

На правах рукописи



ФРОЛОВА ЮЛИЯ ЛЕОНИДОВНА

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ВАКУУМНОЙ
КАМЕРЫ НА РАСХОДИМОСТЬ СТРУИ СТАЦИОНАРНОГО
ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Доктор технических наук Надирадзе Андрей Борисович

Официальные оппоненты: Семенкин Александр Вениаминович, доктор технических наук, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени И.В.Келдыша», заместитель генерального директора по космическим аппаратам и энергетике – начальник отделения

Твердохлебова Екатерина Михайловна, кандидат технических наук, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», заместитель начальника центра

Ведущая организация: АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»

Защита состоится «28» декабря 2020 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: mai.ru/upload/iblock/0fb/Tekst-dissertatsii-Frolovoy-YU.L..pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Стационарные плазменные двигатели (СПД) находят широкое применение на борту современных космических аппаратов (КА). Это связано, с одной стороны, с повышением требований к транспортным задачам в космосе, а с другой – с прогрессом в развитии средств бортовой энергетики. Такие достоинства, как высокий удельный импульс, малые массовые и габаритные характеристики, возможность регулирования величины тяги делают применение СПД весьма перспективным.

В первую очередь, СПД используются для решения таких задач, как приведение геостационарных КА в точку стояния, удержания КА в орбитальной позиции и увода КА на орбиту захоронения по окончании срока его эксплуатации. Известны применения СПД для межпланетных перелетов, например, для полета к Луне. В последние годы СПД начали применяться для довыведения высокоорбитальных спутников связи с низкой околоземной орбиты на геостационарную.

Столь широкое применение СПД обусловлено тем, что высокие скорости истечения, достигающие 20-30 км/с позволяют (по сравнению с традиционными химическими двигателями, у которых скорость истечения не превышает 3,5 км/с) существенно снизить массу топлива, необходимого для решения задачи, и, следовательно, значительно увеличить массу полезной нагрузки КА.

Вместе с тем, высокие скорости истечения частиц и их ионизированное состояние приводят к тому что, струя СПД может интенсивно взаимодействовать с материалами внешних поверхностей КА и его системами.

Среди возможных эффектов воздействия работающего СПД на КА выделяют эрозионное, механическое, тепловое и загрязняющее воздействие. Так, например, эрозия защитных стекол солнечных батарей (СБ) под воздействием плазменной струи СПД может явиться причиной дополнительной деградации характеристик фотоэлектрических преобразователей и возникновения электрических разрядов. Существенным фактором, ограничивающим ресурс КА, является осаждение продуктов распыления на радиаторах системы терморегулирования и астронавигационной аппаратуре. Механическое воздействие, возникающее в результате взаимодействия ионов струи с поверхностями КА, приводит к возникновению дополнительных возмущающих моментов, потерям тяги и, как следствие, к повышенному расходу рабочего тела двигателей коррекции и стабилизации для парирования данного вида воздействия.

Таким образом, воздействие струй СПД на КА является весьма сложным и многообразным процессом, в который вовлекаются многие жизненно важные системы и подсистемы КА. При определенных условиях перечисленные выше эффекты могут приводить к различным негативным последствиям вплоть до полной потери работоспособности КА или его систем. Поэтому одной из важнейших проблем применения СПД в космосе является обеспечение его совместимости с элементами и системами КА, а также минимизация последствий воздействия СПД на КА.

Для решения этой проблемы уже на ранних стадиях проектирования КА необходимо провести комплексный анализ взаимодействия плазменной струи СПД с функциональными поверхностями и системами КА. Очевидно, что для проведения такого анализа необходимо обладать набором параметров струи двигателя в натуральных условиях эксплуатации. Однако получение этих данных в условиях космоса сопряжено со значительными технологическими трудностями, обусловленными ограничениями по количеству и местам установки зондов, измеряющих параметры струи, а также большими затратами. Количество реализованных в настоящее время летных экспериментов измеряется единицами, а их информативность относительно невысока.

Существенно более полными и информативными являются измерения параметров струи в стендовых условиях. Однако в ходе наземных испытаний невозможно в полном объеме имитировать условия окружающей среды, характерной для работы двигателя в космосе. Так, например, концентрация частиц остаточной атмосферы в вакуумных камерах (даже при использовании высокопроизводительных средств откачки) на несколько порядков превосходит реальную концентрацию частиц в космическом пространстве. При этом на результаты измерений значительное влияние оказывают столкновения ионов струи с частицами остаточной атмосферы в вакуумной камере, а также проникновение частиц остаточной атмосферы в область ионизации и ускорения, локализованных в разрядном канале двигателя.

Измерения параметров струи в условиях относительно большого давления остаточной атмосферы сопряжено с появлением паразитных потоков, искажающих результаты измерений и существенно снижающих их точность. Причем, вследствие быстрого падения плотности ионного тока струи от оси к периферии (специфика струй СПД), наибольшие ошибки в оценке параметров возникают именно в периферийной области струи, то есть там, где происходит наиболее интенсивное воздействие ионов на поверхности конструктивных элементов КА и где требуется наибольшая точность прогнозирования воздействия струи на КА.

Если оценки воздействия струи на КА окажутся завышенными, это может повлечь за собой необходимость потенциально неоправданного изменения конструкторско-компоновочной схемы КА для исключения возможных негативных последствий воздействия струи СПД. Если же оценки окажутся заниженными, увеличивается риск невыполнения КА поставленной задачи из-за того, что последствия воздействия струи были учтены, но не в полном объеме.

Учитывая возможность возникновения таких ошибок, разработчики КА вынуждены вводить дополнительные запасы по мощности и другим функциональным характеристикам бортовых систем, существенно снижающие эксплуатационные характеристики КА в целом. В некоторых случаях разработчик может и вовсе отказаться от применения СПД, чтобы исключить возможные риски и обеспечить выполнение требуемой задачи.

