Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Меркурьев Денис Владимирович

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РЕЖИМАХ РАБОТЫ С ВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТЯГИ

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

### ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук Ким Владимир Павлович

Москва – 2015

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1. Общая характеристика и состояние разработки ЭРД и СПД	10
1.2. Обзор работ по исследованиям СПД на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги	18
1.3 Особенности схем СПД, работающих при повышенном разрядном напряжении	24
1.4 Обзор методов и результатов исследования процессов, протекающих в струе СПД.	33
1.5 Цели и основные задачи диссертационной работы	44
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ СПД-100П И СПД-85П НА РЕЖИМАХ С ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТЯГИ	[ 45
2.1. Описание экспериментальной установки и методик и средств измерения интеграль параметров моделей	ыных 45
2.1.1. Описание вакуумного стенда У-2В-1	45
2.1.2. Многосеточный зонд – энергоанализатор	48
2.1.3. Методика определения параметров ионного потока с использованием многосеточного зонда – энергоанализатора	50
2.2. Результаты исследования интегральных параметров СПД-100П при различных схе питания разряда	мах
2.2.1. Оптимизация конструкции модели СПД-100П	52
2.2.2. Результаты исследования характеристик модели СПД-100П-2 при двухступенчатой схеме питания разряда	56
2.3. Исследование стабильности выходных параметров моделей типа СПД-100П во времени	60
2.3.1. Предварительные испытания модели СПД-100П2	60
2.3.2. Испытания модели СПД-100ПЗ на стабильность параметров	63
2.4. Результаты оценки времени износа выходных элементов модели СПД-100П с использованием поэтапной методики	66
2.4.1. Методика ускоренной оценки времени износа выходных элементов ускорительного канала	66
2.4.2. Результаты оценки времени износа выходных элементов модели СПД-100П с использованием поэтапной методики	68
2.5. Результаты разработки и испытаний модели СПД-85П	71
2.5.1. Описание конструкции лабораторной модели СПД-85П	72
2.5.2. Результаты испытаний модели СПД-85П в НИИ ПМЭ МАИ и ОКБ «Факел»	76
2.5.3. Результаты испытаний модели СПД-85П в ОКБ «Факел»	78
Заключение к Главе 2	85

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ СПД-100ПМ И СПД-140ПМ НА РЕЖИМАХ РАБОТЫ С ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТЯГИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ 3.1. Модернизация модели СПД-100ПМ для повышения стабильности тяговых 3.1.2. Этапы и результаты исследования характеристик модели СПД-100ПМ.......90 3.1.3. Результаты определения изменения параметров модели СПД-100ПМ в процессе 3.1.4. Результаты определения магнитных характеристик модели СПД-100ПМ ......95 3.1.5 Результаты измерения расходимости струи модели СПД-100ПМ на режимах 3.2. Параметрические испытания лабораторной модели СПД-140ПМ на режимах работы с 3.2.2. Результаты исследования характеристик модели СПД-140ПМ......101 3.2.3. Результаты измерения расходимости струи модели СПД-140ПМ во время параметрических испытаний ......106 3.3. Определение потенциала изолированного магнитного экрана в момент зажигания ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНЫХ ИОННЫХ ПОТОКОВ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫХОДНОЙ ПЛОСКОСТИ СПД И ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ КАТОДОВ ОТ РАСПЫЛЕНИЯ ЭТИМИ 4.1. Анализ процессов формирования радиальных потоков ионов в окрестности выходной 4.2. Методика и результаты исследования параметров радиальных ионных потоков в непосредственной близости выходной плоскости СПД ......114 4.3. Исследование характеристик модели СПД-85П при различных положениях катода при работе в широком диапазоне разрядных напряжений ......119 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ...... 129

### ВВЕДЕНИЕ

Электроракетные двигатели (ЭРД) в настоящее время успешно используются в космической технике, и их применение расширяется. В связи с этим требуется разработка новых, более эффективных, электроракетных двигателей с улучшенными выходными параметрами, повышенной надежностью и совместимостью с космическим аппаратом.

