



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**



**(МГУ)  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, ГСП-1, 119991  
Телефон: 939-3160. Факс: 932-8820

20.11.2019 № 1850-18/103-09  
На № \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного совета  
Д 212.125.08 на базе Московского  
авиационного института (национального  
исследовательского университета)  
доктору технических наук, профессору  
Ю.А. Равиковичу

МАИ, Волоколамское ш., д. 4, Москва,  
ГСП-3, 125993

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам отзыв официального оппонента, ведущего научного сотрудника кафедры физической электроники физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», д.ф.-м.н. Кралькиной Елены Александровны на диссертацию 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».

Приложение: «Отзыв...», на 5 листах, в 2-х экз.

Декан физического факультета МГУ

доктор физико-математических наук, профессор

Сысоев Н.Н.



ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № \_\_\_\_\_  
"21" 11 2019 г.

## Отзыв

официального оппонента Кралькиной Елены Александровны, д.ф.-м.н., в.н.с. физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 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

Новые вызовы, предъявляемые в наши дни космической технике, требуют разработки низкоорбитальных малых космических аппаратов, оснащенных энергоэффективными двигателями, характеризующимися 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, и открывает окно возможностей для использования в качестве рабочего тела не только ксенона, но и химически активных газов, в частности воздуха. 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.

Диссертационная работа А.В. Мельникова является логическим продолжением цикла работ по оптимизации параметров моделей высокочастотных двигателей, выполненных в Московском Авиационном институте с учетом современных достижений физики индуктивного высокочастотного разряда. Целью работы диссертанта является изучение возможностей использования внешнего магнитного поля для увеличения величин ионного тока, извлекаемого из высокочастотного двигателя, и, как следствие, повышение эффективности работы устройства. Выполненная работа представляется еще одним немаловажным шагом в направлении создания модели ВЧ двигателя, отвечающей требованиям сегодняшнего дня. В связи с этим диссертационная работа А.В. Мельникова является своевременной и актуальной.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № \_\_\_\_\_  
"21" \_\_\_\_\_ 17 2019 г.

## **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 улучшить интегральные характеристики высокочастотного ионного двигателя за счет использования дополнительного внешнего магнитного поля. Постановка задачи и предлагаемые А.В.Мельниковым методы ее решения представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Список использованной литературы содержит 108 наименований. 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 новизну исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Новизна результатов, полученных автором диссертации, подтверждается:

- результатами экспериментов по изучению влияния внешнего магнитного поля на концентрацию и температуру электронов в области эмиссионного электрода ионно-оптической системы;
- результатами экспериментов по изучению влияния наличия и величины внешнего магнитного поля на ток извлекаемых ионов и коэффициент использования рабочего тела;
- 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 А. В. Мельниковым, представляет интерес как в целом, так и в отдельных ее частях. Так, полученные результаты, касающиеся конструктивных особенностей магнитной системы, оптимальных значений магнитного поля 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 как при проектировании моделей высокочастотных ионных двигателей малой мощности с дополнительным постоянным магнитным полем, повышающим их характеристики в широком диапазоне режимов работы, так и при создании источников ионов для технологических процессов в микроэлектронной и оптической промышленности.

### **Содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В **первой** главе диссертации выполнен обзор литературы, рассмотрены особенности работы и перспективы использования ионных двигателей в составе низкоорбитальных космических аппаратов. Отмечены достоинства высокочастотных индуктивных ионных двигателей, позволяющие рассматривать их в качестве перспективного кандидата для работы в составе низкоорбитальных космических аппаратов. Особое внимание уделено физическим процессам, происходящим в газоразрядной камере высокочастотного ионного двигателя, рассмотрены основные физико-математические модели. В конце главы сформулированы основные задачи диссертации.

Во **второй** главе диссертации подробно описаны экспериментальная установка и ее основные элементы, схемы электропитания и согласующего устройства ВЧ генератора с разрядом, конструкция лабораторных моделей ионного двигателя. В Главе подробно описаны использованные магнитные системы, приведены расчеты и измерения конфигурации магнитного поля в объеме газоразрядной камеры. При описании методов измерения основных интегральных характеристик двигателя и трехзондового метода

нахождения параметров плазмы подробно рассмотрены источники погрешности измерений и выполнены оценки типичных ошибок измерения.

В **третьей** главе приведены результаты влияния внешнего магнитного поля на параметры плазмы в газоразрядной камере и интегральные параметры двигателя. Рассмотрены магнитные системы как на основе электромагнитов, так и на основе постоянных магнитов. Показаны преимущества магнитной системы, основанной на постоянных магнитах. Доказано, что оптимальной конфигурацией магнитного поля, позволяющей добиться существенного улучшения характеристик двигателя, является рупорно-аксиальная. Наилучший результат наблюдался диссертантом при использовании однополюсной системы, когда в качестве магнитного полюса использовался газораспределитель.

В **четвертой** главе сформулирована инженерная аналитическая модель индуктивного высокочастотного двигателя с внешним магнитным полем. Модель основана на уравнениях, описывающих ВЧ поля в разряде и поведение основных компонент плазмы. 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 радиальное распределение концентрации и температуры электронов, ионного тока на срезе двигателя. В главе представлены результаты сравнения результатов расчета с экспериментом, выполненным диссертантом.

### **Достоинства и недостатки работы**

Диссертация А.В. Мельникова является законченной работой, в которой выполнен большой объем работ по исследованию влияния дополнительного магнитного поля на параметры плазмы в газоразрядной камере и интегральные характеристики двигателя. Экспериментальную работу дополняет численная инженерная модель, позволяющая рассчитать основные параметры двигателя и сравнить с измеренными. Работу отличает большой объем выполненных экспериментов и расчетов. Очень хорошее впечатление производит большое внимание диссертанта к тщательности постановки экспериментов и оценке погрешности измерений. Вместе с тем работа не свободна от недостатков:

1. В работе предполагается, что внешнее магнитное поле влияет только на удержание электронной компоненты в разряде. Известно, что наличие внешнего магнитного поля может привести к изменению способности плазмы поглощать ВЧ мощность. Этот механизм влияния на параметры двигателя в диссертации не рассмотрен.

2. Формулировка расчетной модели двигателя в главе 4 выполнена расплывчато. Любая модель ВЧ индуктивного разряда в источнике плазмы состоит из двух взаимосвязанных частей: расчета пространственного распределения ВЧ полей в плазме при заданных параметрах плазмы и расчета параметров плазмы по заданным ВЧ полям. К сожалению, в диссертации нет четкого описания алгоритма расчета влияния плазмы на скинирование ВЧ полей. Кроме того, большинство формул дано в конечном виде, без вывода. Целесообразно было бы привести исчерпывающую формулировку модели в Приложении к диссертации.
3. В работе присутствует большое количество аббревиатур, которое затрудняет чтение диссертации.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация А.В. Мельникова является законченной научно-квалификационной работой, посвященной решению задачи оптимизации ионообразования в газоразрядной камере индуктивного высокочастотного двигателя и разработке инженерной модели индуктивного разряда, имеющей значение для развития электроракетных двигателей и технологических источников ионов. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Результаты опубликованы в трех рецензируемых научных изданиях.

Представленная работа удовлетворяет всем критериям, приведенным в Положении о присуждении ученых степеней, 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](mailto:ekralkina@mail.ru)



Кралькина Е.А.

Подпись официального оппонента д.ф.-м.н. Кралькиной Е.А. удостоверяю.

Декан физического факультета МГУ  
доктор физико-математических наук, профессор