Решение этой проблемы в настоящее время ведется по нескольким направлениям. Одно из них состоит в переносе результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации. В основе данного подхода лежит тот или иной метод экстраполяции, позволяющий определить параметры струи, реализуемые в космосе, по экспериментальным данным, полученным в условиях стенда. Наиболее сложным в данном случае является выбор и обоснование метода экстраполяции, позволяющего получить гарантированный результат, не требующий дополнительного экспериментального подтверждения.

В настоящее время исследования в этом направлении ведутся крайне ограниченным числом специалистов и пока не привели к практически значимым результатам.

Таким образом, актуальность работы обусловлена следующим:

1. На сегодняшний момент не существует методики переноса результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации, позволяющей получить гарантированные оценки параметров струи, не требующие дополнительного экспериментального подтверждения.

2. Разработка такой методики позволит значительно повысить точность определения параметров струи, реализуемых в космосе, и, как следствие – повысить точность прогнозирования воздействия плазменной струи СПД на элементы и системы КА.

Цель работы.

Целью диссертации является разработка методики переноса результатов измерений параметров плазменной струи СПД, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **основные задачи**:

1. Разработать программу и методику измерений параметров плазменной струи высокоимпульсного СПД, получить экспериментальные данные об угловом и энергетическом распределении ионов струи в различных условиях.

2. Провести обработку и анализ полученных данных, выявить закономерности изменений параметров струи в зависимости от давления в вакуумной камере, расстояния от двигателя и других условий эксперимента.

3. На основании выявленных закономерностей разработать методику переноса результатов измерений параметров струи, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации. 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.

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

Научная новизна результатов исследований

- 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.

Выявленные закономерности позволяют конкретизировать направления дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области формирования и распространения плазменных струй СПД.

Результаты исследования внедрены в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва» (далее – АО «ИСС») при проведении плановых ОКР.

Личное участие автора

1. Разработана программа и методика проведения измерений параметров струи высокоимпульсного СПД в ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша" (далее – ИЦК) и АО «ИСС».

2. Проведена обработка и анализ полученных экспериментальных данных, выявлены закономерности изменения параметров струи СПД при изменении давления в вакуумной камере и расстояния от двигателя.

3. Разработана методика переноса результатов измерений параметров струи СПД в стендовых условиях на условия натурной эксплуатации.

4. Определены параметры струи высокоимпульсного СПД.

5. Разработаны рекомендации по порядку проведения измерений параметров струй СПД в стендовых условиях.

Положения, выносимые на защиту

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

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

- Рекомендации по порядку проведения измерений параметров струй СПД в стендовых условиях, позволяющие получить данные требуемой точности, необходимые для определения параметров струи в условиях натурной эксплуатации.

Апробация результатов исследования

1. «Влияние давления в вакуумной камере на процессы формирования плазменной струи СПД» Конференция «Авиация и космонавтика» 21.11.2018 г.

2. «Оценка эффективной площади многосеточных зондов-энергоанализаторов по скорости распыления образца-свидетеля», Международная конференция «ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ-2020» 20-22 мая 2020 г., г. Москва, РУДН (перенесено на 14-16 октября 2020)

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 5 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы.

Структура и объем 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

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. Показано, что существующие модели струи СПД строятся по результатам измерений в вакуумной камере. 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. Расчеты воздействия плазменной струи на КА, выполненные с помощью таких моделей, могут приводить к сильно завышенным или заниженным значениям параметров воздействия, что приводит к ухудшению расчетных эксплуатационных характеристик КА, а в некоторых случаях исключает возможность реализации той или иной компоновки. В связи с этим необходимо повышать точность модели струи СПД и, как следствие, повышать точность расчетов воздействия плазменных струй СПД на КА.

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 автором.

Основными отличиями экспериментов в АО «ИСС» и ИЦК являлись: объем вакуумной камеры, система питания – управления (СПУ) двигателем

(штатная или лабораторная), конструкция энергоанализаторов (ЭА) для измерений параметров струи, способ регулирования давления в камере.

В камере АО «ИСС» давление регулировали путем выключения одного или двух насосов, снижая, тем самым суммарную производительность насосов. В ИЦК давление меняли путем натекания в вакуумную камеру ксенона при постоянной скорости откачки.

В ходе испытаний одновременно проводились как измерения параметров плазменной струи (плотность ионного тока и энергетические спектры ионов на расстояниях 0,6-1,5 м от двигателя при различных углах отклонения от оси струи и при различных давлениях в вакуумной камере), так и измерения интегральных параметров двигателя (ток разряда, ускоряющее напряжение, расход рабочего тела, тяга, пульсации тока разряда) при каждом значении давления в вакуумной камере. Массив данных был получен в диапазоне давлений от 1,1 до 4,3 мПа (по ксенону) с шагом 1,1 мПа.

Полученные данные 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.

Все ионы струи были разделены на три класса: быстрые ионы струи с энергиями от 550 до 800 эВ (α -ионы), ионы перезарядки с энергиями 0-60 эВ (β -ионы) и ионы промежуточных энергий с энергиями 60-550 эВ (γ -ионы). Относительное содержание этих ионов в струе СПД (на примере двигателя ВНТ-1500) приведено на рисунке 1.

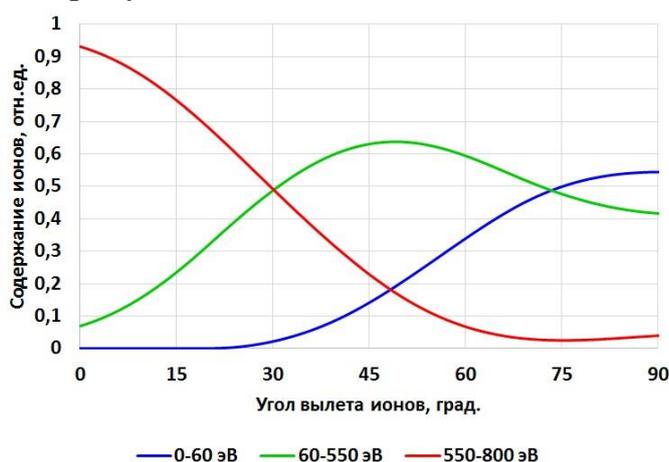


Рисунок 1. Зависимость энергетического состава струи от угла вылета ионов в струе двигателя ВНТ-1500

Проведенный анализ показал, что все регистрируемые α -ионы являются ионами струи и должны учитываться в модели струи. Вклад быстрых ионов,

образующихся в результате «впрыска» частиц остаточного газа в область разряда не превышает 1-2% и может не учитываться при построении модели.