В наибольших объемах ЭРД применяются для решения задач коррекции и стабилизации орбит геостационарных космических аппаратов (КА). При этом для современных и перспективных геостационарных КА оптимальными являются эффективные скорости истечения (удельные импульсы тяги) до (25-30) км/с при мощности двигателей от нескольких сот Ватт до нескольких кВт. Для межпланетных перелетов и полетов в дальний космос целесообразно обеспечить удельный импульс тяги ЭРД до 50км/с и более. При этом ЭРД должен обладать большим ресурсом и высоким коэффициентом полезного действия (КПД).

За рубежом высокоимпульсные ЭРД создаются преимущественно на основе ионных двигателей. Однако технология их достаточно сложна и пока недостаточно освоена в России. В СССР и России наибольшие успехи были достигнуты в разработке и применении стационарных плазменных двигателей (СПД), и в настоящее время они регулярно используются в отечественной и зарубежной космической технике. Поэтому для России наиболее простым и экономически обоснованным представляется решение задачи создания высокоимпульсных ЭРД на основе СПД. Серийные отечественные СПД, разработанные ОКБ «Факел», имеют удельный импульс тяги не более 17км/с (1700с), т.е., значительно меньше оптимальных даже для решения задач коррекции орбит современных и перспективных геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ). В последние годы В исследовательском центре имени М.В. Келдыша создан двигатель КМ-60 с удельным импульсом тяги 20км/с (2000с). В ОКБ «Факел» и в центре Келдыша разрабатываются опытные образцы с удельным импульсом тяги 27-28км/с. Но и эти значения удельного импульса еще недостаточны для решения ряда перспективных задач. В связи с этим востребованной становится задача разработки СПД с удельным импульсом тяги порядка 30км/с и более.

Сложность решения названной задачи определяется тем, что наиболее реальным способом повышения удельного импульса тяги СПД на современном этапе является увеличение разрядного напряжения. Однако с увеличением разрядного напряжения приходится уменьшать расход рабочего газа через двигатель, чтобы сохранить плотность мощности на уровне, приемлемом для обеспечения большого ресурса двигателях. Как показывают проведенные ранее исследования, это приводит к нежелательным изменениям в протекании рабочих процессов и, в конечном счете, к снижению тягового КПД и увеличению скоростей износа стенок разрядной камеры (РК) [1]. Кроме того, увеличение энергии ионов с увеличением разрядного напряжения может приводить к увеличению скорости износа элементов конструкции катода-компенсатора (далее катод), на который попадает часть ускоренных ионов. С учетом изложенного тема диссертации, посвященной разработке способов повышения тяговых характеристик СПД на режимах работ с высоким удельным импульсом тяги, является актуальной.

**Целью** данной работы являлась выявление особенностей работы и разработка способов повышения тяговых характеристик СПД на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- анализ возможных конструктивных схем СПД с высоким удельным импульсом тяги и выбор перспективной схемы такого двигателя;

- исследование характеристик и выявление особенностей работы двигателя выбранной схемы на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги;

- оптимизация конструкции, схем питания разряда и рабочих режимов СПД выбранной схемы с высоким удельным импульсом тяги.

- исследование параметров ионов в радиальных потоках, движущихся в окрестности выходной плоскости СПД, где обычно располагаются катоды;

#### Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлены основные особенности работы СПД с магнитным экраном внутри разрядной камеры и определены характеристики разряда в двигателе такой схемы при разных схемах питания разряда, показана предпочтительность двухступенчатой схемы питания разряда на режимах работы с напряжением до 1400В, обеспечивающих возможность получения удельного импульса тяги до 35км/с при мощностях разряда в СПД не более 5кВт.

2. Показано, что причиной затрудненного зажигания основного разряда в двигателе с изолированным магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры,

5

является низкий уровень потенциала этого экрана при работе катода в режиме зажигания разряда.

3. Показано, что энергия ионов в радиальных потоках, движущихся в окрестности выходной плоскости двигателя, слабо зависит от режима работы двигателя и составляет (80-120) эВ и что источником ионов с такой энергией является выходная часть слоя ионизации и ускорения, выдвинутая в современных СПД за выходную плоскость разрядной камеры.

#### Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Показана перспективность схемы СПД с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры, определены характеристики двигателей такой схемы в расширенном диапазоне рабочих режимов и разработаны рекомендации по выбору схемы питания разряда в двигателе такой схемы и параметров его конструкции, обеспечивающие возможность достаточно эффективной работы двигателя с мощностью до 5 кВт на режимах с удельным импульсом тяги до 35км/с.

2. Разработаны способы повышения тягового КПД СПД при работе на режимах с высокими удельными импульсами тяги и созданы лабораторные модели двигателей СПД-100ПМ и СПД-140ПМ, способные работать как в одноступенчатом, так и в двухступенчатом режимах с удельными импульсами тяги до 30км/с и 35км/с, соответственно, и тяговым КПД более 50%. Эти модели могут быть использованы в качестве прототипов при разработке опытных образцов СПД с высоким удельным импульсом тяги.

Полученные результаты позволили успешно выполнить СЧ ОКР «Факел - НИИПМЭ», ОКР «Двигатели ТМ – Факел - НИИПМЭ», «НИР Двигатель – НИИПМЭ», выполненных НИИ ПМЭМАИ по договорам №11-08-11/12, №11-03-11/14, № 500-3/01-14 от 01.03.2012г., 30.06.2014г., 15.05.2014г. соответственно. А также и этап №1 базовой части государственного задания №648 Министерства образования и науки РФ на проведение научных исследований в МАИ.

#### Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов, сделанных в работе, определяется тем, что они проверены на трех моделях СПД разных размеров, а две из них (модели СПД-85П и модель СПД-100П) проходили испытания не только в НИИ ПМЭ МАИ, но и в ОКБ «Факел». При этом были получены сопоставимые результаты.

Обоснованность рекомендаций по выбору схемы и соотношений размеров СПД с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры, предназначенных для работы с высоким удельными импульсами тяги, проверены на моделях двигателя двух разных размеров.

6

#### Основные положения, выносимые на защиту

1. Положение о том, что распределение электрического поля в разряде СПД в значительной мере контролируется продольным распределением радиальной компоненты индукции магнитного поля в объеме разряда.

2. Положение о возможности снижения скорости износа стенок разрядной камеры путем максимального выдвижения слоя ионизации и ускорения за плоскость полюсов магнитной системы за счет соответствующего профилирования продольного распределения индукции магнитного поля.

#### Апробация работы и научные публикации

Результаты работы докладывались и обсуждались на 12-й и 13-й международных конференциях «Авиация и космонавтика», 5й Российско-Германской конференции «Электрические ракетные двигатели. Новые вызовы» по электрическим ракетным двигателям и их применению, а также на научно-технических советах НИИПМЭ МАИ. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в следующих **публикациях**:

1. Ким, В. П. Исследование параметров плазмы и радиальных потоков ионов вблизи выходной плоскости СПД / В. П. Ким, Д. В. Меркурьев, Е. К. Сидоренко // Вестник Московского Авиационного Института. - 2014. - Т.21, №1. - С. 95-103.

2. Ким, В.П. Исследование формирования потоков ионов перезарядки вблизи выхода из ускорительного канала стационарного плазменного двигателя / В. П. Ким, А. С. Архипов, А. М. Бишаев, Д. В. Меркурьев, Е. К. Сидоренко // Физика плазмы. – 2014.-Т.40, №9, - С. 1-9.

3. Ким В., Меркурьев Д. В., Сидоренко Е. К. Исследование параметров плазмы, а также радиальных и «обратных» ионных потоков в окрестности выходной плоскости СПД на разных режимах его работы // 12-я международная конференция «Авиация и Космонавтика – 2013». – М.: МАИ, ноябрь 12-15, 2013.

4. Arkhipov, A. S. Investigation of the plasma parameters and directed ion flows in the vicinity of the stationary plasma thruster exit plane / A. S. Arkhipov, S. V. Baranov, A. M. Bishaev, V. Kim, V. I. Kozlov, D. V. Merkuriev, P. A. Tsygankov // 5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application, Dresden, Germany, September 7-12, 2014.

