



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»



Акционерное общество
«Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»)

ул. Пионерская, д. 4, корп. 22
г.о. Королёв,
Московская область, 141070

Тел.: +7 (495) 513 5951
Факс: +7 (495) 512 2100

e-mail: corp@tsniimash.ru
http://www.tsniimash.ru

ОГРН 1195081054310
ИНН / КПП 5018200994 / 501801001

05.11.19 исх. № *АМ-13327*

исх. № _____ от _____

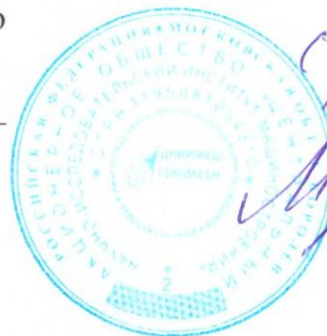
Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский
университет) МАИ, Волоколамское ш. д. 4,
Москва, 125993
Председателю диссертационного совета
Д212.125.08,
Доктору технических наук, профессору
Ю.А. Равиковичу

Уважаемый Юрий Александрович!

Настоящим высылаю Вам отзыв официального оппонента, ведущего специалиста АО ЦНИИмаш, к.т.н. Пильникова Александра Васильевича на диссертацию Мельникова А.В. «Высокочастотный ионный двигатель с дополнительным постоянным магнитным полем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение - «Отзыв...», на 5 листах, 2 экз., н/с.

Генеральный конструктор по
средствам выведения и наземной
космической инфраструктуре –
заместитель генерального директора



А.А. Медведев
А.А. Медведев

Исполнитель:
Пильников А.В.
тел.: (495)513-48-86

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № *2*
06 *11* 201*9*

Отзыв
официального оппонента
кандидата технических наук **Пильникова Александра Васильевича**
на диссертационную работу **Мельникова Андрея Викторовича**
«Высокочастотный ионный двигатель с дополнительным постоянным магнитным полем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертации

В последнее время для задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) всё чаще начинают использоваться малые космические аппараты (МКА), позволяющие сократить затраты времени и ресурсов на разработку, запуск и развёртывание спутниковых систем. При этом сдерживающим фактором их развития является характерная для этого класса аппаратов более низкая разрешающая способность целевой аппаратуры, определяемая ограничениями по массе и габаритам. Одним из наиболее перспективных методов решения этой проблемы является снижение высоты рабочей орбиты МКА с 500 км до 250 – 300 км. Однако на этих высотах из-за влияния остаточной атмосферы Земли космический аппарат (КА) будет испытывать значительное аэродинамическое сопротивление. Поэтому, для поддержания высоты орбиты при длительной эксплуатации перспективных низкоорбитальных МКА, требуется наличие корректирующей двигательной установки (КДУ).

В настоящее время в составе КДУ различного назначения всё чаще используются электроракетные двигатели (ЭРД). Высокий удельный импульс тяги ЭРД позволяет значительно сократить требуемый запас рабочего тела (РТ) для отработки заданного срока активного существования (САС).

При эксплуатации МКА на низких орбитах КДУ должна, практически непрерывно, обеспечивать компенсацию аэродинамического сопротивления, величина которого сама по себе зависит от большого количества различных факторов и может изменяться в десятки раз в условиях полета. Поэтому, для более экономичного использования РТ, при длительных САС, электроракетные двигатели, как исполнительные элементы КДУ, должны обеспечивать возможность дросселирования тяги. Наиболее перспективными ЭРД для МКА являются ионные двигатели (ИД), обеспечивающие на сегодняшний день самые высокие показатели удельного импульса.

Одним из типов таких ИД является высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД), ионизация РТ в котором осуществляется за счёт воздействия переменного электромагнитного поля высокой частоты (ВЧ). Использование индуктивного ВЧ разряда существенно упрощает конструкцию и повышает ресурс ВЧИД по сравнению с более распространёнными ионными двигателями постоянного тока (ИДПТ). Однако, несмотря на имеющиеся преимущества, ВЧИД уступают по

энергетическим характеристикам ИДПТ. В особенности это проявляется при малых мощностях, то есть при глубоком дросселировании тяги. Одной из главных причин являются относительно большие потери, вызванные выпадением заряженных частиц на стенки разрядной камеры (РК), где они активно рекомбинируют. Работа автора была сконцентрирована на рассмотрении одного из возможных методов снижения этих потерь – использовании дополнительного постоянного магнитного поля для удержания электронов в объёме плазмы.

Диссертационная работа, в основном, является экспериментальной. Она посвящена исследованию интегральных характеристик ВЧИД, а также локальных параметров плазмы в его РК, при наличии дополнительного постоянного магнитного поля. Исследования проводились на лабораторных моделях двигателя, в конструкцию которых автором были интегрированы источники дополнительного постоянного магнитного поля. Путем изменения силы тока в дополнительных обмотках, являющихся источником постоянного магнитного поля, исследовано влияние величины осевой и радиальной составляющих индукции на ионный ток пучка и локальные параметры плазмы в одной из моделей ВЧИД. Было проведено сравнение различных конфигураций дополнительной магнитной системы по степени максимально возможного улучшения характеристик. Автором также была предложена упрощённая инженерная математическая модель, позволяющая оценить влияние параметров дополнительного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД и на распределение локальных параметров плазмы в его РК. Главными результатами исследований являются выработанные рекомендации по использованию дополнительного магнитного поля с целью повышения эффективности проектируемых моделей ВЧИД малой мощности при их работе в режиме дросселирования тяги, что и определяет актуальность представленной работы.

