

## Отзыв

Официального оппонента Семёнкина Александра Вениаминовича на диссертацию Фроловой Юлии Леонидовны «ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ НА РАСХОДИМОСТЬ СТРУИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

### Актуальность темы исследования

Применение электроракетных двигателей (ЭРД) различных типов на космических аппаратах (КА) продолжает расширяться. Наибольший объем применения на современном этапе имеют стационарные плазменные двигатели (СПД). С ростом срока активного существования КА увеличивается необходимый ресурс работы двигателей, для решения перспективных задач расширяется диапазон мощности и удельного импульса СПД, ведется обработка новых двигателей и двигательных установок на их основе.

Плазменная струя, создаваемая ЭРД, может оказывать целый ряд воздействий на космический аппарат, в том числе негативных – распыление функциональных покрытий, загрязнение поверхностей и др. Эти воздействия существенны и должны учитываться при проектировании двигательной установки и космического аппарата в целом.

Необходимыми исходными данными для определения и расчета таких воздействий являются характеристики струи, полученные экспериментально. Однако измеренные параметры существенно меняются в зависимости от внешних условий – давления окружающей среды, влияния окружающих элементов конструкции, условий поведения испытаний. Как правило, все расчеты воздействий выполняются на основе экспериментальных данных, полученных в стендовых условиях. Поэтому для корректной оценки влияния струй двигателей на космический аппарат в условиях космического пространства необходим учет различий условий штатной эксплуатации и стендовых условий, при которых проводятся измерения, и разработка методики переноса результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации. **Тематика и направление работ диссертации, безусловно, являются актуальными и имеют важное практическое значение.**

### Цель работы.

Целью диссертации является исследование влияния условий испытаний на измеряемые параметры струи стационарного плазменного двигателя и разработка методики переноса

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

07 12 2020

результатов измерений параметров плазменной струи СПД, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **основные задачи:**

1. Разработка программы и методики измерений параметров плазменной струи высокоимпульсного СПД, получить экспериментальные данные об угловом и энергетическом распределении ионов струи в различных условиях.
2. Обработка и анализ полученных данных, выявление закономерности изменений параметров струи в зависимости от давления в вакуумной камере, расстояния от двигателя и других условий эксперимента.
3. Разработать методики переноса результатов измерений параметров струи, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации, и определить параметры струи высокоимпульсного СПД для условий натурной эксплуатации.
4. Разработать рекомендации по порядку проведения измерений параметров плазменных струй СПД для получения данных в объеме, достаточном для последующей экстраполяции на условия натурной эксплуатации.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 162 страницах, содержит 85 иллюстраций и 9 таблиц. Библиография включает 68 наименований.

**Во Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования,

**В первой главе** приведены общие характеристики плазменных струй стационарных плазменных двигателей (СПД). Проведен обзор открытой литературы в части оценки влияния давления в вакуумной камере на параметры струи СПД. При этом в результате влияния стенок вакуумной камеры и воздействия фонового давления на процессы формирования и распространения плазменной струи возникают значительные ошибки измерений, которые не в полном объеме учитываются в существующих моделях.

**Во второй главе** приводится описание экспериментальных установок, применяемых систем измерений и проводимых в рамках работы испытаний высокоимпульсного СПД. Испытания проводились на вакуумных стендах ИЦК и АО «ИСС» по методике, разработанной Фроловой Ю.Л. Приводятся полученные данные, которые являются

эмпирическим базисом для последующего построения моделей струй, реализуемых при различных условиях испытаний.

**Третья глава посвящена** предварительному анализу и обработке результатов измерений параметров струй СПД в вакуумных камерах.

Для рассмотрения ионы струи были разделены на три группы: быстрые ионы струи с энергиями от 550 до 800 эВ ( $\alpha$ -ионы), ионы перезарядки с энергиями 0-60 эВ ( $\beta$ -ионы) и ионы промежуточных энергий с энергиями 60-550 эВ ( $\gamma$ -ионы).