5. Архипов А. С., Баранов С. В., Бишаев А. М., Ким В. П., Козлов В. И., Меркурьев Д. В., Цыганков П. А. Исследование параметров плазмы и направленных ионных потоков в окрестности выходной плоскости стационарного плазменного двигателя // 13-я международная конференция «Авиация и Космонавтика – 2014». – М.: МАИ, ноябрь 17-21, 2014.

6. Kim, V. Investigation of the "back" and "radial" ion flows in the vicinity of the stationary plasma thruster exit plane / V. Kim, A. S. Arkhipov, A. M. Bishaev, D. V. Merkurev, A. A. Pogorelov, G. A. Popov // paper IEPC-2015-247, 30<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference and 6<sup>th</sup> Nano-satellite Symposium, July 5-10,2015, Hyogo-Kobe, Japan.

Из них две опубликованы в журналах, рецензируемых ВАК.

#### Вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в разработке, исследовании и оптимизации конструкции моделей СПД с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры, осуществлял анализ и обобщение результатов исследований. Кроме того, автор провел исследование параметров ионов в радиальных потоках, движущихся в окрестности выходной плоскости модели СПД-85П, а также исследование потенциала изолированного магнитного экрана при работе катода в режиме поджига.

#### Объем и структура работы

Работа представляет собой рукопись объемом 138 страниц печатного текста, включая 63 рисунка, 15 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 94 наименований. Работа состоит из ведения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, сообщаются сведения об апробации работы и публикациях автора, излагается структура диссертации.

В первой главе приводится анализ состояния разработки электроракетных двигателей (ЭРД), которые нашли применение в космической технике или могут в ближайшее время пройти летные испытания. В результате показано, повышения что для конкурентоспособности СПД целесообразна разработка двигателей этого типа с более высокими удельными импульсами тяги. Рассмотрены возможные конструктивные схемы СПД с повышенным удельным импульсом тяги и в качестве базовой для дальнейших исследований выбрана схема с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры. Рассмотрены также возможные механизмы формирования радиальных потоков ионов в окрестности выходной плоскости двигателя, которые приводят к заметной эрозии элементов конструкции катодов. С увеличением разрядного напряжения значимость этого процесса может возрасти. Поэтому представлялось необходимым изучить этот вопрос подробнее.

Во второй главе приведены описание экспериментальной установки, методик и результатов экспериментального исследования, особенностей работы и характеристик двигателей выбранной схемы на высоковольтных режимах при малых расходах рабочего газа и различных схемах питания разряда в них.

В третьей главе изложены результаты разработки способов предотвращения негативных эффектов, обнаруженных при исследованиях первых моделей СПД-100П и СПД-85П и их применение для доработки конструкции СПД двух типоразмеров СПД-100ПМ и СПД-140ПМ. Проведено экспериментальное исследование характеристик моделей при различных схемах питания разряда.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям радиальных и обратных ионных потоков в окрестности выходной плоскости СПД и исследованию возможных способов защиты элементов катода от их эрозии в результате ионной бомбардировки.

В Заключении сформулированы основные выводы.

В конце диссертации приводится список цитируемой литературы.

### ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 1.1. Общая характеристика и состояние разработки ЭРД и СПД

Первые идеи об использовании электроракетных двигателей (ЭРД) в космосе принадлежат К.Э. Циолковкому. Их он изложил в знаменитом труде «Исследование мировых пространств реактивными аппаратами» в 1902-1912гг [1]. Несколько позже в 1929-1933гг в Газодинамической лаборатории В.П. Глушко провел первые в мире экспериментальные исследования ЭРД, которым был импульсный электротермический двигатель [1, 2].

Однако значительный прогресс в данной области произошел в период активного освоения космического пространства во второй половине XX века. Так, С.П. Королев и Л.А. Арцимович инициировали исследования ЭРД в отделе плазменных исследований института атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова, которые привели к созданию электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) на основе импульсных плазменных двигателей (ИПД). Данная ЭРДУ была запущена в космос на борту космического аппарата (КА) «Зонд-2» в 1964г и успешно отработала в космосе [1].

