

На правах рукописи



НИГМАТЗЯНОВ ВЛАДИСЛАВ ВАДИМОВИЧ

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
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, ФГУП
"Центральный научно-исследовательский
институт машиностроения", ведущий научный
сотрудник

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

Защита состоится «11» декабря 2017 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)»

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=83933

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.08
доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последнее время тенденции в развитии современных и перспективных космических аппаратов (КА) связаны с ростом их энерговооруженности и сроков активного существования, увеличением полезной нагрузки, расширением номенклатуры КА по массе (от «кубсатов» до тяжелых спутниковых платформ). Все это обуславливает расширение задач для бортовой двигательной установки (ДУ), повышение требований к двигателям с точки зрения их эффективности, надежности и совместимости с подсистемами КА.

Для большинства перспективных задач космической техники возникает потребность в создании двигателей нового поколения, характеризующихся, в частности, более высоким значением удельного импульса тяги (до 20000...30000 м/с и выше), высоким КПД и длительным временем работы. Решение этих задач возможно при использовании электроракетных двигателей (ЭРД). К настоящему времени созданы различные типы ЭРД, отличающиеся как способом ускорения рабочего тела, так и режимом работы (импульсный или непрерывный). Среди всех модификаций ЭРД наиболее высоким удельным импульсом тяги обладают электростатические двигатели (ЭСД). В ЭСД рабочее тело в виде положительно заряженных частиц (ионов) ускоряется в электростатическом поле. На выходе из двигателя струя ионов нейтрализуется потоком электронов, истекающих из нейтрализатора, с целью сохранения нулевого электрического потенциала КА. Классическим представителем ЭСД является ионный двигатель (ИД). В нем функционально разделены область генерации плазмы – разрядная камера (РК) и область ускорения ионов – ионно-оптическая система (ИОС). Для ионизации рабочего тела применяются электрический разряд постоянного тока – ИД по схеме Кауфмана, или высокочастотный разряд (ВЧ) – высокочастотный ионный двигатель (ВЧ ИД). Последний имеет некоторые преимущества перед ИД по схеме Кауфмана, а именно:

- в разрядной камере ВЧ ИД в отличие от ИД схемы Кауфмана реализуется безэлектродный индукционный ВЧ разряд, предотвращающий распыление ионами материала стенок РК и эмиссионного электрода ИОС за счет низких значений потенциала плазмы по отношению к окружающим элементам конструкции;
- отсутствие катода в РК, также повышает ресурсные характеристики и надежность ВЧ ИД, упрощает конструкцию, технологию изготовления и эксплуатацию двигателя;
- в ВЧ ИД отсутствует необходимость в удерживании электронов в разряде для увеличения эффективности генерации ионов дополнительным магнитным

полем, что избавляет от наличия дополнительного тяжелого узла магнитной системы;

- тягой ВЧ ИД легко управлять, задавая значения, как расхода рабочего тела, так и подведенной ВЧ мощности;
- в разрядной камере ВЧ ИД количество многократно ионизованных атомов не превышает 1%, вследствие низкой температуры электронов, что существенно увеличивает его энергетическую эффективность.

Вместе с тем ВЧ ИД обладает и некоторыми недостатками, среди которых наиболее существенным является величина затрат мощности на ионизацию, составляющая 300-400 Вт/А в сравнении с 150-200 Вт/А у ИД по схеме Кауфмана, что приводит к снижению полного КПД двигателя.

С учетом этого, актуальной и востребованной задачей для разработок перспективных моделей ВЧ ИД является снижение затрат на ионизацию и, тем самым, повышение его конкурентоспособности в сравнении с ИД по схеме Кауфмана.

Диссертационная работа посвящена анализу влияния конструктивных элементов РК на интегральные характеристики двигателя. Выбор направления исследования основан на недостаточной изученности влияния конструкции РК на характеристики двигателя и, в частности, на ионообразование.

Актуальность представляемой работы обусловлена:

- необходимостью снижения энергетических потерь в ВЧ ИД при получении заданного ионного тока (тяги двигателя);
- необходимостью выработки рекомендаций для проектирования разрядных камер высокочастотных ионных двигателей и реализации их в практических конструкциях;

Объектом исследования является разрядная камера высокочастотного ионного двигателя.

Целью работы является повышение степени ионизации рабочего тела ВЧ ИД за счет более эффективного ввода ВЧ мощности в разрядную камеру и, как следствие, увеличение ионного тока двигателя.

Основные задачи диссертации – для достижения цели в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Исследование влияния способа намотки индуктора на ионизацию в высокочастотном разряде.
2. Исследование влияния формы разрядной камеры на величину ионного тока двигателя.
3. Определение влияния материала РК на эффективность ионизации в ее объеме.

4. Разработка математической модели, связывающей интегральные характеристики двигателя с параметрами плазмы в РК и ее верификация с использованием экспериментальных данных, в том числе полученных другими авторами.
5. Выработка рекомендаций для проектирования разрядных камер ВЧ ИД.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования влияния расположения витков индуктора и формы разрядной камеры на величину ионного тока ВЧ ИД.
2. Математические модели (балансовая, численные: одномерная и двумерная) оценки интегральных характеристик высокочастотного ионного двигателя.
3. Данные сравнительного анализа результатов моделирования, проведенного по разработанным моделям, с экспериментальными данными.
4. Рекомендации по проектированию разрядных камер высокочастотных ионных двигателей.

Методы исследования

В работе использованы экспериментальные и теоретические методики. При экспериментальных исследованиях использовались современные методы регистрации параметров и математической статистики для обработки результатов. Теоретические исследования по анализу процессов ионизации в плазме высокочастотного разряда проводились на основе общеизвестных положений теорий магнитной гидродинамики и электродинамики.

Научная новизна результатов исследования:

1. Получены экспериментальные данные о зависимости ионообразования в ВЧ ИД от геометрии индуктора и формы разрядной камеры.
2. Экспериментально показано отсутствие влияние материала керамических стенок разрядной камеры ВЧ ИД на энергозатраты при образовании ионов.
3. Разработана математическая модель связи интегральных характеристик ВЧ ИД и параметров разряда в РК, предложен упрощенный алгоритм расчета энергозатрат для данной схемы двигателя.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Предложены и теоретически обоснованы пути повышения эффективности высокочастотных ионных двигателей при изменении формы разрядной камеры и способа намотки индуктора.
2. Разработана математическая модель связи интегральных характеристик ВЧ ИД и параметров разряда в РК, позволяющая с минимальными временными и материальными затратами определять основные размеры разрядной камеры.

3. Продемонстрирована возможность изготовления стенок разрядной камеры ВЧ ИД из различных керамик с малыми радиационными потерями, позволяющих снизить затраты на изготовление РК при исследовательских испытаниях двигателя.
4. Выработаны рекомендации по проектированию разрядных камер ВЧ ИД.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается тем, что экспериментальная часть работы выполнялась на сертифицированном оборудовании с применением современных методик сбора и обработки данных. Полученные результаты сопоставлялись с данными независимых исследователей. Численное моделирование параметров разряда верифицировано по результатам экспериментальных исследований.

Личный вклад автора в проведенное исследование

Соискатель провел исследования по влиянию материала стенок РК на характеристики двигателя. Провел выбор схемы согласующего устройства между ВЧ-генератором и индуктором для достижения максимальной эффективности работы модели ВЧ ИД в ходе экспериментов. Исследовал воздействие расположения витков индуктора на характеристики разряда и влияние геометрии высокочастотной разрядной камеры на интегральные параметры двигателя. Принимал непосредственное участие в разработке математической модели рабочего процесса в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использованы при выполнении опытно-конструкторской работы «Высокочастотный ионный двигатель НИИ ПМЭ», составной части ОКР «Разработка ЭРДУ мощностью до 1 кВт на базе холловского или ионного двигателя». Результаты работы также использованы в рамках проблемного научного исследования: «Разработка лабораторного образца электрического ракетного двигателя, использующего в качестве рабочего тела атмосферную среду для низкоорбитальных космических аппаратов», а также в учебном процессе.