Ионы перезарядки образуются, в основном, в результате взаимодействия ускоренных ионов струи с атомами остаточного газа вакуумной камеры. При давлении в вакуумной камере 1-10 мПа (по ксенону) содержание β -ионов в струе составляет от 20 до 80 %. В периферийных зонах струи, где потоки ускоренных ионов малы, доля ионов перезарядки существенно возрастает и может достигать 80-100 % (см. рисунок 2).

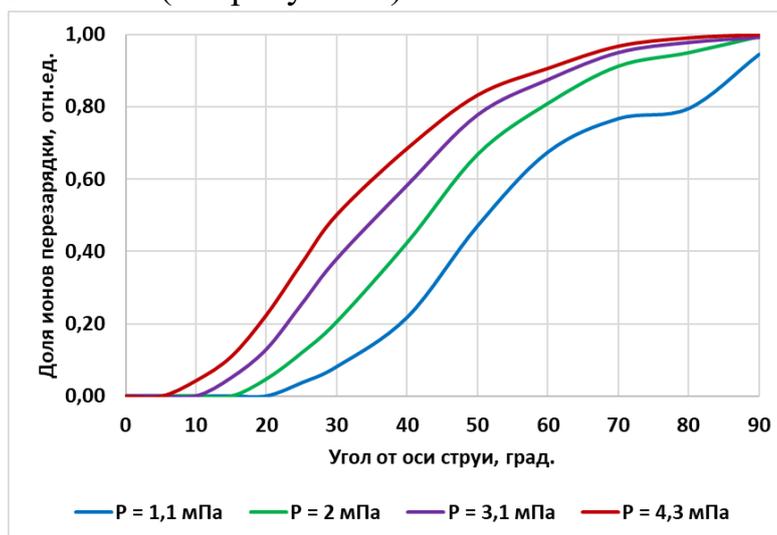


Рисунок 2. Угловые зависимости доли ионов перезарядки при различном давлении в камере

Таким образом, показано, что β -ионы, фиксируемые ЭА, являются, преимущественно, индуцированными ионами перезарядки и вносят дополнительную погрешность (до 100 % и более в периферийной зоне струи) в результаты измерений. В связи с этим они должны быть исключены из модели.

Ионы промежуточных энергий являются наименее изученными ионами струи. По предварительным оценкам полный ток этих ионов может достигать 20-30 % тока струи, а вклад в тягу – 15-20 % тяги двигателя, что говорит о необходимости учета γ -ионов при построении модели струи.

Показано, что γ -ионы образуются в зоне разряда и в ближней зоне струи. Частицы фонового газа не участвуют в процессах генерации γ -ионов, поэтому можно считать, что γ -ионы являются ионами струи, а не вторичными ионами, образующимися в условиях вакуумного стенда. Влияние фонового давления на содержание γ -ионов незначительно.

В качестве одной из гипотез, объясняющей образование γ -ионов, была рассмотрена гипотеза упругих столкновений ускоренных ионов струи с неподвижными нейтральными атомами. Была составлена простейшая модель соударений, позволяющая оценить угловое распределение и энергетическое

распределение γ -ионов. Расчеты показали, что суммарные тормозные характеристики α -ионов струи и γ -ионов, образующихся в результате упругих столкновений, полностью повторяют измеренные тормозные характеристики (см. рисунок 3).

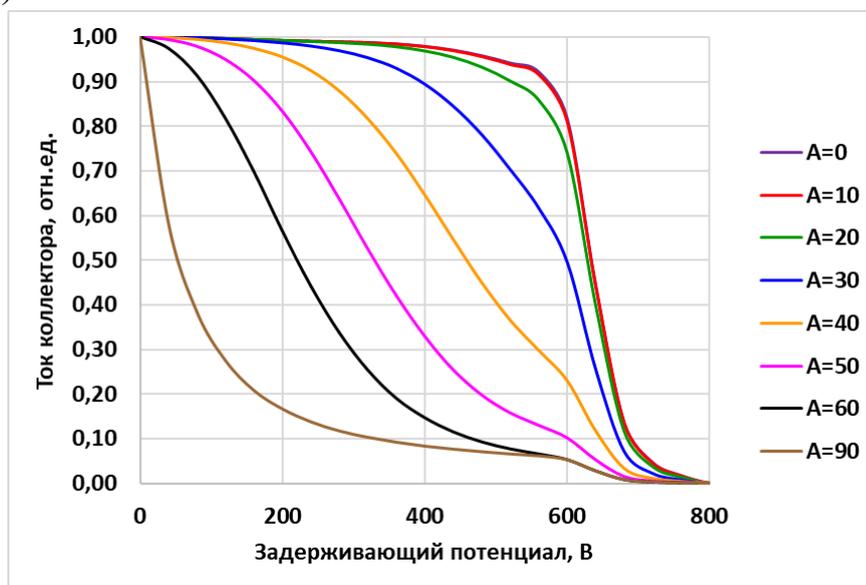


Рисунок 3. Расчетные тормозные характеристики ионов струи, полученные с применением модели упругого рассеяния

Однако обосновать полученное значение коэффициента рассеяния ускоренных ионов $K_{sc} \approx 0,44$ не удалось, поскольку при сечении упругого рассеяния $\sigma_{sc} = 2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, концентрации центров рассеяния составила $n_{sc} \approx 2 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, что значительно (на 2-3 порядка) превышает концентрацию атомов в разрядном канале двигателя. Поэтому предложенная модель генерации γ -ионов пока рассматривается только как рабочая гипотеза.

