

Отзыв

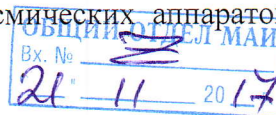
официального оппонента, д.ф.-м.н. Кралькиной Елены Александровны, в.н.с. физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, на диссертационную работу Нигматзянова Владислава Вадимовича "Выбор параметров разрядной камеры высокочастотного ионного двигателя", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

Актуальность темы

История науки и техники показывает, что интерес к отдельным областям знания изменяется во времени нелинейно. Достаточно часто прорывные идеи, изобретения и устройства в течение десятилетий не находят своего применения и «лежат на полке» пока не наступает их звездный час, связанный, как правило, с новыми вызовами, предъявляемыми промышленностью. В настоящее время таким вызовом можно считать быстрое развитие техники перспективных космических аппаратов, номенклатуры их массы, увеличение энерговооруженности аппаратов. Новые космические аппараты требуют создания двигателей нового поколения, обладающих высоким удельным импульсом и КПД, длительным временем работы. Одним из перспективных типов ионных двигателей по праву считаются высокочастотные индуктивные ионные двигатели. Примером таких двигателей может служить семейство двигателей RIT, разработанных в Гиссенском университете (Германия) в восьмидесятые годы прошлого века. Достоинством двигателей является отсутствие катода и непосредственного контакта плазмы с индуктором, что исключает целый ряд причин, приводящих к деградации со временем параметров двигателей. К недостаткам устройств на основе высокочастотного разряда следует отнести более высокие энергозатраты на поддержание разряда по сравнению двигателями, работающими на разряде постоянного тока. За десятилетия, прошедшие со времени разработки двигателей типа RIT, физика индуктивного высокочастотного разряда ушла далеко вперед. Выявлен целый ряд каналов потерь мощности в разряде, и намечены пути их устранения. В связи с этим диссертационная работа Нигматзянова Владислава Вадимовича, посвященная выбору параметров газоразрядной камеры и оптимизации процессов ионообразования в ней, представляется своевременной и актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

На основе критического анализа литературы и требований к параметрам ионных двигателей, необходимых для работы в составе современных космических аппаратов,



автором поставлена задача повысить степень ионизации рабочего тела в газоразрядной камере высокочастотного ионного двигателя за счет более эффективного ввода ВЧ мощности в разряд и, как следствие, увеличить ионный ток двигателя. Постановка задачи и предлагаемые В.В. Нигматзяновым методы ее решения представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Список использованной литературы содержит 101 наименование. Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на многочисленные экспериментальные данные, выполненные на сертифицированном оборудовании с помощью современных экспериментальных методов исследования ВЧ разряда, на данные, полученные с помощью численного моделирования, а также на сравнение, там, где это возможно, с результатами, полученными другими авторами.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна результатов, полученных автором диссертации, подтверждается: результатами экспериментов по изучению зависимости эффективности ионообразования от параметров узла ввода ВЧ мощности; результатами экспериментов по изучению зависимости эффективности ионообразования от формы газоразрядной камеры ионного двигателя; результатами экспериментов по изучению зависимости эффективности ионообразования от материала газоразрядной камеры ионного двигателя; инженерной численной моделью, позволяющей рассчитать локальные и параметры плазмы в газоразрядной камере и интегральные характеристики двигателя.

Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на многочисленные экспериментальные данные, полученные на сертифицированном оборудовании с помощью современных экспериментальных методов исследования ВЧ разряда, на данные, полученные с помощью численного моделирования, а также на сравнение, там, где это возможно, с результатами других авторов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Работа, выполненная В.В. Нигматзяновым, представляет интерес как в целом, так и в отдельных ее частях. Так, полученные результаты, касающиеся параметров узла ввода высокочастотной мощности, формы и материала газоразрядной камеры имеют несомненное будущее, как в заявленном диссертантом применении в космической технике, так и в наземных технологиях модификации поверхности электронов, напыления покрытий, травления и т.д. Кроме того, инженерная модель процессов в газоразрядной камере ионного двигателя может быть использована при проектировании источников ионов, работающих на широком классе рабочих газов.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертации могут быть использованы при проектировании разрядных камер высокочастотных двигателей, а также при создании источников ионов с высокочастотным разрядом, применяемых в микроэлектронной промышленности.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В **первой** главе диссертации выполнен обзор литературы, рассмотрены основные типы электрореактивных двигателей. Особое внимание уделено истории разработки двигателей RIT и обзору их параметров. В конце главы сформулированы основные задачи работы.