Одновременно с работами по ИПД в ИАЭ им. И.В. Курчатова проводились исследования стационарных ускорителей плазмы, которые привели к созданию других типов ЭРД: двигателя с анодным слоем (ДАС), разработанного Жариновым А.В., и стационарного плазменного двигателя (СПД), разработанного в ИАЭ под руководством Морозова А.И. [3]. Разрабатывались и другие типы ЭРД, но затем по ряду причин они были свернуты. В настоящее время работы продолжаются по ионным двигателям, СПД и ДАС, а также по ИПД.

В СССР и России наибольшие успехи достигнуты в разработке и применении стационарных плазменных двигателей. Принципиальная схема СПД приведена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Принципиальная схема СПД

В разрядной камере 3 СПД традиционной схемы (см. рисунок 1.1) выполняется кольцевой ускорительный канал, в глубине которого размещается кольцевой анод 1, который, как правило, служит и для организации подачи и равномерного распределения потока рабочего газа (например, ксенона) в ускорительном канале. Катод-компенсатор (далее катод) 2 располагается вне ускорительного канала и в двигательном исполнении представляет собой газоразрядный источник электронов на основе полого катода с эмиттером электронов, подогреваемым для запуска двигателя. В ускорительном канале с помощью магнитной системы создается преимущественно радиальное магнитное поле, напряженность которого подбирается такой величины, чтобы ларморовский радиус электронов оказался значительно меньше характерного размера системы – длины ускорительного канала, а ларморовский радиус ионов – больше названной длины. Кроме того, напряженность магнитного поля и плотность потока плазмы в ускорительном канале обычно таковы, что частота столкновений электронов с остальными частицами  $v_e = 1/\tau$ существенно меньше циклотронной частоты  $\omega_e$  электронов, так что параметр Холла  $\omega_s \tau_s \gg 1$ . За счет приложения постоянного напряжения между анодом и катодом инициируется электрический разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. В этом разряде удается достаточно эффективно ионизировать атомы (или молекулы) рабочего газа, а также ускорить образовавшиеся ионы электрическим полем, созданным в плазме названного разряда.

Ионизация атомов рабочего газа осуществляется электронами, поступающими в разряд из катода и вновь образовавшимися в разряде. Ускоряемый ионный поток истекает из ускорителя и нейтрализуется второй частью электронов, поступающих в него из катода. В процессе ускорения ионов создается реактивная тяга.

В 1972г. ЭРДУ «ЭОЛ» на основе двигателя данной схемы прошла первый испытательный полет на борту КА «Метеора». В ходе полета один из двигателей отработал в

течение 170 часов и изменил орбиту КА на 17км, выработав суммарный импульс ~11,7кНс. В дальнейшем ЭРДУ типа «ЭОЛ», «ЭОЛ-2» и «ЭОЛ-3» устанавливались на КА семейства «Метеор» и «Метеор-Природа» и в итоге суммарная наработка данной ЭРДУ составила более 1000 часов на шести КА. После успешного опыта работы ЭРДУ типа «ЭОЛ» на основе СПД в ОКБ «Факел» были разработаны серийные двигатели СПД-50, СПД-70 и СПД-100, которые используются в составе систем коррекции орбиты отечественных и зарубежных КА [3].

Параметры серийных двигателей ОКБ «Факел» приведены в таблице 1.1.

Марка двигателя	СПД-50	СПД-70	СПД-100	
Тяга, мН	20	40	80	
Потребляемая мощность, Вт	400	650	1350	
Удельный импульс, м/с	11000	15000	16000	
Подтвержденный наземными испытаниями ресурс, часы	1500	3000	9000	
Полный импульс тяги, кНс	108	430	2000	

Таблица 1.1. - Параметры летных образцов СПД разработки ОКБ «Факел»

Проходят наземную отработку также опытные образцы двигателя СПД-100Д с номинальной мощностью до 2,5 кВт и удельным импульсом тяги до 27км/с, двигатель СПД-140 с номинальной мощностью 4,5 кВт, тягой 280мН и удельным импульсом тяги 17,8км/с и двухрежимный двигатель СПД-140Д с такими же параметрами, как и у СПД-140, при работе на режиме большой тяги, и номинальной мощностью 4,8кВт, тягой до 180мН и удельным импульсом тяги 27,5км/с на режиме с высоким удельным импульсом тяги.

