

## ОТЗЫВ

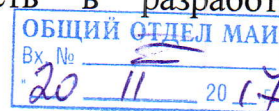
официального оппонента

кандидата технических наук Пильникова Александра Васильевича  
на диссертационную работу Нигматзянова Владислава Вадимовича  
«Выбор параметров разрядной камеры высокочастотного ионного двигателя»  
представленной на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные  
двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

### **Актуальность выбранной темы.**

В настоящее время электроракетные двигатели (ЭРД) широко используются для решения задач коррекции орбит космических аппаратов (КА), а также в качестве маршевых двигателей для обеспечения межорбитальных и межпланетных перелетов. Основным преимуществом ЭРД перед традиционно применяемыми жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) является высокий удельный импульс. Применение ЭРД позволяет при наборе заданной характеристической скорости КА сократить запасы рабочего тела на борту при выполнении маневра и, тем самым, увеличить массу полезной нагрузки.

Наиболее высоким удельным импульсом среди всех типов ЭРД обладают ионные двигатели (ИД), позволяющие обеспечивать его значение свыше 40 000 м/с и который недостижим при использовании двигателей других схем. Помимо этого процесс ионизации рабочего тела в данном типе ЭРД происходит независимо от механизма ускорения, что позволяет добиться высокой эффективности двигателя. Среди всех сеточных ЭРД наиболее проработанными являются ионные двигатели типа Кауфмана и высокочастотные ионные двигатели (ВЧ ИД). Конструктивным преимуществом последних, существенно увеличивающим их надежность и ресурс, является отсутствие электродов в области ионизации – газоразрядной камере (ГРК). Кроме того отпадает необходимость в разработке



теплонпряженного катодного узла и дополнительных источников электропитания, что повышает надежность изделия и снижает его стоимость.

Вместе с тем, в настоящее время, ВЧ ИД уступают ИД типа Кауфмана по эффективности. В них затраты подведенной мощности на ионизацию рабочего тела примерно в два раза выше. Поэтому важной и актуальной является задача снижения затрат энергии на создание необходимого ионного тока или тяги двигателя для повышения конкурентоспособности ВЧ ИД при решении аналогичных задач.

Диссертация Нигматзянова В.В. посвящена экспериментальному исследованию влияния геометрии разрядной камеры (РК), материала стенок, способа намотки витков индуктора на величину ионного тока двигателя, а также разработке математической модели, связывающей интегральные характеристики двигателя (тягу и удельный импульс) с параметрами плазмы в РК. Поиск путей снижения затрат энергии на ионизацию осуществлялся, как экспериментально, так и численно. Таким образом, выбранная тема диссертации по исследованию и оптимизации параметров разрядной камеры ВЧ ИД является актуальной.

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список цитируемой литературы из 101 наименования. Текст диссертации на 142 страницах хорошо проиллюстрирован графиками, рисунками и таблицами.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обусловлена следующим:**

1. Автором представлен подробный обзор современного состояния разработок высокочастотных ионных двигателей и освещены проблемы создания разрядных камер. На основе проведенного анализа обусловлена актуальность поставленной задачи – исследование влияния параметров разрядной камеры на характеристики ВЧ ИД.

2. Представленные результаты экспериментального исследования ВЧ ИД отличаются большим объемом проделанной работы по определению



влияния различных параметров разрядной камеры на характеристики двигателя. Автор опытным путем проверил влияние материала разрядной камеры на ионный ток двигателя. Было изучено влияние схемы согласующего устройства (СУ) на интегральные характеристики ВЧ ИД. Наиболее важным является экспериментальное исследование влияния формы разрядной камеры на величину ионного тока. Показано, что можно выбрать такую форму разрядной камеры, при которой затраты на ионизацию будут минимальны. Также это относится и к способу намотки индуктора. Полученные данные рекомендовано использовать при проектировании разрядных камер перспективных моделей высокочастотных ионных двигателей.

3. Автором приведен подробный обзор современного состояния проблем математического моделирования физических процессов в разрядной камере ВЧ ИД. В отличие от существующих методик расчетов автор предложил и разработал упрощенную балансовую модель, которая позволяет за короткий промежуток времени выбрать необходимую форму разрядной камеры для заданного уровня ионного тока двигателя, что значительно сокращает время на экспериментальную отработку изделий при проектировании. Также в тексте представлены более сложные модели, которые не только позволяют определить необходимое количество витков индуктора и ток в нем, но и построить распределение локальных параметров плазмы в разрядной камере. Это дает более детальное понимание процессов происходящих в высокочастотном разряде. Автор приводит сравнение результатов расчета по предложенным моделям с экспериментальными данными, полученными как им самим, так и другими исследователями. Было проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на трех типах двигателей, размеры и форма разрядных камер которых различны. Тем не менее, результаты расчета автора для всех рассмотренных моделей двигателей показывают хорошее соответствие с экспериментом. В работе также представлено сравнение затрат мощности, рассчитанное для одномерной модели, с экспериментальными

данными. Результаты расчета находятся в удовлетворительном совпадении с экспериментом. Представленный в работе расчет параметров плазмы в РК, в рамках двумерной модели качественно совпадает с зондовыми измерениями, проведенными разработчиками прототипов летных моделей ВЧ ИД.