Апробация результатов

Результаты исследований, изложенных в диссертации, представлены в трех научно-технических отчетах, двух патентах и двух статьях в рецензируемых журналах из рекомендованного ВАК РФ перечня, в статье в рецензируемом зарубежном издании. Основные результаты работы обсуждались на семинарах кафедры «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» Московского авиационного института (национального

исследовательского университета) МАИ, а также НТС НИИ прикладной механики и электродинамики МАИ. Результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях: «10-ая и 11-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2011 г., 2012 г.); «Актуальные Проблемы Российской Космонавтики XXXVII-ые Академические чтения по космонавтике» (Москва, 2013 г.); «5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsions - New Challenges» (Дрезден 2014 г.); «6th Russian-German Conference «Electric Propulsion and Their Application» (Самара 2016 г.); «Space Propulsion 2014», (Кельн, 2014 г.); «Space Propulsion 2016», (Рим, 2016 г.); «Третья неделя молодого ученого в Новосибирске – «Авиация и космос», (Новосибирск, 2013 г.)

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертационная работа изложена на 142 машинописных страницах, содержит 78 рисунков, 3 таблицы, список литературы включает в себя 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию необходимости диссертационного исследования. Обоснована актуальность темы исследования, выбран объект исследования, сформулированы цели, основные задачи и методы исследования, рассмотрена научная новизна, практическая значимость, реализация и внедрение, результаты апробации и оценка достоверности результатов работы, кратко рассмотрено содержание глав диссертации.

В первой главе диссертации обсуждаются современные тенденции разработки и применения электроракетных двигателей. Отмечена актуальность создания ЭРД с высоким удельным импульсом, в частности ЭСД. Показаны преимущества высокочастотного ионного двигателя, а также проблемы, которые необходимо решить для повышения его конкурентоспособности перед другими типами ЭРД.

Приведена схема ВЧ ИД и рассмотрены физические процессы, происходящие в разрядной камере данного двигателя.

Определены основные направления повышения эффективности ВЧ ИД, обоснована актуальность исследования рабочих процессов в разрядной камере данного двигателя.

Вторая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию лабораторной модели ВЧ ИД. Во время проведения испытаний двигателя задавалось значение мощности ВЧ-генератора, напряжения на электродах. В ходе

экспериментов регистрировался ионный ток пучка и ток перехвата на ускоряющий электрод ИОС, который составлял незначительную величину в сравнении с током пучка и при анализе эффективности ввода ВЧ-мощности не учитывался.

В первой части данной главы приведена схема экспериментального стенда и даны характеристики измерительных приборов, их погрешности. Все экспериментальные исследования в работе проводились на модели ВЧ ИД с трехэлектродной ИОС, с диаметром ионного пучка 100 мм. Как было установлено в экспериментах, проведенных в рамках этой работы, наиболее эффективная, с точки зрения генерации ионов в РК, частота ВЧ-поля для данного типоразмера двигателя составляла 1,8...2 МГц. Для каждой серии экспериментов проводилась подстройка частоты генератора в указанном диапазоне с целью получения максимального ионного тока пучка. Для эффективной работы стендового генератора ВЧ использовалось согласующее устройство (СУ), обеспечивающее минимум отраженной мощности в цепи индуктора. Использование СУ при стендовых испытаниях неизбежно приводит к потере в нем подводимой ВЧ-мощности и повышению цены иона. Для ВЧ-генераторов летного исполнения может быть использован другой алгоритм согласования – за счет автоподстройки частоты. При этом СУ и связанные с ним потери устраняются, что приводит к снижению цены иона. Схема стендового СУ, обеспечивающая наименьшие потери мощности при передаче от ВЧ-генератора в плазму, показана на рисунке 1. Также исследовалась возможность использования других схем СУ, однако потери мощности в них были выше.

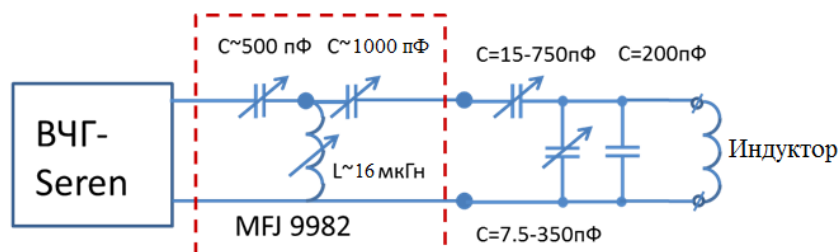


Рисунок 1 – Схема стендового СУ в цепи индуктора ВЧ ИД (ВЧГ- Seren – ВЧ генератор R1001 мощностью до 1 кВт, MFJ 9982 – антенный аттенюатор).

Во второй части главы представлены результаты исследования влияния материала разрядной камеры на работу ВЧ ИД. Было проведено сравнение четырех материалов: традиционных – кварцевое стекло и оксид алюминия Al_2O_3 , а также более простых в производстве – нитрида кремния Si_3N_4 и керамического композита – смеси оксида алюминия и нитрида кремния в пропорции 1:1. Все эти материалы объединяет малый коэффициент поглощения электромагнитного излучения. Результаты исследования показали отсутствие (в пределах точности измерений) какого-либо значительного влияния данных материалов на характеристики

лабораторной модели двигателя. С учетом этого можно рекомендовать для снижения стоимости отработки моделей ВЧ ИД на этапе экспериментальных исследований использование для изготовления РК нитрида кремния, как технологию изготовления, обеспечивающую меньшие затраты по сравнению с РК из окиси алюминия, которая применяется для летной эксплуатации.

В третьей части главы представлены результаты исследования влияния количества витков индуктора и способа их намотки на процессы ионизации в РК. Для этого была изготовлена специальная лабораторная модель двигателя с цилиндрической РК и диаметром пучка 100 мм, показанная на рисунке 2. Ее отличительной особенностью является применение подвижных дистанционаторов, позволяющих менять число витков и регулировать их положение относительно ИОС, изменяя их шаг и смещение.

Исследовался индуктор с одиннадцатью, семью, пятью и тремя витками. Для каждого количества витков рассматривались различные способы их намотки – расположения относительно ИОС. Были определены лучшие с точки зрения ионообразования в РК способы намотки для каждого случая и проведено сравнение между ними. Сопоставление ионообразования проводилось по величине ионного тока пучка при заданном расходе рабочего тела и ВЧ-мощности. Показано, что имеет место существенное влияние расположения индуктора по отношению к ионно-оптической системе на величину ионного тока пучка. Так, малое расстояние между первым витком и ИОС ведет к ухудшению характеристики двигателя – падает ионный ток. Более того, расположение всего индуктора вблизи ИОС значительно снижает ионный ток. Наиболее предпочтительной геометрией индуктора для цилиндрической РК служит та, при которой индуктор намотан в средней или донной части, либо равномерно по длине камеры, но при этом ближайший виток к ИОС не должен располагаться ближе 10 мм от нее. При увеличении числа витков индуктора наблюдается снижение затрат ВЧ-мощности при том же значении ионного тока. Наибольший прирост ионного тока замечен при переходе от трех витков к пяти, что показано на рисунке 3. Однако увеличение количества витков индуктора от семи до одиннадцати уже не приводит к снижению затрат мощности. Такой характер зависимостей наблюдался для всех экспериментов. На рисунке 4, для ионного тока пучка равного 70 мА, для



Рисунок 2 – Лабораторная модель с дистанционаторами (показано максимальное исследованное число витков – 11).

пятивиткового индуктора, показано влияние расположения витков по отношению к ИОС. Аналогичные зависимости были получены и для других исследованных типов индуктора.