Рассматриваются физические механизмы появления ионов с различной энергией – высокоэнергетичная группа, образующаяся непосредственно в канале двигателя и ускоряющиеся приложенной разностью потенциалов, ионы перезарядки, образующиеся в результате взаимодействия высокоэнергетичных ионов с остаточной атмосферой. Автором выдвинута гипотеза, что группа ионов промежуточных энергий формируется в результате упругих столкновений высокоэнергетичных ионов

**В четвертой главе** приводятся экспериментальные результаты и анализ влияния давления в вакуумной камере на параметры плазменной струи высокоимпульсного СПД. Показано, что давление в камере оказывает существенное влияние на параметры струи высокоимпульсного СПД. В связи с этим для оценки параметров струи, реализуемой в условиях натурной эксплуатации, необходимо применять методику экстраполяции.

**В пятой главе** представлена методика экстраполяции параметров струи на условия натурной эксплуатации. На основе стендовых экспериментальных результатов получена зависимость, позволяющая пересчитать параметры струи для условий натурной эксплуатации и приведены результаты расчетов воздействия струи высоковольтного двигателя на элементы космического аппарата. Представлены рекомендации по методике измерения параметров струи в условиях стенда, позволяющие получить данные, необходимые для получения достоверных оценок параметров плазменной струи.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и показано, что поставленные задачи решены.

**Результаты диссертационной работы обладают научной новизной и практической полезностью.**

### **Научная новизна результатов исследований заключается в следующем**

Выявлены закономерности изменения угла расходимости, углового и энергетического распределений потоков ионов струи высокоимпульсного СПД при изменении давления в вакуумной камере и расстояния от двигателя.

Разработана методика переноса результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации, в которой учитывается ослабление потока ионов в вакуумной камере и исключены индуцированные ионы перезарядки из тормозных характеристик зондов-энергоанализаторов.

### **Практическая значимость результатов исследований**

Предложенные методики позволяют значительно повысить точность измерений параметров плазменных струй СПД и оценить параметры струи, реализуемые в условиях натурной эксплуатации КА.

Разработанные рекомендации по порядку проведения измерений параметров струй СПД в стендовых условиях, позволяют получить данные, необходимые для оценки параметров струи в условиях натурной эксплуатации.

**Достоверность** результатов экспериментальных исследований подтверждается применением современной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения, а также проверкой полученных результатов с использованием различных способов и измерительных приборов. Достоверность теоретических исследований обеспечивается использованием общепринятых физических моделей и математических методов и подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчетов с результатами эксперимента.

### **В качестве недостатков работы можно отметить следующее:**

Не приведен анализ особенностей средств измерений, применявшихся другими авторами. Особенности измерительных приборов, использованных в работе, и их влияние на результаты измерений, в том числе «угол зрения» анализаторов спектра и зондов, детально не исследованы.

Точки измерения давления в вакуумной камере не описаны, хотя для рассматриваемой задачи особенно важно локальное давление перед двигателем и обратные потоки нейтралов от элементов камеры и оборудования, попадающего в поток плазмы.

Не приведены данные по измерению потенциала плазмы в исследуемом пламенном потоке и уровню колебаний измеряемых параметров плазмы, оказывающих влияние на распространение плазменного потока.

Однако отмеченные недостатки не снижают общего положительного представления о диссертации как о цельной научной работе и не ставят под сомнение полученные результаты и разработанные рекомендации. Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решены важные задачи, имеющие большое значение для создания и применения электроракетных двигательных установок на основе стационарных плазменных двигателей.

Диссертационная работа является актуальной, обладает новизной и практической полезностью, выводы и рекомендации, сделанные в работе, обоснованы.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы.

В целом диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ, а ее автор Ю.Л. Фролова заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Заместитель генерального директора - начальник  
отделения 3 ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша",  
доктор технических наук



А.В. Семёнкин

Подпись официального оппонента Семёнкина А.В. удостоверяю  
Ученый секретарь ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
кандидат военных наук

Ю.Л. Смирнов

Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Исследовательский центр имени И.В.Келдыша»,

Адрес: Онежская ул., д.8, г. Москва, 125438

Электронная почта: [semenkin@kerc.msk.ru](mailto:semenkin@kerc.msk.ru)

Телефон: 8 (495) 456-20-63

*С отзывами ознакомлена 09.12.20*

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the official reviewer or secretary mentioned in the text.