Во **второй** главе диссертации описаны экспериментальная установка, испытанные схемы согласующего устройства ВЧ генератора с разрядом и основные результаты по исследованию влияния формы и положения узла ввода ВЧ мощности на поверхности газоразрядной камеры, материала и формы газоразрядной камеры на величину достигаемого ионного тока. Показано, что наблюдается явный рост ионного тока при увеличении числа витков индуктора при значениях числа витков менее семи. На основании экспериментальных данных сделан вывод, что материал газоразрядной камеры слабо влияет на значения ионного тока при условии, что затухание электромагнитных волн в материале мало. Предпочтительной формой газоразрядной камеры с минимальной площадью поверхности. В выполненных экспериментах наилучший результат получен с газоразрядной камерой в виде полусферы.

В **третьей** главе сформулирована инженерная аналитическая модель индуктивного ВЧ разряда. Формулировка модели предваряется обзором литературы. Модель основана на уравнениях баланса основных компонент плазмы и уравнений, описывающих поглощение электромагнитных волн в плазме. Разработанная модель позволяет оценить затраты мощности на создание заданного ионного тока в газоразрядной камере того или иного размера, той или иной формы. Кроме того, модель позволяет рассчитать концентрацию и температуру электронов.

В **четвертой** главе представлены результаты сравнения результатов расчета с экспериментом, как самого диссертанта, так и с известными из литературы данными. В целом сравнение показывает удовлетворительное согласие расчетов с экспериментом. Несмотря на значительные в ряде случаев количественные расхождения, качественно расчеты и эксперимент совпадают, что позволяет сделать вывод, что основные физические процессы в разряде описаны верно.

Достоинства и недостатки работы

Диссертация В.В.Нигматзянова является законченной работой, в которой выполнен большой объем работ по оптимизации ионообразования в газоразрядной камере высокочастотного индуктивного ионного двигателя, разработана инженерная численная модель, позволяющая предсказать основные характеристики двигателя с газоразрядными камерами различного размера и формы. Работу отличает большой объем выполненных экспериментов и расчетов. Вместе с тем работа не свободна от недостатков:

1. В работе не описано большое количество переменных, входящих в уравнения инженерной численной модели, что существенно затрудняет оценку правильности представленных уравнений. Текст главы написан несколько сумбурно.

2. На странице 83 указано, что электроны выносятся на стенки $2.5T_e$, а на странице 98 указано правильное значение $2T_e$.

3. На странице 92 написано, что температура электронов складывается из хаотического и направленного движения электронов. Это неверно, температура электронов является мерой только их хаотического движения. Из хаотического и направленного движения электронов складывается средняя энергия электронов.

4. страница 98. Непонятно, чем мощность, диссипируемая в плазме, отличается от мощности, которая идет на нагрев электронов. В используемых выражениях для диэлектрической проницаемости учтены только члены, связанные с электронной компонентой.

5. Отсутствует анализ причин расхождения расчетных и экспериментальных данных, представленных в таблице 4.1. Причинами расхождения могут быть неучтенные потери на возбуждение индуктивных токов в кожухе источника, установочном фланце и т.д. Известны экспериментальные методы, позволяющие оценить указанные потери. К сожалению, такая работа диссертантом не была выполнена.


6. В работе присутствуют погрешности в оформлении диссертации. В место осцилляций ВЧ поля, говорится о вращении поля. В подписях к рисункам не указаны диаметр и длина газоразрядных камер.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация В.В. Нигматзянова является законченной научно-квалификационной работой, посвященной оптимизации ионообразования в газоразрядной камере индуктивного высокочастотного двигателя и разработке инженерной модели индуктивного разряда. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Основные результаты работы

изложены в трех научных статьях, из них две в журналах рекомендованных ВАК и одна в издании индексируемом в международной реферативной базе (SCOPUS), на найденные технические решения получены два патента.


Представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Доктор физико-математических наук,
Ведущий научный сотрудник
физического факультета МГУ
119991, Москва, Ленинские горы,
МГУ, физический факультет,
кафедра физической электроники
Телефон: +7(495)939-4773
e-mail: ekralkina@mail.ru

 Кралькина Е.А.
21.11.2017

Декан физического факультета МГУ
доктор физико-математических наук, профессор



 Сысоев Н.Н.
28.11.2017г. 