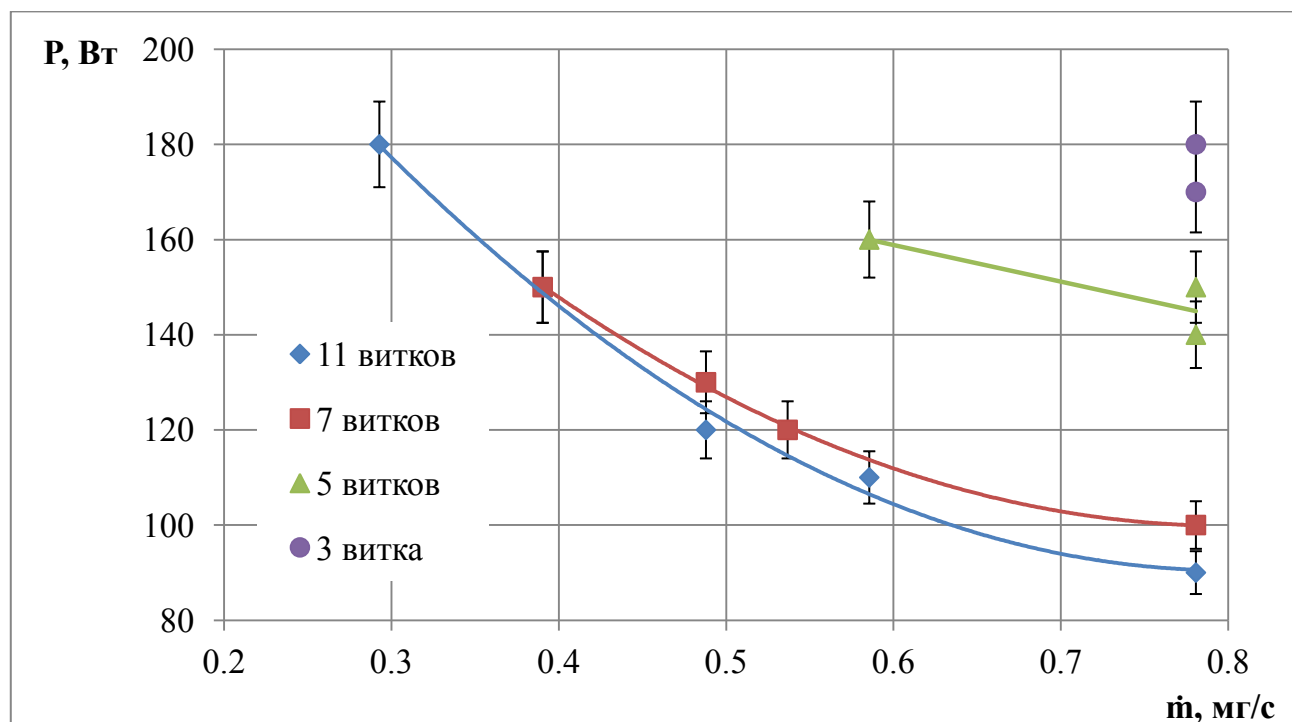


Рисунок 3 – Зависимость ВЧ-мощности от расхода рабочего тела для четырех вариантов индуктора при значении ионного тока пучка равного 100 мА.

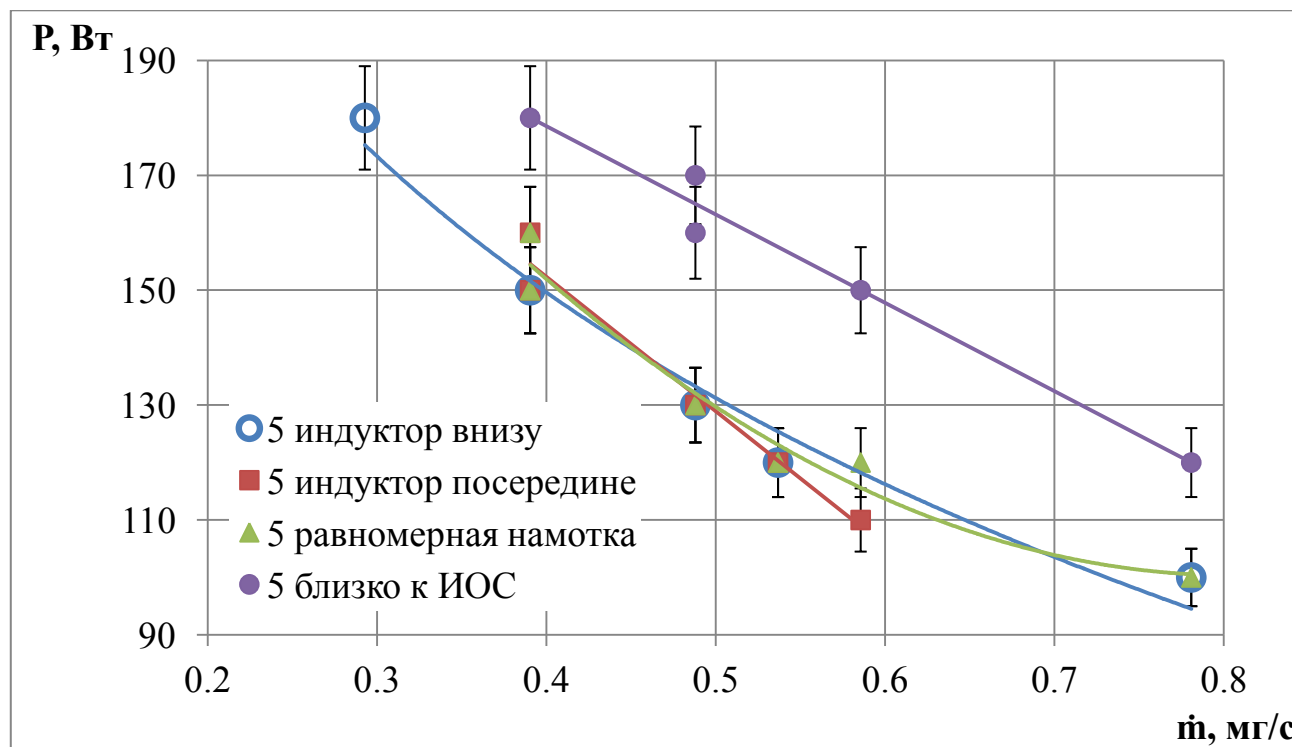


Рисунок 4 – Зависимость ВЧ-мощности от расхода рабочего тела для четырех вариантов намотки пятивиткового индуктора при значении ионного тока пучка равного 70 мА.

Как видно из рисунка 4, положение индуктора относительно ИОС и способ его намотки, не оказывают влияние на затраты мощности для получения необходимых значений ионного тока. Исключение составляет расположение индуктора в выходной части РК (максимальное приближение к ИОС), когда потери ВЧ-мощности для одинаковых значений расходов рабочего тела возрастают на 15...17%.

Таким образом, для данной лабораторной модели двигателя, было найдено оптимальное, с точки зрения затраченной ВЧ-мощности, число витков и их расположение. Исходя из полученных результатов, были выработаны рекомендации по намотке индуктора: витки должны располагаться с равномерным заполнением поверхности боковой стенки, и межвитковым расстоянием порядка 1...2 диаметра прутка. При этом витки индуктора не должны близко прилегать к металлическим частям конструкции двигателя.

В четвертой части главы приводятся результаты исследований влияния формы РК на ионный ток пучка для двух цилиндрических, длиной 45 и 65 мм, полусферической и конической форм разрядной камеры. Диаметр ионного пучка для всех типов РК был одинаковым и равнялся 100 мм. Количество витков индуктора было выбрано равным семи, материалом для всех РК, кроме цилиндрической с длиной 65 мм, был керамический композит – смесь оксида алюминия и нитрида кремния в пропорции 1:1, для РК длиной 65 мм – окись алюминия. Было проведено сравнение цилиндрических РК с полусферической, а затем полусферической и конической между собой.

На рисунке 5 показаны результаты сравнения затрат мощности для цилиндрических РК с полусферической для ионного тока пучка равного 150 мА, 130 мА и 110 мА. Из представленных на рисунке 5 данных следует, что использование РК полусферической формы существенно снижает затраты мощности для получения заданного ионного тока. В дополнение на рисунке 6 представлены результаты сравнения затрат мощности для полусферической и конической РК. Ионный ток пучка, как и в предыдущем случае, был равен 150 мА, 130 мА и 110 мА. Как видно из рисунка 6, затраты мощности для получения необходимого ионного тока пучка двигателя с РК полусферической формы оказываются ниже, чем с РК конической формы. Однако это снижение существенно меньше, в сравнении с переходом от цилиндрических форм РК к полусфере. На определенных режимах, затраты мощности для обоих РК близки. Эксперименты показали, что затраты на ионообразование снижаются при уменьшении площади стенок РК, за исключением площади ИОС. Поэтому можно констатировать, что наиболее перспективной с точки зрения увеличения эффективности является полусферическая форма РК. Для разрядных камер большого диаметра (например, для разрабатываемых в настоящее время моделей ВЧ ИД с РК диаметром более 200 мм) предпочтительнее использовать коническую форму в силу технологической простоты ее изготовления.

