

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
стратегическому развитию  
Московского физико-технического  
института (государственного  
университета),

член-корреспондент РАН

Аушев Тагир

Абдул - Хамидович

2016 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Машерова Павла Евгеньевича**  
«Разработка космического источника ионов на основе высокочастотного  
ионного двигателя»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05. 07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов.

В настоящее время на геостационарной орбите Земли имеется большое количество отработавших космических аппаратов, которые иначе называются объектами космического мусора. Они представляют объективную угрозу для работающих на геостационарной орбите космических аппаратов. На 62 Генассамблее ООН в 2007 году были приняты Руководящие принципы предупреждения образования ОКМ, согласно которым космические аппараты после завершения их эксплуатации должны быть уведены из области геостационарной орбиты. В современных космических аппаратах на этапе проектирования



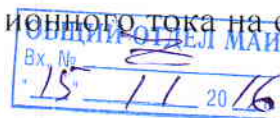
определенные механизмы увода их с геостационарной орбиты в конце срока эксплуатации. Одним из механизмов увода существующих объектов космического мусора является использование сервисных космических аппаратов. В связи с этим, диссертация Машерова П. Е., посвященная разработке источника клинообразного пучка ионов для удаления с геостационарной орбиты крупногабаритных объектов космического мусора, является вполне *актуальной*.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В *первой* главе диссертации выполнен обзор литературы и обосновано использование для решения поставленной задачи энергоэффективного ВЧ индукционного (ВЧИ) источника ионов с плоским индуктором и ферритовым сердечником.

Во *второй* главе диссертации описаны лабораторная модель ВЧ источника ионов, экспериментальный стенд для ее испытания и результаты его отработки. Можно отметить конструктивную простоту созданной модели по сравнению с известными разработками ВЧИ ионных двигателей.

В *третьей* главе приведены методики интегральной и локальной диагностики ВЧИ газоразрядного узла. Обе части этой главы содержат достаточное количество новых элементов. Способ интегральной диагностики газоразрядного узла модели на этапе макетных испытаний новых изделий позволил корректировать конструкцию и систему электропитания разряда. Локальную диагностику ВЧИ плазмы предложено проводить зондами Ленгмюра с использованием автоматизированной зондовой станции VGPS-12. Технические возможности данного оборудования позволили диссертанту предложить методику измерения толщины зондового слоя и массы ионов рабочего газа в максвелловской плазме. Кроме того, предложены методы выбора размеров цилиндрических зондов, практически устраняющих вносимые в плазму возмущения, и количественной оценки близости исследуемой плазмы к максвелловской среде. Также диссертантом предложен метод и устройство для оценки плотности ионного тока на стенку



под плавающим потенциалом, то есть, на эмиссионный электрод ионно-оптической системы модели. Для этого разработан радиально подвижный имитатор пристеночного плоского зонда Ленгмюра.

В *четвертой* главе представлены результаты исследования плазмы в газоразрядной камере модели при давлении 2 мТорр. Интегральная диагностика модели выявила полный набор параметров её технического облика и повышенную энергоэффективность модели. Зондовые измерения показали близость невозмущённой плазмы ксенона к максвелловской среде и отсутствие этой характеристики около имитатора пристеночного плоского зонда. Была установлена однородность плазмы в газоразрядной камере и перед электродами ионно-оптической системы. Эти данные были дополнены измерениями толщины зондового слоя на цилиндрическом зонде и средней массы ионов ксенона, подтвердившими корректность использования метода Дрювестейна при интерпретации зондовых измерений и чистоту ксенона. С помощью экстраполяции ионных ветвей зондовых характеристик была оценена плотность ионного тока на эмиссионный электрод. Результаты локальной диагностики ксеноновой плазмы были использованы при разработке ускорительных ячеек ионно-оптической системы для модели источника ионов.

*Пятая* глава диссертации посвящена выбору конструктивной схемы щелевой ионно-оптической системы с целью минимизации угла расходимости ионного пучка. Согласно выполненным расчётам полуугол расходимости ионного пучка поперёк щелей должен был составить 3-4 градуса. Эксперимент подтвердил корректность выполненной разработки ионно-оптической системы и показал уменьшенный полуугол расходимости ионного пучка в пределах 2-3 градусов.