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы из 108 источников. Текст диссертации, изложенный на 157 страницах, наполнен рисунками, графиками и таблицами, дополняющими материал и позволяющими подробно ознакомиться с результатами исследований.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В первой главе автором обоснована возможность использования ВЧИД в качестве исполнительного элемента КДУ низкоорбитальных МКА дистанционного зондирования Земли. Проанализированы основные процессы, влияющие на ухудшение энергетических характеристик ВЧИД. На основе данного анализа грамотно сформулированы актуальность работы, цели и задачи исследований.

Как было уже отмечено, работа во многом носит экспериментальный характер, что и определяет обоснованность полученных результатов. В

тексте диссертации достаточно подробно представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД и на локальные параметры плазмы в его РК. Автор опытным путём доказал возможность улучшения энергетических характеристик ВЧИД за счёт дополнительного магнитного поля, а результаты исследования локальных параметров плазмы подтвердили выдвинутое им предположение о причинах повышения эффективности двигателя. Проведенное сравнение различных схем дополнительной магнитной системы позволило найти наилучшее конструктивное решение, на основе которого была разработана лабораторная модель двигателя с постоянным магнитом в качестве источника дополнительного магнитного поля. Эта модель показала стабильную работу и максимальные энергетические характеристики в широком диапазоне дросселирования по тяге.

В завершении автором продемонстрирована способность теоретически осмыслить проведенные исследования. Им предложена упрощённая инженерная математическая модель, позволяющая с малыми временными затратами проводить предварительную оценку основных характеристик ВЧИД, в том числе и при наличии дополнительного постоянного магнитного поля. Приведенное сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными показывает хорошую корреляцию эксперимента и модели – расхождение составляет не более 25 %.

Достоверность полученных автором результатов обусловлена использованием автором современных и апробированных ранее методик измерений, сбора и обработки экспериментальных данных. В ходе экспериментов использовалось «сертифицированное» оборудование. Полученные результаты согласуются с работами других исследователей.

Научная новизна результатов исследования

Необходимо отметить, что несмотря на активно проводимые исследования индуктивного ВЧ разряда низкого давления (используемого в ВЧИД) при наличии дополнительного постоянного магнитного поля на кафедре физической электроники МГУ (в тексте диссертации многократно процитированы и проанализированы данные работы), представленные автором результаты обладают явной научной новизной.

Впервые экспериментально показано, что наличие дополнительного постоянного магнитного поля рупорно-аксиальной конфигурации приводит к увеличению эффективности ВЧИД малой мощности.

На основании анализа экспериментальных данных распределений локальных параметров плазмы в выходном сечении РК подтверждено предположение о причинах улучшения характеристик двигателя за счет эффекта увеличения концентрации и температуры электронов, приводящего

к повышению степени ионизации и, соответственно, эффективности двигателя при наличии рупорно-аксиального магнитного поля.

По результатам комплексных 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 РК уровня 0,5 и 0,3 мТл соответственно.

Результаты проведённых исследований защищены патентом РФ на полезную модель.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Автором работы было экспериментально подтверждено повышение эффективности работы ВЧИД малой мощности при использовании дополнительного магнитного поля.
2. Определены режимы работы двигателя малой мощности и параметры дополнительного магнитного поля, при которых наблюдается улучшение его 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. Выработаны рекомендации по созданию моделей ВЧИД малой мощности с источником дополнительного постоянного магнитного поля.
5. Предложена инженерная модель, позволяющая с минимальными временными и материальными затратами оценить влияние параметров дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД и эффективность внесённых изменений в его конструкцию на этапе проектирования.

Основные результаты работы изложены в трёх статьях в рецензируемых научных изданиях из рекомендованного перечня ВАК. Результаты работы докладывались на шести научных конференциях. В соавторстве получен патент на полезную модель.

Однако при подробном анализе текста диссертации можно сформулировать **некоторые замечания** по выполненной работе, а именно:

1. В экспериментальных исследованиях автором не было рассмотрено влияние частоты тока в индукторе на достижение положительного эффекта при использовании дополнительного магнитного поля. В реальных конструкциях летных образцов ВЧИД с автоподстройкой частоты ВЧ-генератора частота тока в индукторе может отличаться от тех значений, которые использовались в проводимых исследованиях и

степень улучшения характеристик двигателя может сместиться как в большую, так и в меньшую сторону.

2. В работе не уделено внимание возможному влиянию переменного электромагнитного поля на свойства постоянного магнита, который предлагается использовать в качестве основного источника дополнительного постоянного магнитного поля.
3. Не было рассмотрено достижение положительного эффекта от использования дополнительного постоянного магнитного поля предложенной конфигурации на двигателях большего уровня мощности.
4. В математической модели не учитывается эффективность фокусировки ионного пучка в ионно-оптической системе, что может дополнительно снижать точность расчёта интегральных характеристик ВЧИД.

Тем не менее, приведенные замечания не снижают научной и практической ценности проведенных исследований, а работа обладает высоким техническим уровнем.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача повышения эффективности работы ВЧИД. 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, Мельников Андрей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Ведущий специалист 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 АО «ЦНИИмаш»,
д.т.н., профессор



Ю.Н. Смагин

Полное название организации: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»).

Адрес: 141070, РФ, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, дом 4.

Телефон: 8(495) 513-59-51, Факс: 8(495) 512-21-00

Электронная почта: corp@tsniimash.ru