Размеры конической РК (длина и угол конусности) могут быть выбраны такими, что затраты на ионизацию в ней будут сопоставимы с затратами в полусферической РК.

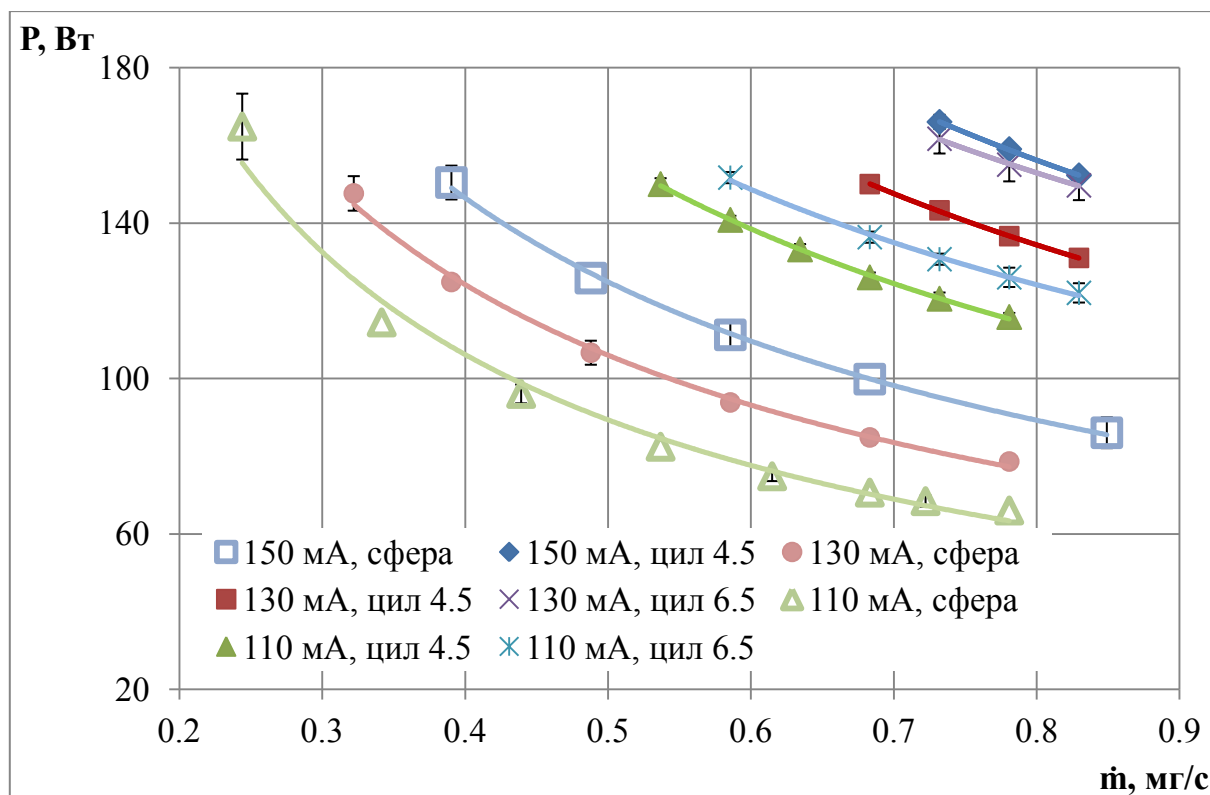


Рисунок 5 – Зависимость ВЧ-мощности от расхода рабочего тела для трех типов РК при постоянном значении ионного тока пучка.

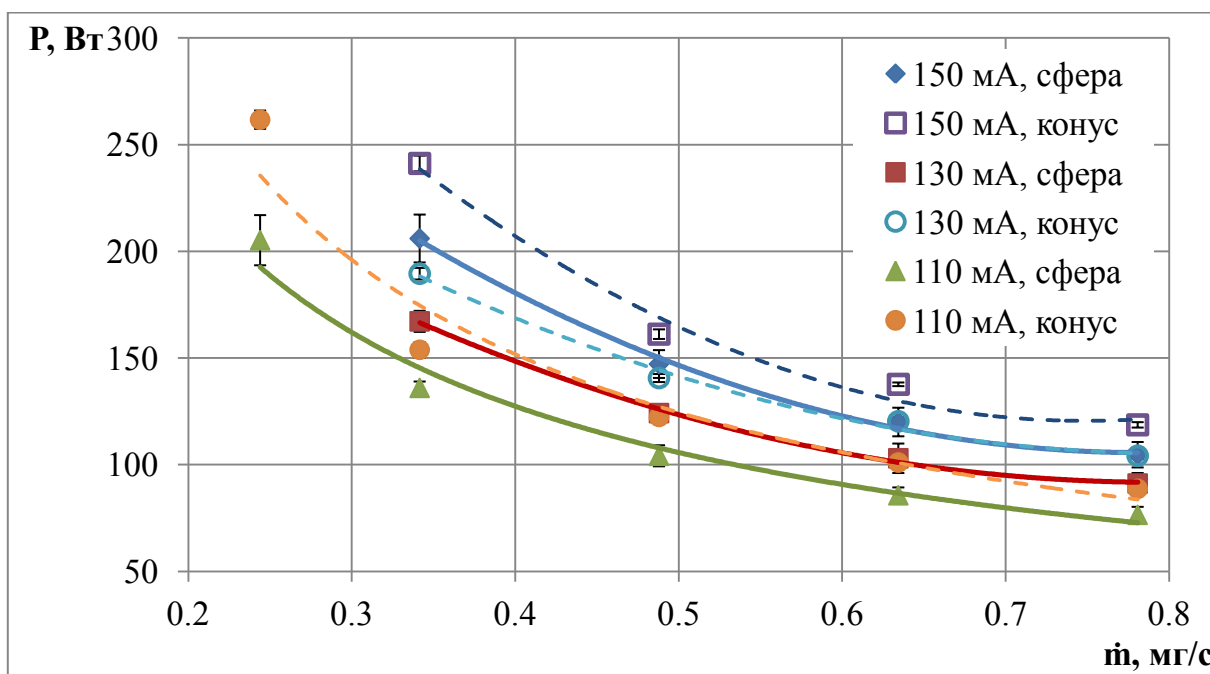


Рисунок 6 – Зависимость ВЧ-мощности от расхода рабочего тела для двух типов РК при постоянном значении ионного тока.

В пятой части второй главы по результатам экспериментальных исследований лабораторной модели ВЧ ИД сформулированы следующие рекомендации для конструкции разрядной камеры с учетом ее формы и намотки индуктора:

1. В качестве материала стенок РК целесообразно использовать диэлектрики с малым тангенсом угла диэлектрических потерь. При прохождении через такой диэлектрик затухание электромагнитной волны крайне мало. Рекомендуется использовать в первую очередь керамики на основе окиси алюминия (различные виды корундов) из-за их прочностных свойств.
2. Расположение витков индуктора (не менее 7) на боковой поверхности РК должно быть равномерным, с шагом порядка одного диаметра прутка между ними. Витки должны полностью покрывать поверхность стенок РК. Индуктор должен отстоять на ~ 10 мм от кольцевых токопроводящих частей конструкции двигателя, особенно элементов ионно-оптической системы. Толщина стенки камеры должна быть минимально возможной из прочностных соображений (~ 5 мм и менее) в целях обеспечения максимальной передачи ВЧ-мощности в плазму. Для фиксации витков можно использовать точечную пайку к поверхности керамики по технологии металлокерамических узлов.
3. Форма РК должна выбираться исходя из минимально возможной цены иона для требуемого ионного тока при максимально большом коэффициенте использования рабочего тела $\beta \approx 0,7 \dots 0,8$. В общем случае предпочтительной является форма с минимальной площадью поверхности стенок, без учета площади ИОС, при максимальном объеме ионизации – полусферическая РК. С учетом простоты изготовления и повышенной прочности, для определенных режимов можно подобрать геометрию конической РК, обеспечивающую минимальные затраты на ионизацию. Это особенно актуально для РК большого диаметра.

В третьей главе приведен обзор литературы по математическому моделированию рабочих процессов в ВЧ-разряде, как с учетом применения для ЭРД, так и для источников ионов, применяемых в микроэлектронике. В первой части главы обосновывается необходимость разработки упрощенных математических моделей для анализа параметров плазмы в РК с высокочастотным разрядом.

