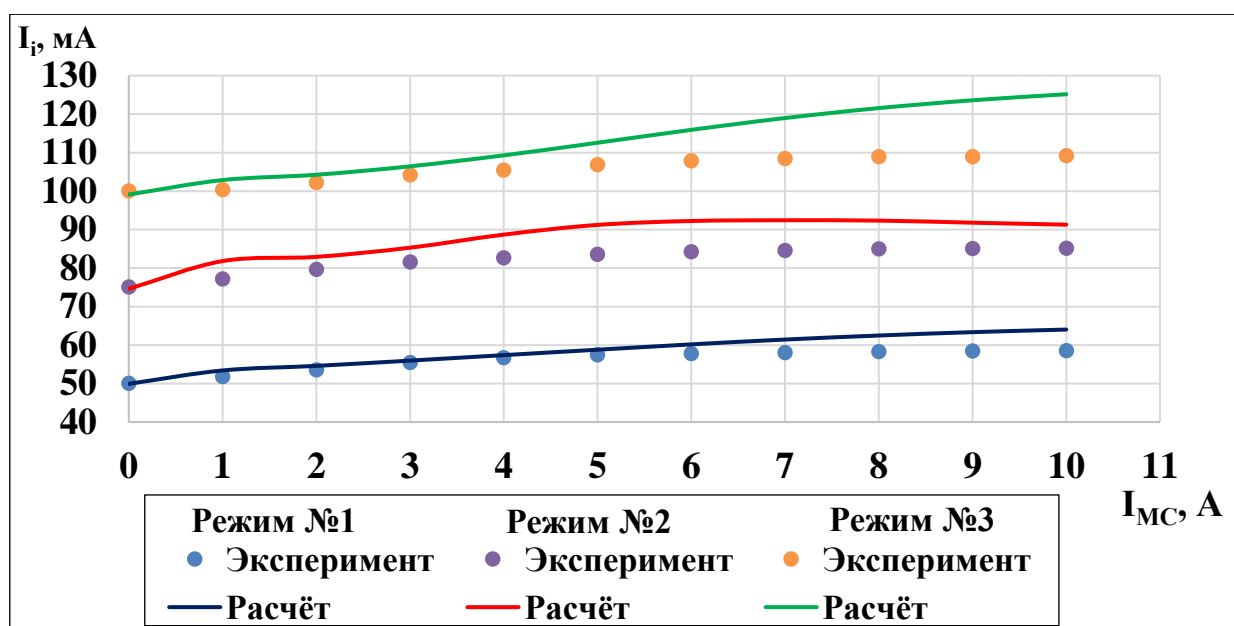


Рисунок 10 – Сравнение расчётной и экспериментальной зависимостей величины извлекаемого ионного тока от силы тока в дополнительной обмотке (режим: №1 – 60 Вт ВЧ мощности и расход 3,07 ст. см³/мин; №2 – 90 Вт ВЧ мощности и расход 3,18 ст. см³/мин; №3 – 90 Вт ВЧ мощности и расход 5,14 ст. см³/мин).

Характер расчётных зависимостей хорошо согласуется с экспериментальными данными (погрешности не превышают 20 %). Инженерная модель позволяет оценить и распределения локальных параметров плазмы в объёме РК. Для примера на рисунках 11 и 12 представлено сравнение расчётных и экспериментально полученных на одном из режимов работы радиальных распределений концентрации и температуры электронов.