С 1982г начинается регулярное штатное использование ЭРДУ на основе СПД-70 на борту геостационарных КА (ГКА) "Луч" и "Поток" разработки НПО Прикладной механики имени М.Ф. Решетнева. На данных спутниках ЭРД выполняла функцию коррекции ИСЗ на орбите по широте [3]. В дальнейшем, когда энерговооруженность КА увеличилась, находит применение двигатель СПД-100. Так с 1994г. на ГКА «Галс» и «Экспресс» в составе ЭРДУ используются 8 двигателей СПД-100 для коррекции положения ИСЗ на орбите как по долготе, так и по широте. СПД-100 также используется на низкоорбитальных аппаратах, например, таких как экспериментальный КА "Монитор-Э". С 2004г СПД-100 штатно используется на платформах некоторых зарубежных производителей LS-1300 (Space Systems Loral – SSL, USA), Eurostar-3000 (EADS Astrium) и Spacebus-4000СЗ (Alcatel) [4]. Таким образом, уже на начало 2006г в космосе отработало более 260 СПД. К настоящему времени число работающих или отработавших в космосе СПД превысила 300. При этом суммарная

наработка двигателей СПД-100 только на 17 работающих в космосе КА разработки SSL составила больше 40000 часов при максимальной наработке отдельных двигателей свыше 3500 часов при более чем 3500 включениях [5]. В 2013г ЭРДУ на основе СПД-100 впервые использовалась для штатного выведения ГКА «Экспресс-AM5» сначала на переходную орбиту, а затем и на рабочую. Такая же схема выведения использовалась для ГКА – близнеца «Экспресс-AM6» [6]. Применение ЭРДУ с СПД позволило увеличить срок активного существования (САС) КА серии "Галс" и "Экспресс" с 2-3 лет до 5-7лет, КА серии "Экспресс-А", "Ямал-100" – до 10лет и КА серии "Экспресс-АМ" – до 12лет [4], а КА разработки SSL – до 15 лет [5].

В последние годы летные образцы СПД успешно разрабатываются также в исследовательском центре имени М.В. Келдыша. Так, в составе КА «Экспресс-А» №4 успешно прошел летные испытания двигатель КМ-5 с рабочим диапазоном по мощности до 2,5кВт [4], квалифицирован для летного применения двигатель КМ-60 с номинальной мощностью 0,9кВт с удельным импульсом тяги 20км/с, разрабатывается двигатель КМ - 75 с номинальной мощностью 2,1кВт и удельным импульсом тяги 27 км/с.

Одним из перспективных российских ЭРД остается двигатель с анодным слоем (ДАС). Как уже отмечалось ранее, концепция данного двигателя была предложена Жариновым А.В. в конце 1950-х годов. Затем, на основе данной разработки в ЦНИИМаш была создана линейка двигателей в диапазоне мощностей 0,2-50кВт и удельным импульсом до 70км/с, работающих на висмуте и ксеноне [7, 8]. Первые летные испытания ДАС прошли на борту американского исследовательского аппарата STEX в 1998-99гг. На КА STEX был установлен двигатель TAL-WSF с мощностью N=650Вт и тягой T=30,7мH, созданный в ЦНИИМаш на основе двигателя Д-55, который проработал 100мин, увеличив высоту орбиты на 650м [4].

После того, как в начале 90х годов появились публикации на международных конференциях об успехах разработки и применении СПД в СССР, иностранные разработчики ЭРД проявили к ним повышенный интерес. В результате за прошедшее время зарубежные производители добились существенного прогресса в разработке собственных СПД, из которых некоторые уже прошли отработку в космосе и, вероятно, будут использоваться штатно.

Так американская фирма Busek разработала двигатель ВНТ-200 (*N*=200Вт), который в 2006г. прошел летные испытания на борту исследовательского спутника TacSat-2 [9, 10].