Во второй части главы представлена разработанная балансовая модель ВЧ-разряда. Она основывается на уравнениях баланса частиц и мощности. В модели приняты следующие допущения: концентрация заряженных и нейтральных частиц в объеме РК предполагается постоянной; функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) принимается максвелловской.

Суммарные потери в разряде рассчитываются по двум соотношениям:

1. Уравнение для температуры электронов

$$T_{eV} = -U_{ion} / \ln \left[\frac{C_1}{\frac{I_b M_{Xe}}{q\beta} (1 + \beta C_2) \cdot 5 \cdot 10^{-14}} \right], \quad (1)$$

где U_{ion} – энергия ионизации, эВ;

I_b – ионный ток, А;

C_1 и C_2 – константы, зависящие от рода рабочего тела, геометрии РК и ионно-оптической системы;

M_{Xe} – масса атома ксенона, кг;

q – элементарный электрический заряд, Кл;

β – коэффициент использования рабочего тела.

2. Уравнение для определения потерь мощности в разряде

$$P_{diss} = \frac{I_b}{S_{out} Tr_i} S_{\Sigma} \left[U_{ion} + \frac{3 \cdot \exp(0.53/T_{eV})}{\sqrt{T_k^\alpha}} U_j^* + 2.5 T_{eV} \right] \quad (2)$$

где S_{out} – площадь ИОС, м²;

Tr_i – значение прозрачности оптики для ионов;

T_k^α – коэффициент, численно равный температуре электронов

S_{Σ} – суммарная площадь стенок разрядной камеры с учетом ионно-оптической системы, м²;

U_j^* – энергия возбуждения атома ксенона, равная 11,6 эВ.

Для расчета концентрации нейтральных частиц в объеме разрядной камеры используется следующее выражение:

$$n_0 = (4 - 2Tr_a) \left[\frac{\frac{I_b M_{Xe}}{q\beta} \left(1 + \frac{\beta}{Tr_i} \frac{Tr_a - 2Tr_i}{2 - Tr_a} \right)}{v_{nT} Tr_a S_{out} M_{Xe}} \right] \quad (3)$$

где Tr_a – значение прозрачности оптики для атомов,

v_{nT} – тепловая скорость атомов, м/с.

Балансовая модель разряда позволяет рассчитать затраты ВЧ-мощности на образование заданного ионного тока для разрядной камеры любой формы и подобрать такую геометрию РК и параметры ИОС, которые обеспечат минимальное значение этих затрат.

В третьей части главы представлена разработанная автором численная одномерная модель расчета параметров плазмы в РК. Отличие одномерной модели от балансовой заключается в использовании уравнений распространения электромагнитной волны в среде с дисперсией, что позволяет найти распределения температуры электронов, концентрации заряженных частиц и скорости ионов по радиусу РК. Концентрация нейтральных частиц принимается постоянной, ФРЭЭ –

максвелловской. В рамках этой модели находится решение для электромагнитной волны, распространяющейся в плазме с диэлектрической проницаемостью ε и ограниченной стенкой радиуса R . Для нахождения распределения концентрации частиц, потенциала плазмы и скорости ионов используется методика, предложенная в работе Д. Курелли и Ф. Чена «Equilibrium theory of cylindrical discharges with special application to helicons», опубликованная в 2011 году.

Мощность, затрачиваемая на нагрев плазмы, рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{L}{\sigma_{\Omega}} \int_0^R |J_{\theta}(r)|^2 \cdot 2\pi r dr, \quad (4)$$

где σ_{Ω} – омическая проводимость плазмы, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$;
 $J_{\theta}(r)$ – плотность кольцевого тока в плазме, А/м^2 ;
 L – длина индуктора, м.

Данную мощность можно связать с количеством витков индуктора и током, текущим в нем:

$$P_{\Omega} = \pi \frac{N_c^2 I_c^2}{L \cdot \sigma_{\Omega} |J_0(k \cdot r)|^2} \int_0^R |k \cdot J_1(k \cdot r)|^2 r dr, \quad (5)$$

где N_c – количество витков индуктора;
 I_c – ток в индукторе, А;
 J_1 – функция Бесселя первого рода, первого порядка.

Тем самым уравнение (5) в явном виде представляет связь между мощностью, затраченной на нагрев плазмы и числом витков индуктора, его длиной и током, текущим в нем. В сочетании с уравнением (2) это дает возможность выбрать параметры индуктора для заданного ионного тока.

Представлен расчет радиальных профилей температуры электронов, скорости ионов и потенциала плазмы, определены затраты мощности в разряде.

Температура электронов находится исходя из энергии, получаемой ими при азимутальном движении в вихревом электрическом поле ε_{kin} и хаотической энергии электронов ε_w , наличие которой не зависит от напряженности поля. Таким образом, температура электронов

$$T_{eV} = \frac{2}{3} \langle \varepsilon_{kin} + \varepsilon_w \rangle. \quad (6)$$

Тепловая энергия ε_w , выраженная в эВ, в данном случае является свободным параметром и выбирается таким образом, чтобы скорость на границе плазмы (на стенке), при решении уравнения для скорости ионов, стала равной скорости Бома.

Уравнение для скорости ионов имеет следующий вид:

$$\frac{dv_i}{dr} = \frac{v_{iB}^2}{v_{iB}^2 - v_i^2} \left[-\frac{v_i}{r} + n_n \langle \sigma_i v \rangle + \frac{v_i^2}{v_{iB}^2} n_n \left(\langle \sigma_i v \rangle + \langle \sigma_j^* v \rangle \right) \right], \quad (7)$$

где v_{iB} – скорость Бома;

v_i – скорость ионов;

$\langle \sigma_i v \rangle, \langle \sigma_j^* v \rangle$ – скорости реакции ионизации, возбуждения для уровня j .

Скорость ионов на стенке РК равна скорости Бома, на оси – нулю.

Дифференциальное уравнение для потенциала плазмы ϕ_{pl} , в безразмерном виде для $\eta = \phi_{pl}/T_{eV}$, запишется следующим образом:

$$\frac{d\eta}{dr} = \left[v_i \frac{dv_i}{dr} + n_n \left(\langle \sigma_i v \rangle + \langle \sigma_j^* v \rangle \right) v_i \right] \frac{1}{v_{iB}^2}. \quad (8)$$

Потенциал плазмы на оси камеры принимается равным нулю.

Концентрация заряженных частиц задается распределением Больцмана:

$$n_i = n_{i0} e^{-\eta}. \quad (9)$$

Баланс мощности в разряде рассчитывается по следующим соотношениям:

1. Поток мощности на стенку разрядной камеры

$$W_w = q \left[n_i v_{iB} \cdot 2\pi RL + 2 \int_0^R K_b n_i(r) v_{iB} \cdot 2\pi r dr \right] (\Delta\phi + 0.5T_{eV} + 2T_{eV}), \quad (10)$$

где $\Delta\phi$ – падение пристеночного потенциала (для ксеноновой плазмы $\sim 5,27 \cdot T_{eV}$ эВ).

2. Потери на возбуждение и ионизацию

$$W_{ie} = qL \int_0^R n_0 n_e [\langle \sigma_i v \rangle U_{ion} + \langle \sigma_j^* v \rangle U_j^*] 2\pi r dr. \quad (11)$$

3. Полные затраты мощности W_Σ равны сумме W_w и W_{ie} .

В четвертой части главы дан общий вывод и описана методика моделирования двумерного осесимметричного распределения локальных параметров плазмы. Данная методика использует результаты, полученные в балансовой и численной одномерной моделях. Для расчета электромагнитного поля в объеме разрядной камеры необходимо использование отдельных стандартных программных продуктов.

В четвертой главе приведено сравнение экспериментальных данных и значений, полученных при расчете параметров разряда по математической модели связи интегральных характеристик ВЧ ИД и параметров разряда в РК.

На рисунке 7 изображен результат расчета по балансовой модели (уравнение 2) и экспериментальные данные для ВЧ ИД, разработанного при участии автора в НИИ ПМЭ МАИ. Данный двигатель имел полусферическую РК диаметром 80 мм. Для сравнения использованы экспериментальные результаты, опубликованные в работе [Антропов Н.Н. и др., *Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя* / *Известия Академии Наук Энергетика*, №2, 2016].