Обработка всех экспериментальных данных производилась по методике, основанной на использовании многофракционной модели струи, используемой в настоящее время для проведения анализов воздействия плазменных струй СПД на КА. Данная модель основана на модели точечного источника и позволяет описать сложное угловое и энергетическое распределение ионов в струе СПД. В ней принято, что частицы струи движутся бесстолкновительно вдоль лучей, выходящих из центра выходного сечения двигателя. При этом обмен энергией, массой и зарядом между частицами струи отсутствует. Исходными данными для построения модели являются тормозные характеристики зондов-энергоанализаторов, измеренные при различных углах вылета ионов. Для исключения ионов перезарядки при обработке использовалась только высокоэнергетическая часть тормозных характеристик, начиная с энергии отсечки $E_* = 30 \text{ эВ}$. Деление на фракции производилось методом обратной функции. Тормозные характеристики обрабатываются с применением сглаживающих сплайнов. Сглаживание

угловых характеристик фракций осуществляется совместно, посредством сглаживания функций деления.

$$\gamma_f(\varphi) = \frac{I_{>U}(U_f, \varphi)}{I_{>U}(0, \varphi)}, f = 0, \dots, M. \quad (1)$$

где $I_{>U}(U, \varphi)$ – тормозная характеристика зонда, установленного на угле φ .

Результат сглаживания функций деления представлен на рисунке 4.

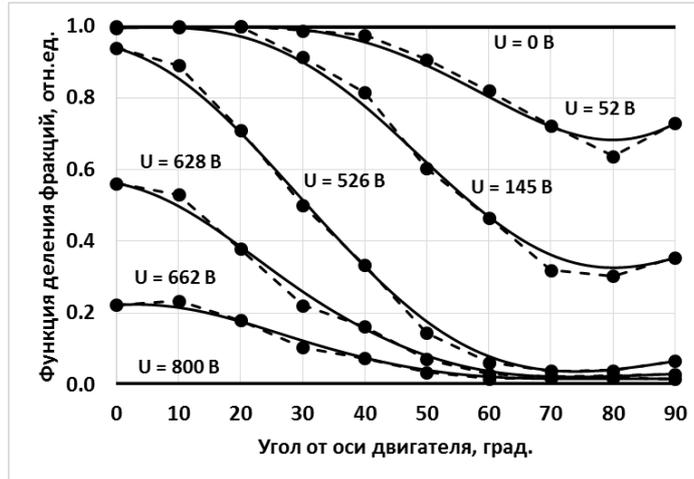


Рисунок 4. Исходные (маркеры и пунктир) и сглаженные (сплошные линии) значения функций деления фракций (выборочно)

Сглаженные угловые функции фракций струи приведены на рисунке 5.

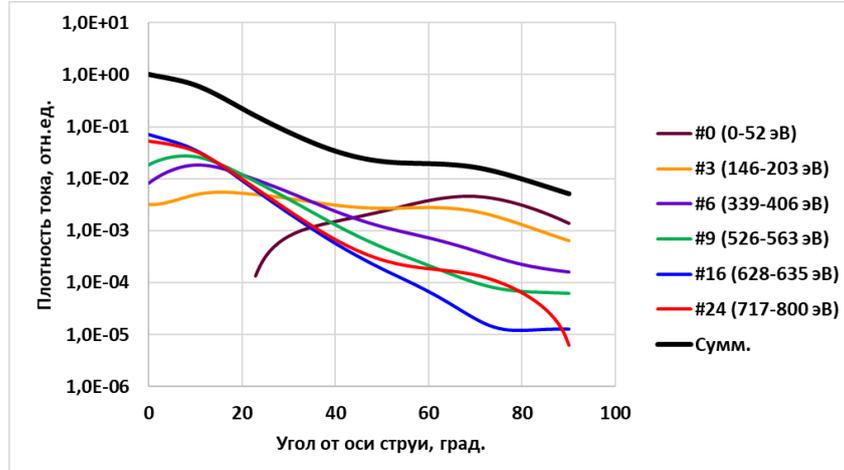


Рисунок 5. Угловые распределения фракций после применения процедуры сглаживания (выборочно)

После сглаживания модель струи калибруется по измеренному или паспортному значению тяги двигателя.

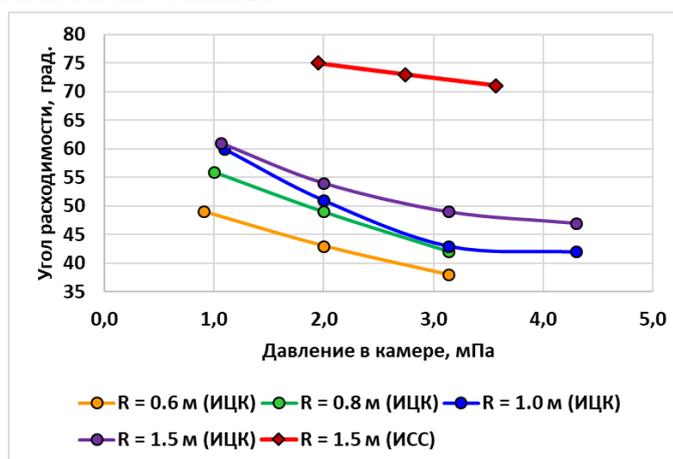
В результате проведенной обработки были определены параметры 17 моделей струи, реализуемых при различном давлении, на разном расстоянии от двигателя в двух вакуумных камерах.

В четвертой главе приводятся результаты анализ влияния давления в вакуумной камере на параметры плазменной струи высокоимпульсного СПД.

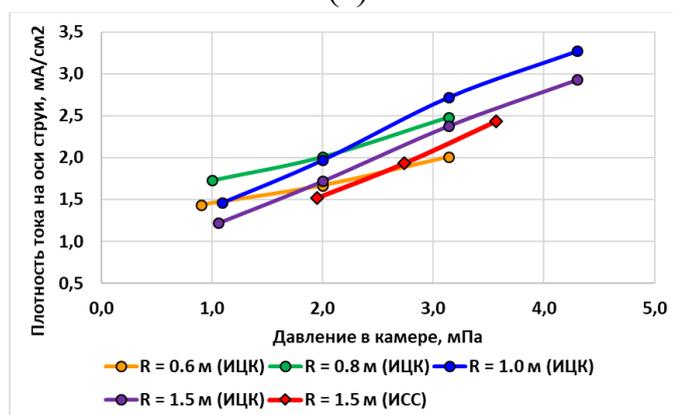
Анализ был проведен по 17 моделям струи, построенным по результатам стендовых измерений. На основании анализа установлено следующее.