Фирма Aerojet разработала более мощный двигатель ВРТ-4000 с рабочим диапазоном по мощности (3,0-4,5) кВт, тягой до 300мН и удельным импульсом тяги до 20км/с, который используется американским производителем спутников Lockhead Martin Northrop Grumman [11, 12]. На одном из таких спутников AEHF-1 произошел сбой в работе разгонного блока,

из-за чего спутник оказался на нерасчетной орбите. В результате, спутник выводился до геостационарной орбиты с помощью ЭРДУ на основе ВРТ-4000 [13].

Одним из важнейших достижений в области применения СПД является миссия по доставке КА для исследования поверхности Луны Европейского космического агентства (ESA) по программе SMART-1 с околоземной на окололунную орбиту. Автономный исследовательский аппарат был оснащен маршевой двигательной установкой на основе двигателя PPS-1350. Данный двигатель был разработан во французской фирме Snecma в кооперации с ОКБ «Факел». В ходе миссии аппарат массой 370кг за 14 месяцев был переведен с околоземной орбиты на окололунную орбиту. За это время двигатель отработал почти 5000 часов. Кроме того, в одном из сеансов продолжительность непрерывной работы СПД составила 270 часов (более 10 дней) [14]. Двигатель PPS-1350 также стал использоваться в системах коррекции орбиты ГКА. Так, например, в июле 2013г был запущен спутник на новой платформе Alphasat, где ЭРДУ выполнена на основе данного двигателя [15].

В целом работы по СПД развиваются достаточно успешно, и их применение расширяется. Однако следует иметь в виду, что, как уже отмечалось ранее, с увеличением срока активного существования геостационарных КА до 15лет, оптимальный диапазон удельного импульса ЭРД, используемого в системе коррекции, вырос до 25-30км/с, а для полетов в дальний космос требуемые значения удельного импульс тяги составляют 30-50км/с [16]. Все это ужесточает конкуренцию между различными производителями ЭРД и различных типов ЭРД. К сказанному следует добавить, что современные летные модели СПД, такие как СПД-100, уже не могут удовлетворять требованиям будущих коммерческих геостационарных спутников по удельному и полному импульсу тяги, который должен достигать 5МНс для КА массой более 6 тонн [17]. Поэтому задача дальнейшего повышения удельного импульса и ресурса СПД является актуальной для сохранения его конкурентоспособности.

Значительные успехи достигнуты за рубежом в разработке ионных двигателей. Так, с начала 1960-х годов в США разрабатывались несколько типов этих двигателей. Наибольший прогресс был достигнут в разработке двигателя с разрядом постоянного тока, который часто называют двигателем Кауфмана по имени его разработчика Х. Кауфмана (Harold R. Kaufman) [18]. В настоящее время этот двигатель используется в США как в системах коррекции орбит геостационарных ИСЗ, так и при реализации полетов в дальний космос.

С 1962г. в университете города Гиссен (Justus-Liebig-Universität Gießen) в ФРГ под непосредственным руководством профессора Хорста Леба (Horst Löb), разрабатывается другой тип ИД - ионный двигатель с радиочастотной ионизацией рабочего тела [17].

Успешно разрабатываются ионные двигатели Кауфмана и в Великобритании[17, 19].

В Японии начато использование ионных двигателей с разрядом постоянного тока в системах коррекции орбит ИСЗ и ионных двигателей с радиочастотной ионизацией – для полетов в дальний космос [20].