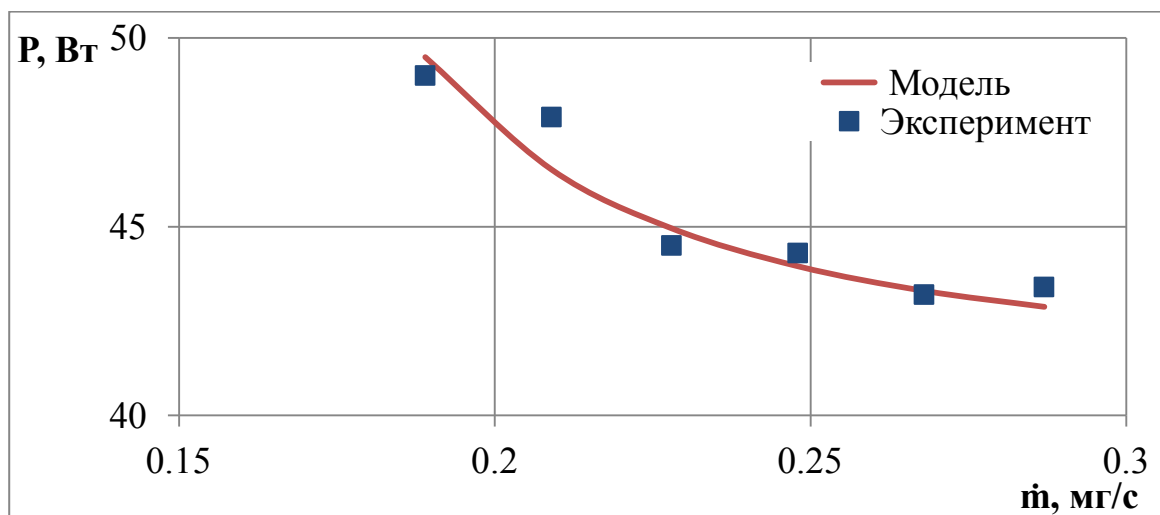


Рисунок 7 – Расчетные значения затрат мощности от расхода рабочего тела и экспериментальные данные для ВЧ ИД 8. Ионный ток пучка 95 мА (сплошная линия – расчёт, точки – экспериментальные значения).

На рисунке 8 показаны результаты аналогичного расчета для двигателя RIT-35LPX диаметром 350 мм (ток пучка ионов равен 750 мА). Экспериментальные данные взяты из работы [Groh K.H. et. al. *Inert gas performance of the RIT 35 main propulsion unit / IEPC-1988-098*].

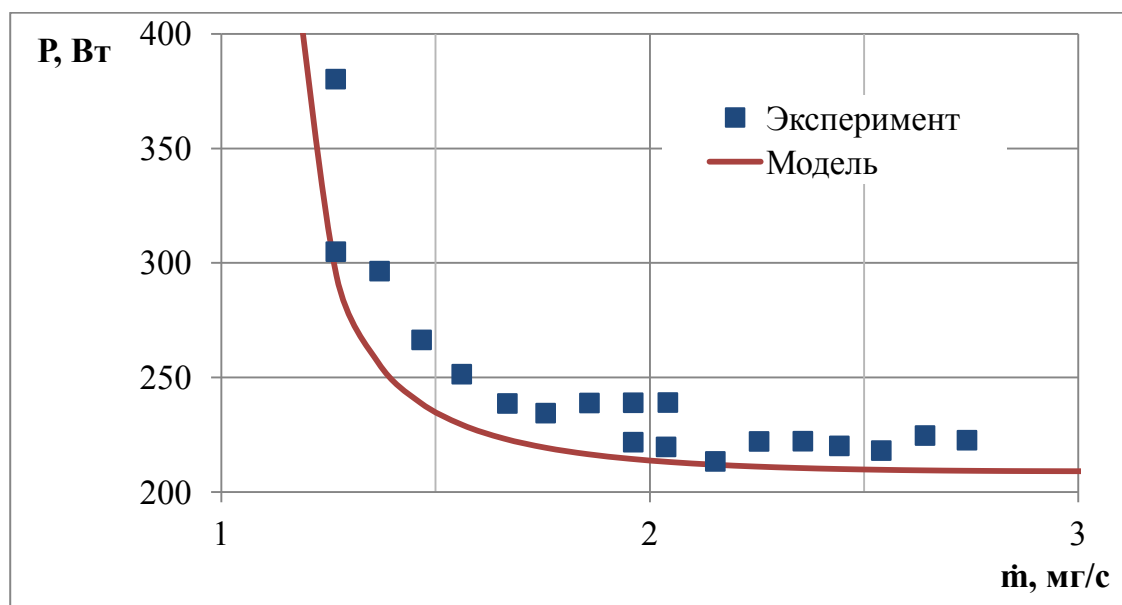


Рисунок 8 – Расчетные значения затрат мощности от расхода рабочего тела и экспериментальные данные для ВЧ ИД RIT-35LPX. Ионный ток пучка - 750 мА (сплошная линия – расчёт, точки – экспериментальные значения).

Как видно из рисунка 7 и рисунка 8, результаты расчетов по аналитической модели находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Таким образом сравнение результатов расчета затрат ВЧ-мощности для создания

необходимого ионного тока по балансовой модели с опубликованными экспериментальными данными показывает хорошую сходимость.

Результаты расчета по численной одномерной модели сравнивались с ранее полученными данными измерений локальных параметров плазмы высокочастотного разряда с помощью электростатических зондов. Данные опубликованы в работах, проведенных в университете г. Гиссен (Германия) (*Walther R., Schäfer M., Freisinger J. Plasma Diagnostics of the Rf-Ion Thruster RIT-10 / AIAA 72-472*). По этой же модели рассчитываются суммарные затраты ВЧ-мощности на создание ионного тока пучка ВЧ ИД и приводится их сравнение с экспериментальными значениями.

На рисунке 9 показано сравнение значений ВЧ-мощности, вычисленной по одномерной модели (уравнения 5, 10 и 11) и экспериментальных данных, для двигателя RIT-35 LPX с током пучка ионов равным 1950 мА. Также приведено изменение величины тока в индукторе I_c от расхода рабочего тела.

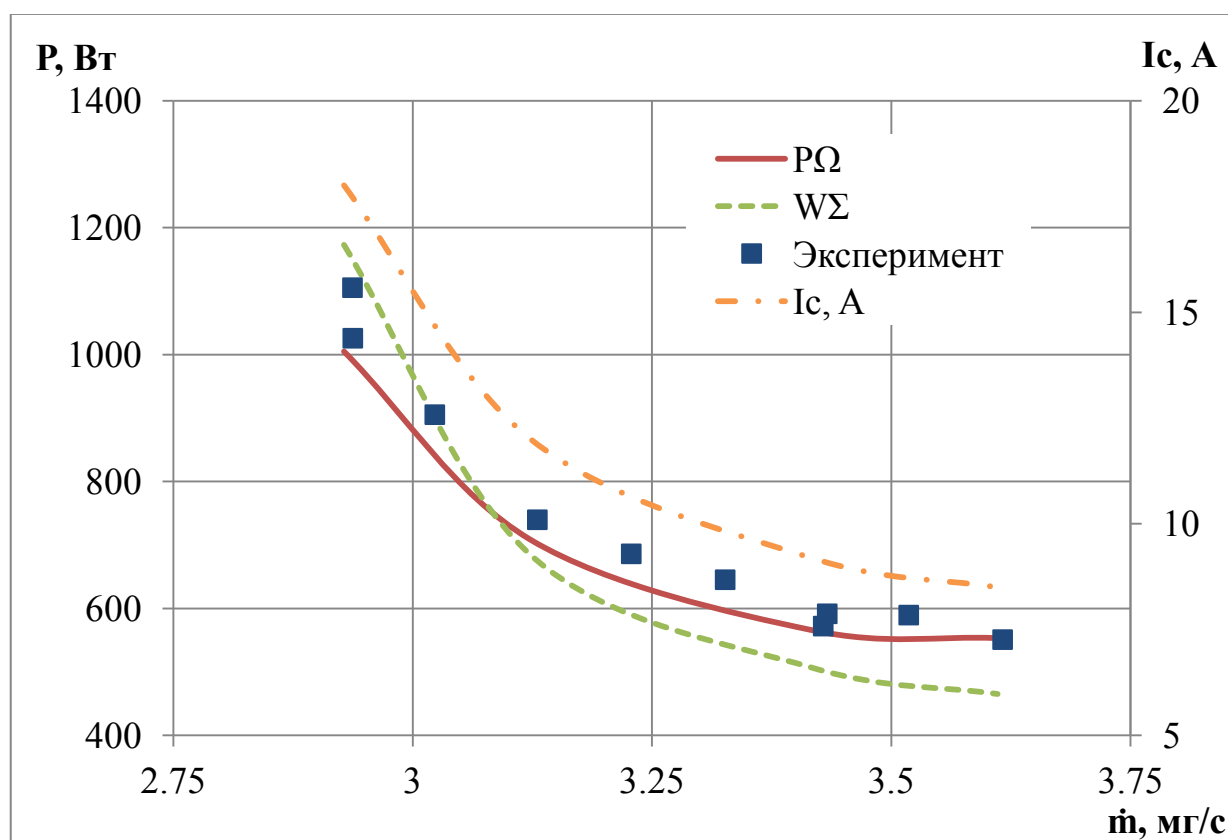


Рисунок 9 – Расчетные и экспериментальные данные модели RIT-35 LPX. Ионный ток пучка - 1950 мА.