С увеличением давления в диапазоне от 0 (натурные условия) до 4 мПа происходит уменьшение угла расходимости струи на 20-25°, увеличение плотности ионного тока на оси струи в 2-3 раза (см. рисунок 6) и уменьшение плотности тока в периферийной зоне струи в 10-100 раз (см. рисунок 7).

Причиной всех этих изменений является изменение формы краевых участков электростатической «линзы».



(а)



(б)

Рисунок 6. Зависимость угла расходимости струи от давления в камере (а), плотности тока на оси струи (б) и угловые зависимости ионов струи при различном давлении

Угловые зависимости плотности тока ионов струи в диапазоне углов вылета ионов $\varphi = 20-50^\circ$ практически не меняются при изменении давления в вакуумной камере (см. рисунок 7).

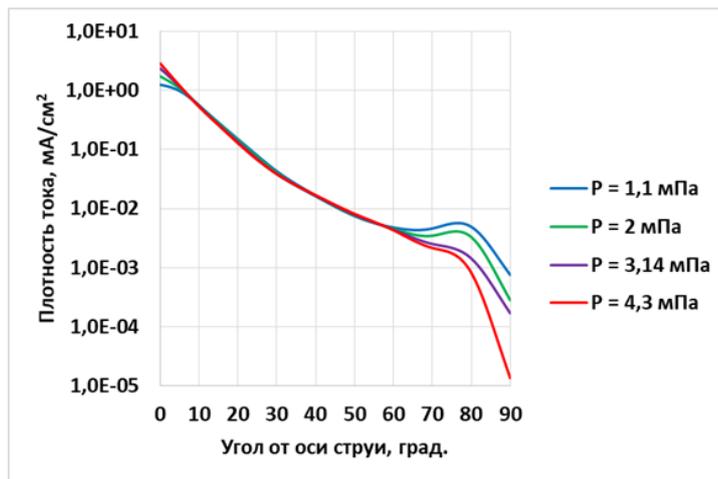


Рисунок 7. Угловые зависимости ионов струи на расстоянии 1.5 от двигателя при различном давлении в камере

Энергетический состав ионов струи (ионы перезарядки исключены) при изменении давления меняется незначительно.

По мере удаления от двигателя доля ионов промежуточных энергий в струе увеличивается, а доля быстрых ионов уменьшается. Угол расходимости увеличивается. Это объясняется тем, что генерация ионов промежуточных энергий происходит существенно ниже по потоку, чем быстрых ионов струи. В результате этого вектора скорости этих сортов частиц не совпадают. Быстрые ионы распространяются, преимущественно, по конусу, а ионы промежуточных энергий в радиальном направлении.

Угол расходимости струи в камере АО «ИСС» оказался значительно выше, чем в камере ИЦК, что может быть связано с применением штатной СПУ.

Таким образом, установлено, 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.

Для повышения точности и достоверности результатов экстраполяции из исходных тормозных характеристик были исключены ионы перезарядки. Пример зависимости тока коллектора от угла вылета ионов для различных значений давления приведен на рисунке 8.

Угловую функцию источника $I_s(P_i, \varphi_k)$ определяют исходя из того, что измеренные значения тока коллектора $I_k(P_i, \varphi_k)$ меньше истинных на величину коэффициента ослабления $K_{осл}(R_0, P_i)$ в следствии перезарядки ионов струи на частицах остаточного газа вакуумной камеры:

$$I_k(P_i, \varphi_k) = K_{осл}(R_0, P_i) \cdot I_s(P_i, \varphi_k) \quad (2)$$

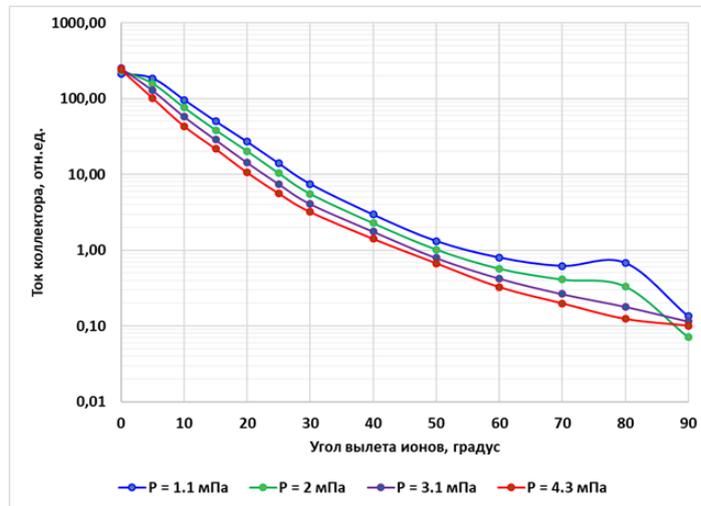


Рисунок 8. Зависимость тока коллектора ЭА от угла вылета ионов при различных значениях давления в вакуумной камере

Коэффициент ослабления рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{осл}}(R_0, P) = \exp\{-AP\},$$

где $A = \frac{\alpha \bar{\sigma}_k R_0}{kT_0}$ – параметр, обратный значению давления, при котором на

длине R_0 происходит ослабление ионов в e раз (при $R_0 = 1,5$ м, $A^{-1} = 14,8$ мПа); α – коэффициент, учитывающий изменение чувствительности датчика давления в зависимости от сорта газа. Для ксенона при использовании ионизационных датчиков $\alpha = 0,35$, магнетронных – $\alpha = 0,28$.