В работе даны рекомендации по проектированию разрядных камер высокочастотных ионных двигателей.

**Достоверность полученных автором результатов** основана на использовании при экспериментальных исследованиях сертифицированного оборудования и современных методик сбора и обработки данных. Полученные в ходе выполнения работы результаты сопоставлялись автором с данными независимых исследователей. Методики математического моделирования параметров разряда верифицировались по результатам экспериментальных исследований.

**Полученные в работе результаты обладают научной новизной.**

Так, проведенное исследование позволило определить оптимальную геометрию индуктора, то есть числа витков, способа их намотки и положения относительно ионно-оптической системы (ИОС). Было показано, что при расположении индуктора вблизи ИОС или же его расположение в выходной части разрядной камеры приводит к снижению ионного тока двигателя до 10%. Другие исследованные варианты расположения индуктора не приводят к снижению ионного тока.

Было показано, что использование полусферической формы разрядной камеры снижает затраты на создание необходимого ионного тока. Причиной этого является снижение площади поверхности стенок, на которых происходит гибель ионов при сохранении объема камеры, достаточного для высокоэффективной ионизации. В то же время автор показал, что использование конической камеры, которую технологически проще изготовить, также позволяет снизить затраты мощности в сравнении с камерами цилиндрической формы. При этом размеры конической разрядной камеры могут быть подобраны таким образом, что интегральные



характеристики высокочастотного ионного двигателя с полусферической и конической разрядной камерой будут сопоставимы.

Экспериментально показано, что материал стенок разрядной камеры не оказывает влияние на энергозатраты при образовании ионов. Кроме того экспериментально установлено, что для исследуемого типоразмера двигателя (100мм) изменение частоты ВЧ-поля в диапазоне 1,8÷2,1 МГц не оказывает влияние на затраты энергии на образование ионов.

**Практическая значимость работы состоит в следующем:**

1. Предложены и теоретически обоснованы пути повышения эффективности высокочастотных ионных двигателей за счет изменения формы разрядной камеры и способа намотки индуктора.

2. Показана возможность изготовления стенок разрядной камеры из керамик различных марок с малыми радиационными потерями, что позволяет снизить затраты на их изготовление при исследовательских работах.

3. Разработана простая математическая модель связи интегральных характеристик ВЧ ИД и параметров плазмы в РК, позволяющая с минимальными временными и материальными затратами определять ее основные размеры.

4. По результатам работы выработаны рекомендации по проектированию разрядных камер ВЧ ИД.

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

Однако к **работе имеются некоторые замечания**, а именно:

1. Исследование влияния конструктивных изменений на ионный ток пучка двигателя проводилось без учета неконтролируемых потерь в стендовом устройстве согласования (УС) между ВЧ-генератором и индуктором. Возможно, что при использовании ВЧ-генератора с

автоматической подстройкой частоты, как это используется в летных моделях, эффективная цена иона значительно бы снизилась и полученные экспериментальные результаты изменились.

2. Не приводится объяснение значительного расхождения результатов расчета по балансовой модели и результатов эксперимента в области малых расходов. Возможно, в предложенной упрощенной модели, не были учтены некоторые факторы реального рабочего процесса в разрядной камере.

Вместе с тем, приведенные выше замечания не снижают научной и практической ценности проведенных исследований, результаты которых могут быть использованы при разработке высокочастотных ионных двигателей.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Материал изложен грамотным техническим языком, четко обозначен личный вклад автора в результаты исследований. Работа обладает высоким научным уровнем и отличается практической направленностью.

Таким образом, рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям **«Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям»**. Изложенный в ней материал соответствует паспорту специальности 05.07.05 "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов", а ее автор, Нигматзянов Владислав Вадимович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Ведущий научный сотрудник отдела 4101  
«Научно-техническое сопровождение  
наземной экспериментальной отработки и  
летных испытаний двигательных установок»,  
кандидат технических наук

А.В. Пильников

Подпись официального оппонента к.т.н. Пильникова А.В. удостоверяю:  
Главный Ученый секретарь ФГУП ЦНИИмаш,  
д.т.н., проф.



Ю.Н. Смагин

Трудов - 20.11.2017г.