На рисунке 10 и рисунке 11 представлены результаты расчета локальных параметров плазмы в зависимости от радиуса для двигателя RIT-35LPX (ионный ток пучка - 750 мА, расход рабочего тела - 2,14 мг/с). На рисунке 10 показано распределение температуры электронов по радиусу РК в эВ, а на рисунке 11 профили потенциала плазмы и концентрации заряженных частиц. Максимальная концентрация заряженных частиц для данного режима составляет $7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

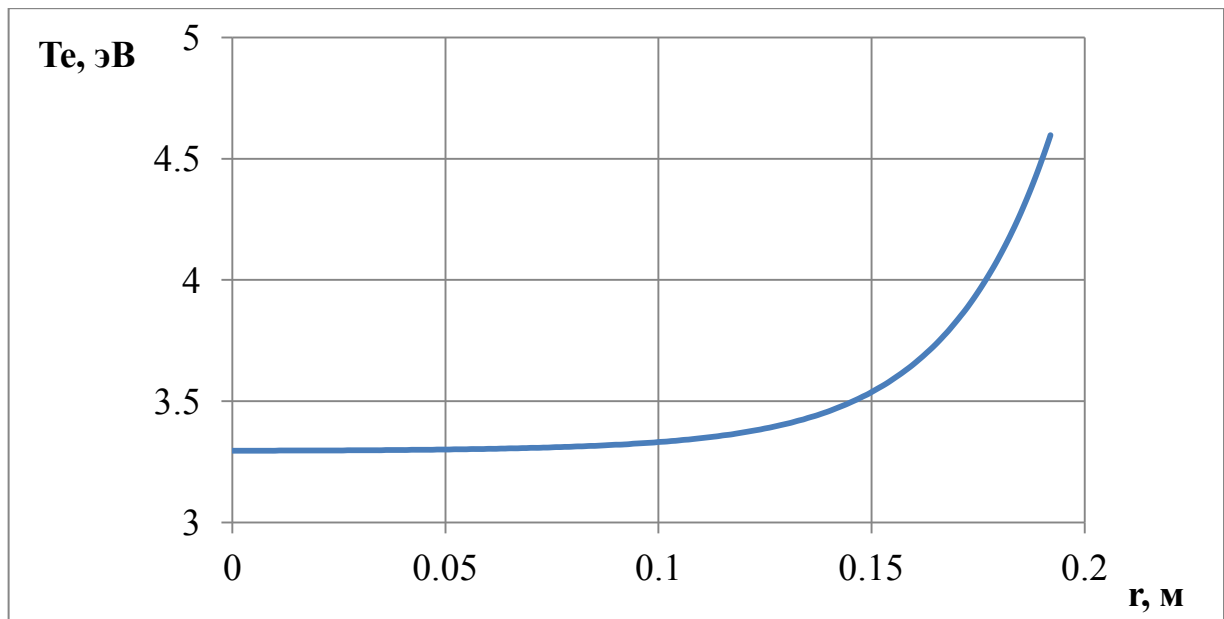


Рисунок 10 – Моделирование распределения температуры электронов по радиусу РК для двигателя RIT-35LPX.

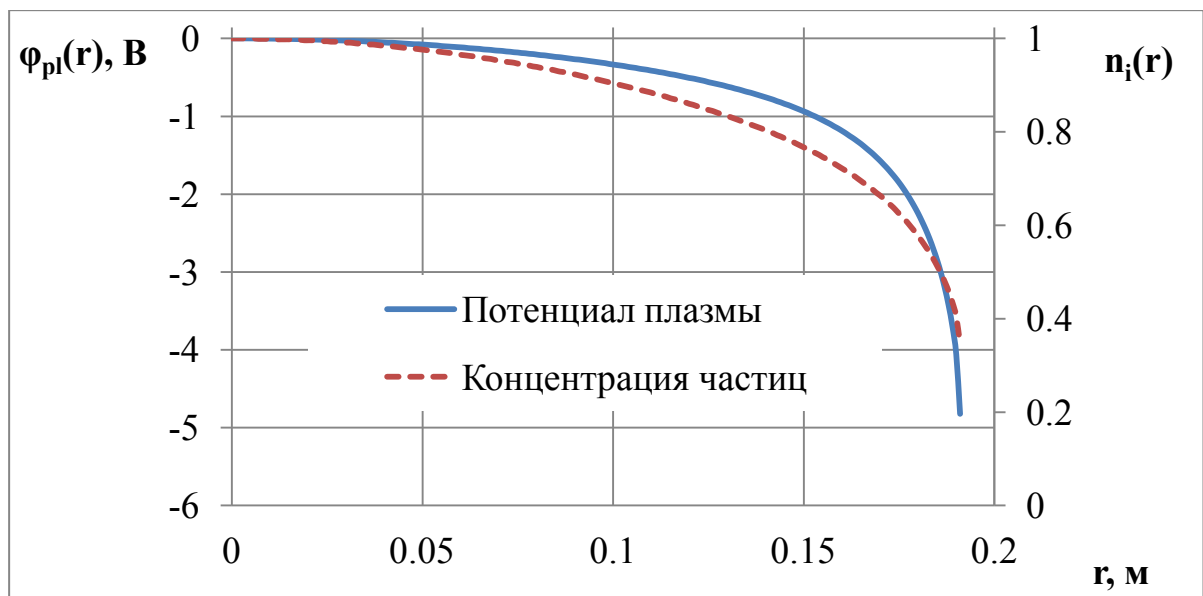


Рисунок 11 – Расчет радиальных значений плотности и потенциала плазмы для двигателя RIT-35LPX.

Из представленных на рисунке 10 и рисунке 11 зависимостей видно, что температура электронов возрастает в направлении стенки, вблизи которой амплитуда электромагнитного поля максимальна. Плотность и потенциал плазмы снижаются, имея свои максимальные значения в центре РК. Данные результаты подтверждаются (как качественно, так и количественно) экспериментальными работами, проведенными в университете г. Гиссен, и исследованиями других авторов. В этих работах измерения локальных параметров плазмы показали рост температуры

электронов в направлении стенки РК. При этом концентрация заряженных частиц была максимальной на ее оси.

Таким образом, результаты, рассчитанные по предложенной модели, качественно совпадают с экспериментальными данными.

Представлено двумерное осесимметричное распределение температуры электронов для цилиндрической РК с учетом геометрии индуктора. Двумерное моделирование проводилось с использованием программы Ansys® Maxwell для модели двигателя RIT 35LPX. По результатам расчетов по двумерной модели в программе задается ток в индукторе, электропроводность и диэлектрическая проницаемость плазмы.

В программе автоматически строится сетка в расчетной области и методом конечных элементов решается уравнение для векторного потенциала A :

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = (\sigma + i\omega\epsilon)(-i\omega\mathbf{A} - \nabla\varphi) \quad (12)$$

где μ – магнитная проницаемость, ϵ – диэлектрическая проницаемость,

σ – проводимость,

i – мнимая единица,

∇ – оператор Набла,

φ – скалярный потенциал.