Полученные значения функции источника аппроксимировали для каждого фиксированного значения угла φ_i квадратичной функцией вида:

$$W_k(P) = a_k \cdot P^2 + b_k \cdot P + c_k,$$

где a_k, b_k, c_k – коэффициенты квадратичной функции, для каждого фиксированного значения угла вылета ионов φ_k .

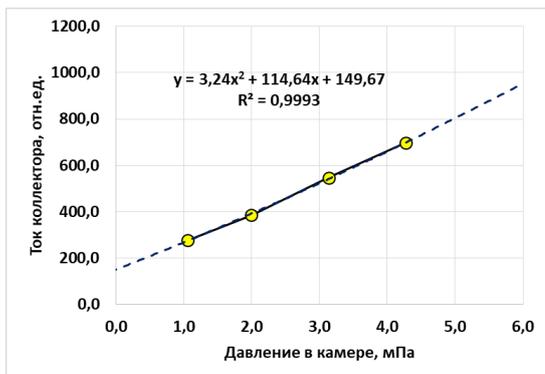
На рисунке 9 приведены результаты аппроксимации функции $I_s(P_i, \varphi_k)$ испытываемого двигателя для восьми выборочных точек по углу.

Из представленных рисунков видно, что зависимости $I_s(P_i, \varphi_k)$ при фиксированном значении φ_k достаточно гладкие и поддаются простейшей полиномиальной аппроксимации. Причем на оси струи эта зависимость вообще близка к линейной, при $\varphi_k = 10^\circ$ происходит резкое изменение характера кривой $I_s(P_i)$ и от линейной она переходит к параболической.

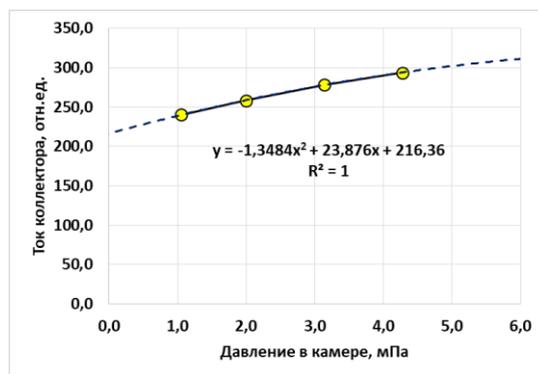
Исходя из этого можно сказать, что вариации $I_s(P_i, \varphi_k)$ являются закономерными и обусловлены изменениями формы электростатической линзы, а не ошибками измерений.

По полученным функциям $W_k(P)$ можно получить прогноз значения тока коллектора при $P = 0$, что и даст искомую функцию источника:

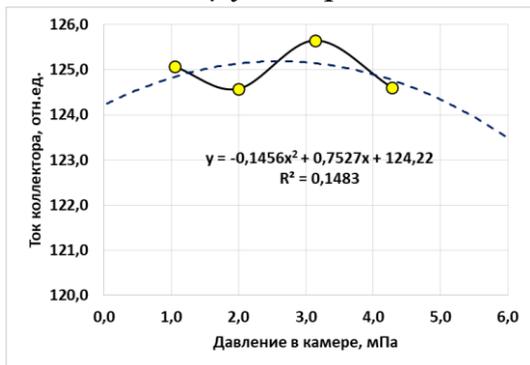
$$I_s^0(\varphi_k) = I_s(P = 0, \varphi_k) \approx W_k(P = 0).$$



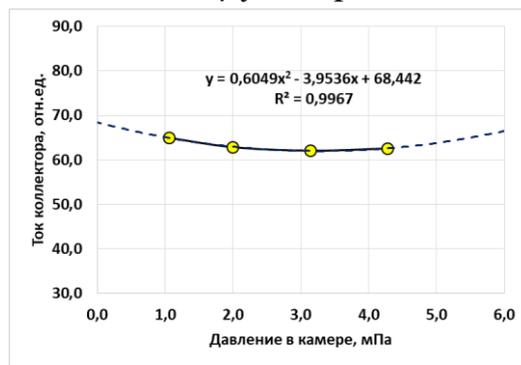
$\varphi_i = 0$ град.



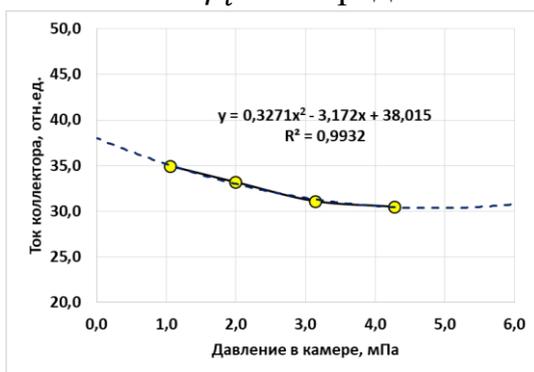
$\varphi_i = 5$ град.



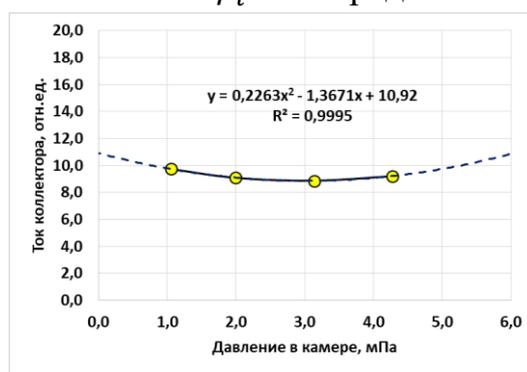
$\varphi_i = 10$ град.



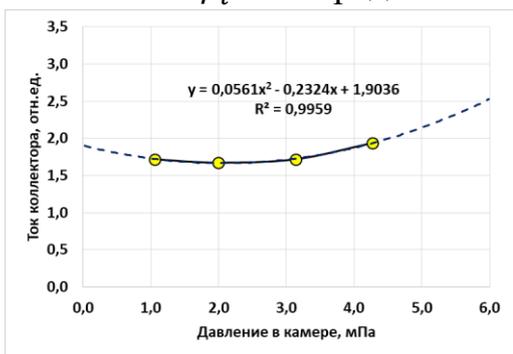
$\varphi_i = 15$ град.