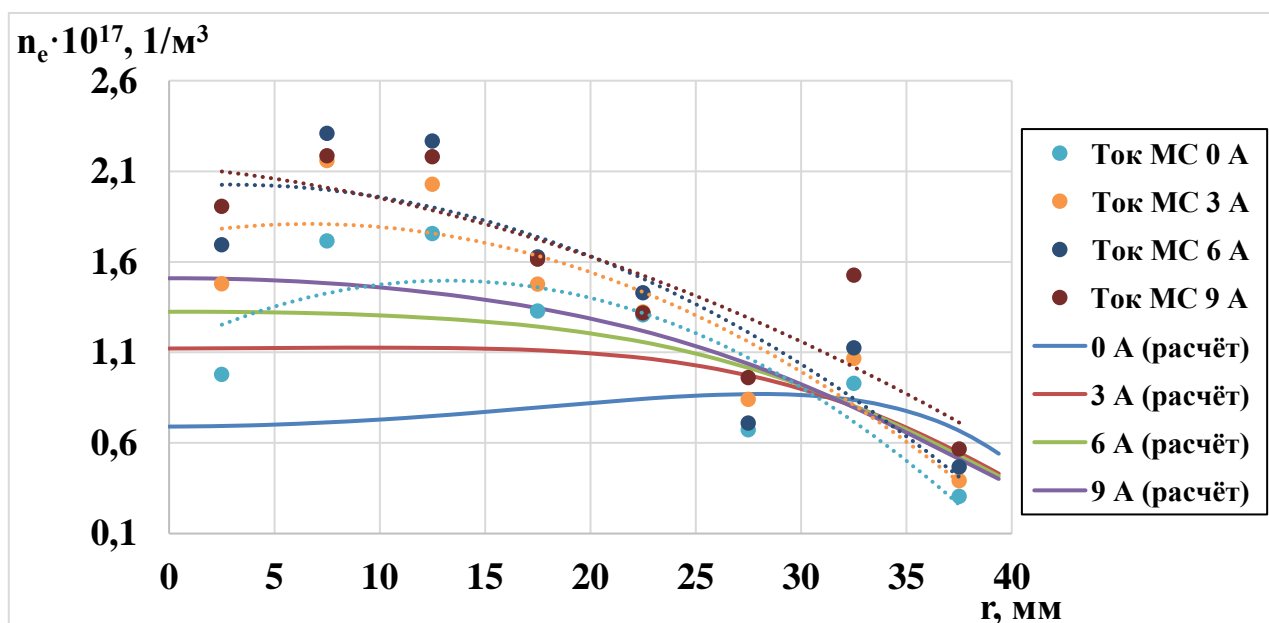


Рисунок 11 – Сравнение экспериментальных и расчётных распределений концентрации электронов по радиусу РК.

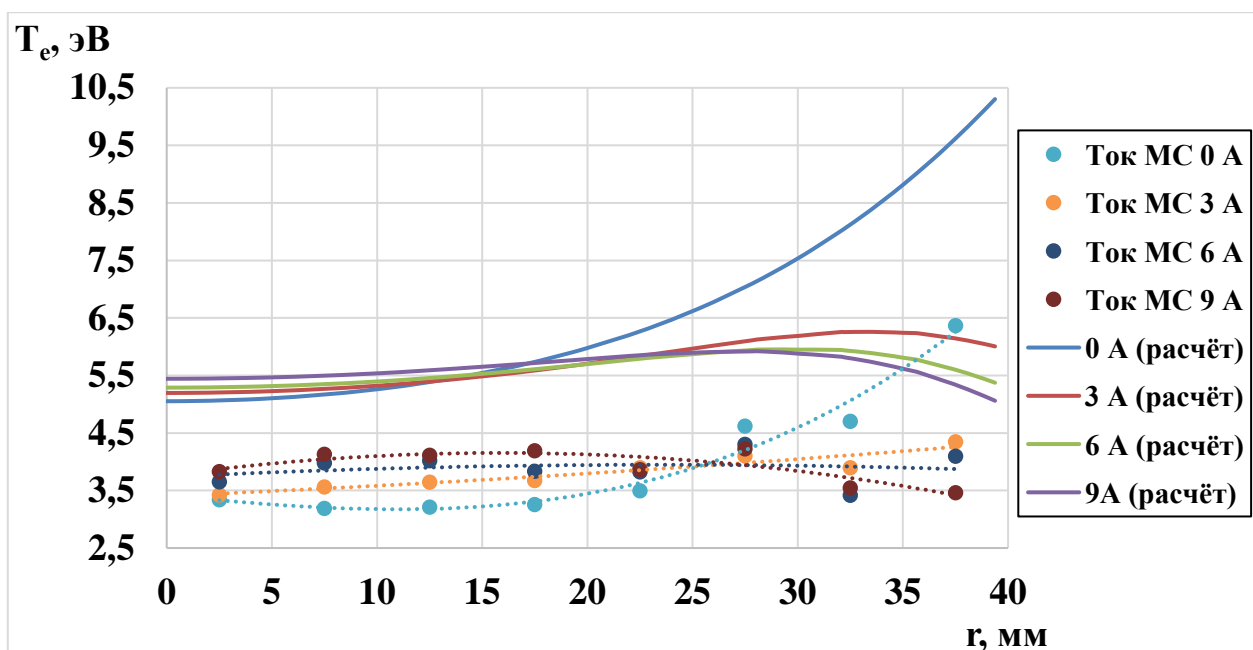


Рисунок 12 – Сравнение экспериментальных и расчётных распределений температуры электронов (в расчёте определяется эффективной температурой) по радиусу РК.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что разработанная инженерная модель может быть использована для качественной оценки изменения локальных параметров плазмы в объёме РК при наложении дополнительного постоянного магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении поставленных в диссертации задач были получены следующие результаты:

1. Проведённая модификация лабораторных моделей ВЧИД малой мощности с диаметром пучка 80 и 100 мм, в ходе которой в конструкцию были интегрированы дополнительные магнитные системы с обмотками постоянного тока, позволила повысить их интегральные характеристики такие как: коэффициент использования рабочего тела, тяговый КПД, удельный импульс, а также снизить цену иона.