К основным результатам диссертационного исследования, обладающим *научной новизной*, относятся следующие положения и разработки соискателя:

- применение в ВЧ источнике ионов плоского индуктора с ферритовым сердечником, которые обеспечили упрощение конструкции и повышенную энергоэффективность;
- методика интегральной диагностики, на которую была подана заявка на изобретение и получено положительное решение патентного ведомства РФ;
- метод и устройство для оценки плотности ионного тока на эмиссионный электрод ионно-оптической системы с помощью подвижного имитатора плоского пристеночного зонда Ленгмюра;
- критерий выбора размеров цилиндрического зонда, обеспечивающих малость возмущений изучаемой плазмы;
- метод количественной оценки близости плазмы к максвелловской среде;
- метод зондовых измерений толщины зондовых слоёв на цилиндрическом зонде и средней массы ионов.

*Практическая ценность* результатов диссертационной работы заключена в том, что:

- разработана и испытана модель источника ионного пучка упрощенной конструкции и повышенной энергоэффективности, обладающего высокой однородностью радиального распределения таких параметров плазмы, как концентрация и температура электронов. Данное устройство способно успешно решать актуальную задачу увода с геостационарной орбиты объектов космического мусора;
- предложенные методики интегральной и локальной диагностики позволяют получать более полную информацию о характеристиках разрабатываемых ВЧИ газоразрядных устройств;
- новая область зондовой диагностики полезна при изучении плазменных устройств различных видов: ВЧ индукционных и емкостных разрядов, СВЧ разрядов, разряда постоянного тока, и источников покоящейся плазмы.

Результаты работы могут быть рекомендованы к *внедрению* на предприятиях Роскосмоса, занимающихся производством ионных плазменных двигателей:

- ОКБ «Факел», г. Калининград;
- ОАО «Конструкторское Бюро Химавтоматики» (КБХА), г. Воронеж;
- ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва.

А также, учитывая высокую однородность достигнутых параметров плазмы (концентрация и температура электронов) на предприятиях, занимающихся разработкой ионных источников различного назначения. Важно отметить, что в высокочастотном разряде отсутствуют продукты распыления электродов, то есть, нет примесей, которые могут оказывать негативное влияние на технологический процесс.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов, научных положений и сделанных выводов достигается уместным применением существующих методик измерений, соответствием измеренной расходимости пучка ионов расчетным значениям, а также непротиворечивостью аналогичным результатам других авторов.

В диссертации следует отметить следующие **недостатки**:

- в обзорной части диссертации на стр. 20 в формуле (1.7) дано ошибочное выражение для длины релаксации энергии электронов в плазме высокого давления  $\lambda_e = \lambda_e M_i / m_e$ , которое на самом деле должно быть записано как  $\lambda_e = \lambda_e (M_i / m_e)^{1/2}$ ;
- на стр. 149 при описании результатов испытаний ионного пучка приведён диапазон оценки энергетической цены ионов 775-1000 Вт/А, но формула для её расчёта отсутствует;
- не приведено обоснование применения пакета прикладных программ IGUN при достаточно низких ускоряющих напряжениях.

Основные результаты работы обсуждались на научных семинарах НИИ ПМЭ МАИ и кафедры 208 МАИ, а также докладывались на российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Машерова П.Е. является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для

развития ракетнокосмической отрасли, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Диссертация Машерова Павла Евгеньевича обсуждена на научном семинаре кафедры прикладной физики МФТИ «01» ноября 2016 г., протокол № 5.

Профессор кафедры прикладной физики МФТИ,  
доктор физ. – матем. наук, профессор



Александров  
Николай  
Леонидович

Заведующий кафедрой прикладной физики МФТИ,  
доктор физ. – матем. наук, профессор



Леонов  
Алексей  
Георгиевич

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер.,9  
Телефон: 8 (495) 408-53-55

Адрес электронной почты: [leonov.ag@mipt.ru](mailto:leonov.ag@mipt.ru)

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико–технический институт (государственный университет)»