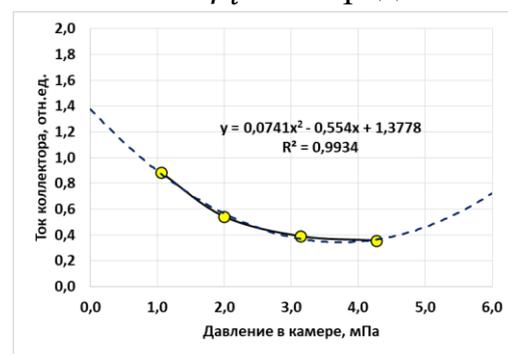
$\varphi_i = 20$ град.



$\varphi_i = 30$ град.



$\varphi_i = 50$ град.



$\varphi_i = 80$ град.

Рисунок 9. Аппроксимация функции источника СПД для различных значений угла вылета ионов

Результаты расчета угловой функции источника $I_s(P_i, \varphi_k)$ при различных давлениях в камере, а также результат экстраполяции функции источника на давление $P = 0$ приведены на рисунке 10.

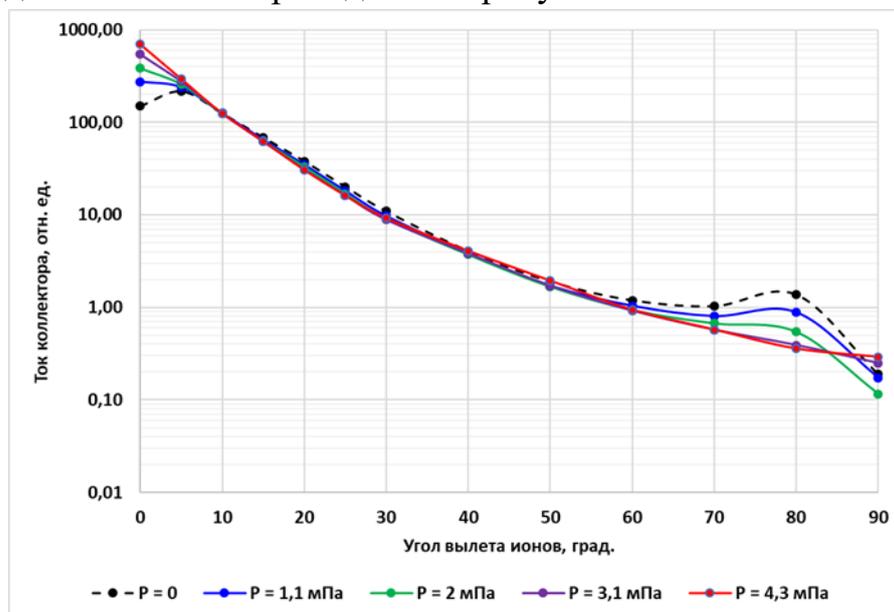


Рисунок 10. Функция источника ионов СПД при различных давлениях в камере

Из этого рисунка видно, что в интервале углов вылета ионов (от 10 до 50°) функция источника практически не зависит от давления. Это, во-первых, можно рассматривать как подтверждение адекватности построенной модели, поскольку вероятность случайного «совпадения» этих кривых достаточно мала. Во-вторых, это показывает, что влияние давления на центральную часть струи незначительно и, если учесть ослабление потока ионов за счет процессов перезарядки, можно получить угловую зависимость близкую к той, какая будет реализована в условиях натурной эксплуатации КА.

Полученная функция источника описывает изменение тока коллектора ЭА в зависимости от угла вылета ионов. Чтобы получить зависимость плотности ионного тока производилась калибровка $I_s^0(\varphi_k)$ по тяге двигателя.

Окончательный вид угловой зависимости плотности тока струи СПД при нулевом давлении представлен на рисунке 11.

Из рисунка 11 следует, что в ядре струи ($\varphi_k = 0 \dots 10^\circ$) и на периферии ($\varphi_k > 50^\circ$) наблюдается сильная зависимость плотности тока от давления. Причем, по мере уменьшения давления плотность тока ионов на оси струи уменьшается, а в периферийной зоне возрастает.

Изменения плотности тока ионов на оси струи не сказываются на результатах прогнозирования воздействия струи на КА, поскольку нахождение элементов конструкции КА в ядре струи исключено. Изменения

же в периферийной зоне могут существенно повлиять на результаты прогнозирования, поэтому применение процедуры экстраполяции является необходимым условием получения высокой точности расчетов и гарантированных оценок воздействия СПД на КА.

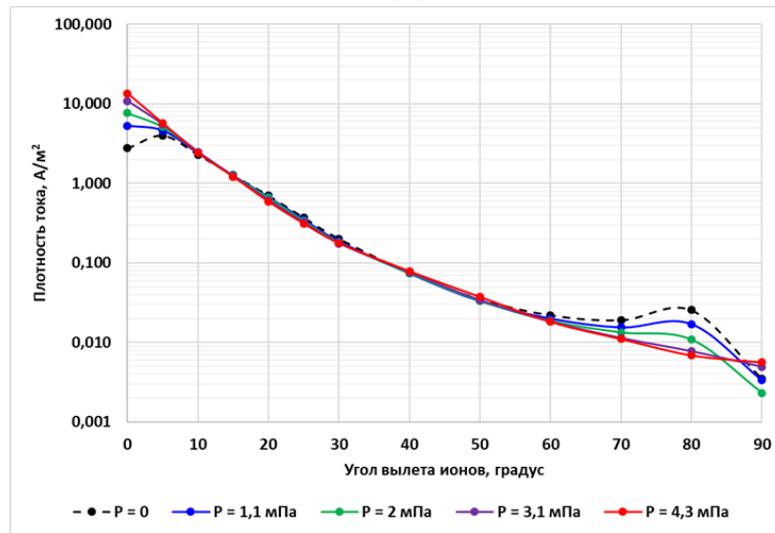


Рисунок 11. Угловая функция плотности ионного тока струи СПД при различных давлениях в камере, а также результат экстраполяции на $P = 0$

На рисунке 12 приведены результаты оценок эрозионного воздействия струй СПД на элементы конструкции КА (приведены изолинии максимальной скорости эрозии), полученные по моделям «вакуумной» струи (б) и струй, измеренных в условиях стенда (а) при давлении в камере 4.3 мПа.