По найденному потенциалу определяется распределение напряженности вихревого электрического поля:

$$E_\varphi = \omega A_\varphi, \quad (13)$$

После этого вычисляется двумерное распределение температуры электронов в РК.

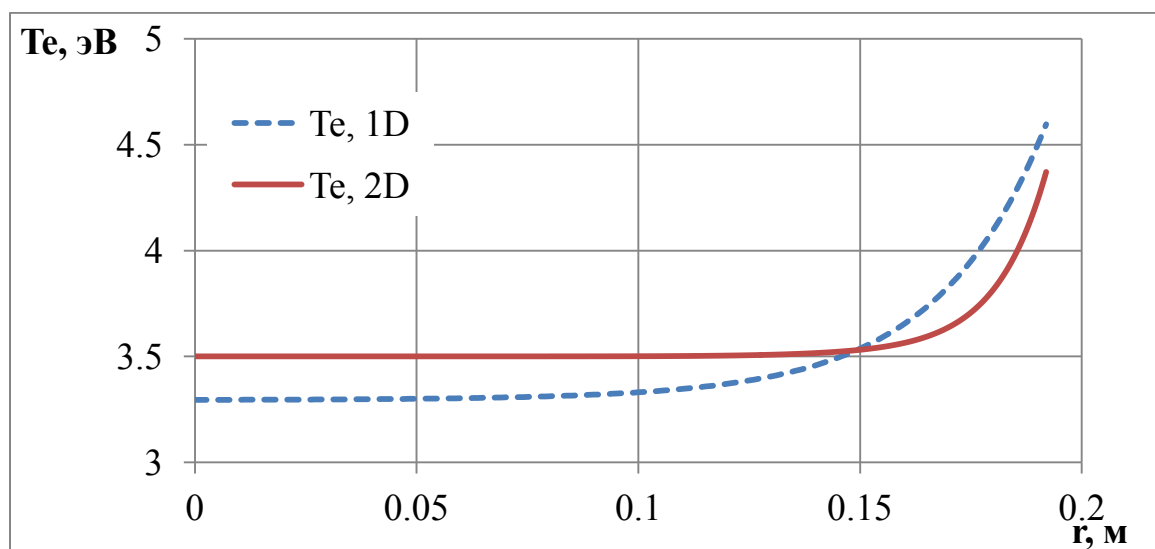


Рисунок 12 – Расчет температуры электронов по радиусу РК (сравнение одномерной 1D и двумерной 2D моделей).

На рисунке 12 представлено сравнение значений температуры электронов по радиусу РК, полученных в одномерной и двумерной моделях. Значение температуры для двумерной модели взято на среднем сечении РК.

Результаты расчета по одномерной и двумерной модели находятся в хорошем соответствии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в рамках поставленных задач, позволили сформулировать следующие выводы:

1. Способ расположения и количество витков индуктора РК оказывает влияние на величину ионного тока пучка, и, соответственно, на тяговые характеристики ВЧ ИД (изменения до 10%). Сдвиг витков индуктора к выходной части разрядной камеры приводит к снижению ионного тока на 8-10%. На основании проведенных исследований выработаны рекомендации по выполнению индуктора: намотка индуктора должна осуществляться с равномерным расположением витков на поверхности боковой стенки разрядной камеры; число витков должно быть не менее семи, с расстоянием между ними порядка одного их диаметра; витки индуктора не должны прилегать ближе чем 10 мм к кольцевым металлическим частям конструкции двигателя.
2. Геометрия РК оказывает влияние на повышение ионного тока пучка ВЧ ИД. Разрядные камеры полусферической или конической формы по сравнению с цилиндрическими имеют преимущество с точки зрения снижения энергозатрат на генерацию ионов – до 50%. В общем случае для ВЧ ИД рекомендуется выбирать РК полусферической формы. При увеличении диаметра двигателя, в силу технологической сложности изготовления больших полусферических керамических конструкций целесообразно переходить к конической форме РК. При этом снижение интегральных характеристик составит не более 15% и может быть снижено подбором высоты и угла раскрытия конуса РК.
3. Использование в качестве материала разрядной камеры керамик, выполненных из оксида алюминия, нитрида кремния и их смеси, обладающих низкими радиационными потерями, не оказывает влияния на характеристики двигателя. Критичными требованиями для изготовления разрядных камер ВЧ ИД являются: минимальная толщина стенки в области расположения витков индуктора для увеличения связи с плазмой; высокая прочность керамики; отсутствие пористости. Для использования в летных образцах ВЧ ИД целесообразно рекомендовать корунд, а для наземной отработки двигателя

возможно применение более дешевого и технологичного материала – композита из нитрида кремния и оксида алюминия.

4. Разработанная упрощенная математическая модель, позволяет установить связь интегральных характеристик ВЧ ИД и параметров разряда в РК, а также применить ее как для оценки энергозатрат при обеспечении необходимого ионного тока, так и для более детального исследования локальных параметров плазмы в ВЧ разряде. Верификация модели с экспериментальными данными показала, что отклонения не превышают 15%. Расчет локальных параметров плазмы с использованием данной модели качественно совпадает с экспериментальными значениями.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях:

1. Канев С.В., Латышев Л.А., Нигматзянов В.В., Хартов С.А. Моделирование рабочего процесса в газоразрядной камере высокоточного ионного двигателя [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29483>.
2. Антипов Е.А., Балашов В.В., Нигматзянов В.В. и др. Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35964>.
3. Kanev, S.V. Analytical model of radio-frequency ion thruster / S.V. Kanev, S.A. Khartov, V.V. Nigmatzyanov // Procedia Engineering. – 2017. – V.185. – P. 31–38. / URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.287>.

Патенты на полезную модель

4. Патент на полезную модель – №116273 РФ. Источник ионов / Нигматзянов В.В., Обухов В.А., Хартов С.А. и др.; Заявитель: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – №2011148979; Заяв. 02.12.2011; Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
5. Патент на полезную модель – №158759 РФ. Ионно-плазменный двигатель / Гаврюшин В.М., Кожевников В.В., Нигматзянов В.В. и др.; Заявитель: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – № 2014142905; Заяв. 24.10.2014; Оpubл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

Другие публикации:

6. Канев С.В., Латышев Л.А., Нигматзянов В.В., Хартов С.А. Моделирование рабочего процесса в газоразрядной камере высокочастотного ионного двигателя // Тез. Докл. 10-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 2011. – Москва: АиК. – 2011. – С. 138-139.
7. Вебер А.В., Нигматзянов В.В., Ситников С.А., Хартов С.А. Исследование характеристик высокочастотного ионного двигателя при использовании различных материалов газоразрядной камеры // Тез. Докл. 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 2012. – Москва: АиК. – 2012. – С. 207.
8. Канев С.В., Латышев Л.А., Нигматзянов В.В., Хартов С.А. Моделирование рабочего процесса в газоразрядной камере высокочастотного ионного двигателя // Материалы XXXVII-ых Академических чтений по космонавтике. Москва, 2013. – Москва, 2013. С.107.
9. Nigmatzyanov V. Simulation of working process in Gas-Discharge chamber of High-Frequency Ion Engine // Proceedings of Third German-Russian week of young researcher «Aviation and Space». Novosibirsk, 2013 – Moscow, 2014 – P.46.
10. Kanev S.V., Khartov S.A., Nigmatzyanov V.V. Simulation of Working Processes in Gas-Discharge Chamber of Radio-Frequency Ion Thruster // Proceedings of 4th Space Propulsion conference. Cologne, Germany, 2014; URL: http://www.propulsion2014.com/Papers/pdf/papers/session18/2969584_Nigmatzyanov.pdf.
11. Khartov S.A., Nigmatzyanov V.V., Sitnikov S.A. The influence of coil geometry and shape of discharge chamber on RIT parameters // Proceedings of 5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsions - New Challenges», Dresden, 2014. – P.26.
12. Kanev S.V., Khartov S.A., Nigmatzyanov V.V. Analytical and computational model for radio-frequency ion thruster // Proceedings of 5th Space Propulsion conference, Italy, Rome, 2016. URL: <http://www.saturne-prod.com/sp16app/abstracts/3124730.pdf>
13. Nigmatzyanov V.V., Kanev S.V.; Khartov S.A. Analytical Model of Radio-Frequency Ion Thruster // Proceedings of 6th Russian-German Conference «Electric Propulsion and Their Application», Samara, 2016. – P.21.