2. Исследование распределений локальных параметров плазмы в модифицированном двигателе показало, что эффект от применения дополнительного постоянного магнитного поля связан с увеличением, в сечении разрядной камеры в области эмиссионного электрода ИОС, концентрации заряженных частиц до $3 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^3$ (концентрация без дополнительного магнитного поля составляла $2 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^3$), а также с повышением температуры электронов на оси на $0,5 \dots 1,5 \text{ эВ}$ (без дополнительного постоянного магнитного поля она составляла около $3,3 \text{ эВ}$) и её выравниванием по радиусу камеры.

3. Оптимизация работы моделей по уровню извлекаемого из двигателя ионного тока позволила сформулировать основные рекомендации по проектированию ВЧИД с

дополнительной магнитной системой, а именно: построение с использованием постоянных магнитов рупорно-аксиальной геометрии магнитного поля со значениями индукции осевой и радиальной составляющей этого поля на срезе разрядной камеры на уровне 0,5 и 0,3 мТл соответственно. Созданная с учетом этого лабораторная модель ВЧИД малой мощности обеспечила стабильную работу в широком диапазоне дросселирования по тяге (с 3,7 по 7,4 мН). При этом было достигнуто увеличение коэффициента использования рабочего тела на 5...6 % при постоянной ВЧ мощности и снижение цены иона на 100...200 Вт/А при фиксированном значении коэффициента использования рабочего тела. Тяговый КПД в зависимости от режима работы ВЧИД увеличился на 1,6...5 %, а удельный импульс на 800...4000 м/с.

4. Разработанная инженерная математическая модель, позволяет относительно быстро оценивать влияние дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД и на распределение локальных параметров плазмы в его РК. Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными при наличии и при отсутствии дополнительного постоянного магнитного поля показало, что в исследуемом диапазоне тяг погрешность оценки интегральных характеристик составляет не более 20...25%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях:

1. Белоусов А.П., Мельников А.В., Хартов С.А. Модель динамики электронов в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя // Труды МАИ. –2017. –№ 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80974> .
2. Мельников А.В., Хартов С.А. Экспериментальное исследование высокочастотного ионного двигателя с дополнительным магнитным полем // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2018. №3. – С. 4–11.
3. Кожевников В.В., Мельников А.В., Назаренко И.П., Хартов С.А. Высокочастотный ионный двигатель с дополнительной магнитной системой // Известия Российской академии наук. Энергетика. –2019. –№3. – С. 40–51.

Патенты:

4. Патент на полезную модель №159636 РФ. Ионно-плазменный двигатель / Гаврюшин В.М., Мельников А.В., Смирнова М.Е., Фейли Д., Хартов С.А. Заявитель: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — № 2015121080. Заявка от 03.06.2015. Опубликовано 20.02.16. Бюл № 5.

Другие публикации:

5. Мельников А.В., Хартов С.А. Исследование характеристик высокочастотного ионного двигателя при наличии дополнительного внешнего постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда // *Авиация и космонавтика* – 2017: сб. тез. 16-ой международной конференции (Москва, 20–24 ноября 2017). – М.: Типография «Люксор», 2017. – С. 108–109 (732 с.).
6. Мельников А.В. Исследование работы высокочастотного ионного двигателя с полусферической камерой при наличии внешнего магнитного поля // *Гагаринские чтения – 2018: сб. тез. докл. XLIV международной молодежной научной конференции* (Москва, 17–20 апреля 2018). – М.: Изд-во МАИ, 2018, – Т. 1. – С. 187 (393 с.).
7. Кожевников В.В., Мельников А.В., Хартов С.А. Диагностика локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя тройным электростатическим зондом // *Современные средства диагностики плазмы и их применение: сб. тез. докл. XI конференции* (Москва, НИЯУ МИФИ, 13-15 ноября 2018). – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 61–64 (196 с.).
8. Кожевников В.В., Мельников А.В., Хартов С.А. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя с дополнительным магнитным полем // *Авиация и космонавтика* – 2018: сб. тез. 17-ой международной конференции (19-23 ноября 2018). – М.: Типография «Люксор», 2018. – С. 90–91 (740 с.).
9. Кожевников В.В., Мельников А.В., Хартов С.А. Диагностика локальных параметров плазмы высокочастотного ионного двигателя с дополнительной магнитной системой // *Королёвские чтения: сб. тез. докл. XLIII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства* (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 29 января-1 февраля 2019). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. –Т. 1. – С. 97–99 (420 с.).
10. Мельников А.В. Экспериментальное исследование влияния конфигурации дополнительной магнитной системы на интегральные характеристики высокочастотного ионного двигателя // *Гагаринские чтения – 2019: сб. тез. докл. XLV международной молодежной научной конференции* (Москва, 16-19 апреля 2019). – М.: Изд-во МАИ, 2019. – С. 171–172 (1345 с.).