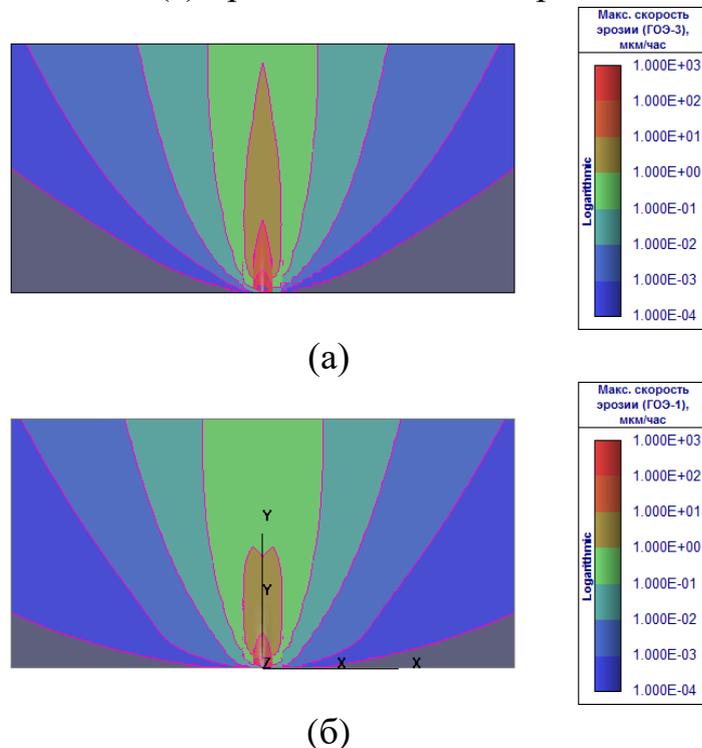


Рисунок 12. Скорость эрозии (алюминий) для параметров струи, измеренных при различном давлении: 4,3 мПа (а); и 0 мПа (б).

Из этого рисунка следует, что давление в вакуумной камере оказывает существенное влияние на параметры плазменной струи и, соответственно, на результаты прогнозирования ее воздействия на КА.

В заключительной части главы представлены рекомендации по методике измерения параметров струи в условиях стенда, позволяющие получить данные, необходимые для получения достоверных оценок параметров плазменной струи СПД в условиях натурной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны программа и методика измерений параметров плазменной струи СПД, по которой в двух вакуумных камерах различных организаций были получены экспериментальные данные об угловом и энергетическом распределениях ионов струи при различном давлении фонового газа и на различном расстоянии от двигателя.

2. Разработана методика обработки экспериментальных данных, основанная на применении многофракционной конической модели струи. Предложен метод совместного сглаживания угловых распределений энергетических фракций, позволяющий снизить погрешность измерения параметров струи в периферийной зоне до 20-30 %.

3. Определены закономерности изменений угла расходимости, углового и энергетического распределений потоков ионов струи высокоимпульсного СПД при изменении давления в вакуумной камере. Показано, что изменение параметров струи происходит не только из-за взаимодействия ионов струи с остаточным газом вакуумной камеры, но и в результате изменения поля течения ионов в разрядном канале двигателя и в ближней зоне струи.

4. Обоснована необходимость исключения из модели струи индуцированных ионов перезарядки, вносящих дополнительную ошибку в результаты измерений плотности тока в периферийных зонах.

5. Разработана методика переноса результатов измерений параметров струи в стендовых условиях на условия натурной эксплуатации, учитывающая ослабление потока ионов за счет взаимодействия с частицами остаточной атмосферы вакуумной камеры и изменения поля течения ионов в разрядном канале двигателя и в ближней зоне струи.

6. Определены параметры расчетной модели струи высокоимпульсного СПД для условий натурной эксплуатации. Установлено, что угол расходимости струи данного двигателя увеличивается с 47° при давлении 4-5 мПа до 75° при нулевом давлении. При этом плотность ионного

тока в периферийной зоне струи увеличивается в 5-7 раз, а на оси струи уменьшается в 2-3 раза.

7. Разработаны рекомендации по порядку проведения измерений параметров плазменных струи СПД в стендовых условиях, позволяющие получить достоверные оценки параметров плазменных струй в условиях натурной эксплуатации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Кожевников В.В., Надирадзе А.Б., Назаренко И.П. Фролова Ю.Л., Хартов С.А. Лабораторные исследования струй электроракетных двигателей зондовыми методами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 150-153.

2. Надирадзе А.Б., Фролова Ю.Л., Зуев Ю.В. Калибровка конической модели струи стационарного плазменного двигателя по интегральным параметрам двигателя // Вестник московского авиационного института. 2019. Т.26, № 4. С.144-155.

3. Надирадзе А.Б., Фролова Ю.Л. Механизмы образования ионов промежуточных энергий в струях стационарных плазменных двигателей // Вестник московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 3. С. 189-200.

Другие публикации

4. Надирадзе А.Б., Фролова Ю.Л. Влияние давления в вакуумной камере на процессы формирования плазменной струи СПД // Авиация и космонавтика: сб. трудов 17-ой Международной конференции (Москва, 19-23 ноября 2018). М.: Люксор, 2018. С.116-117 (739 с.)

5. Надирадзе А.Б., Бляхарский С.С., Фролова Ю.Л. Оценка эффективной площади многосеточных зондов-энергоанализаторов по скорости распыления образца-свидетеля // Инженерные системы: труды научно-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Российского университета дружбы народов: в 2 т. (Москва, 14–16 октября 2020 г.) – М.: Изд-во РУДН, 2020. С.148-156 (189 с.).