Регулярное использование ионных двигателях на коммерческих аппаратах началось в 1997г. в составе платформы для геостационарных спутников 601НР, разработанной фирмой Boeing [21]. На этой платформе используется двигатель XIPS-13 (Xenon Ion Propulsion System) фирмы L-3 Communications Electron Technologies Inc (старые названия фирмы Hughes Boeing EDD), а уже с 1999 года на борту более энерговооруженной платформы Boeing 702HP (доступная мощность до 18кВт) используется более мощный ионный двигатель XIPS-25. За прошедшее время в космосе отработало более 60 двигателей XIPS-13 с суммарной наработкой более 91000 часов. На каждой платформе 601НР используется 4 таких двигателя, предназначенных для коррекции орбиты в направлении Север-Юг, устранения вращательных моментов КА и контроля эксцентричности орбиты. XIPS-13 мощностью N=450Bт создает тягу T=18мН и имеет удельный импульс тяги Ivo=23,5км/с. На базе XIPS-13 был разработан более мощный двигатель XIPS-25, разработка которого началась в 1985г. [21, 22]. XIPS-25 имеет два рабочих режима: режим низкой мощности (N=2кВт; T=79мH, Ivd= 34км/с) для коррекции орбиты в направлениях Север-Юг, Запад-Восток и демпфирования моментов КА; режим большой мощности (N=4,2кВт; T=165мH, Ivd= 35км/с) для межорбитальных перелетов и увода КА с геостационарной орбиты в конце срока активного существования на захоронение. Уже в 2005г. на ГСО отработало 40 двигателей XIPS-25 и еще 30 находились в производстве [23].

коммерческих телекоммуникационных Кроме спутников ионные двигатели используются в ряде научных миссий. В этих миссиях они уже используются в качестве маршевых двигательных установок. Так в Jet Propulsion Laboratory (NASA) разработан двигатель NSTAR с диаметром пучка 30см. В октябре 1998г. в США была запущенна программа Deep Space One, целью которой была встреча и исследование астероида Брайль и кометы Борелли. Исследовательский аппарат был оснащен маршевой двигательной установкой на основе одного ИД типа Кауфмана NSTAR (N=2,3кВт; T=92мН;  $I_{\nu o}=32,8$ км/с). При реализации программы Deep Space One двигатель безаварийно проработал более 16000 часов [18]. Также ИД NSTAR используется на другой автоматической межпланетной станции Dawn, стартовавшей в сентябре 2007г. На аппарате Dawn установлена маршевая ЭРДУ с тремя двигателями NSTAR. Целью миссии Dawn был астероид Веста, который уже обследован, а в настоящее время этот аппарат приближается к карликовой планете Церера [23]. Для более амбициозных миссий таких, как доставка на Землю образцов грунта с

Венеры, выход на орбиту Нептуна и некоторых других, где мощность бортовых энергетических установок составит 15-25кВт, создается ионный двигатель NEXT с диаметром пучка 40см (*N*≤7кВт; *T*=237мН; *I<sub>vd</sub>*=40,5км/с) [24, 25].

Ионный двигатель Кауфмана также разрабатывается в Европе фирмой QinetiQ (Великобритания). Так два двигателя UK-10 (T5) (N=600Bт; T=20мH;  $I_{yo}$ =30км/с), разработанные QinetiQ, в 2002г были установлены на экспериментальный геостационарный аппарат Artemis вместе с двумя радиочастотными ионными двигателями RIT-10 [19]. Двигатели UK-10 были использованы в научной миссии GOCE, цель которой заключалась в точном измерении гравитационного поля Земли. Космический аппарат был запущен в 2009г. на низкую околоземную орбиту (275км). Для компенсации возмущающих воздействий на аппарат со стороны атмосферы, а также для орбитальных маневров на GOCE было установлено два двигателя UK-10 [17]. Также планируется исследовательская миссия Европейского космического агентства ВерiColombo для изучения планеты Меркурий. Вероятно, маршевая двигательная установка КА в этом проекте будет на основе ИД Кауфмана типа T6 фирмы QinetiQ (N=4-5кBT; T=150мH,  $I_{vo}$ =44км/с) [15].

В ФРГ была создана линейка радиочастотных двигателей разного размера и мощности. Один из них двигатель RIT-10 помимо основной задачи коррекции орбиты, использовался вместе с ДУ на основе химических двигателей для аварийного выведения КА Artemis до расчетной орбиты [19, 26].

Кроме США и Европы ионные двигатели используются в Японии. В декабре 2006г. на геостационарную орбиту был выведен первый японский спутник EST-VIII, оснащенный ионными двигателями IES (Ion Engine Subsystem). На борту было установлено 4 двигателя (N=800Br; T=20мH,  $I_{yd}$ =22км/с) для коррекции орбиты в направлении Север-Юг [20]. Большим успехом для японской космической отрасли стала научная миссия Науаbusa. Целью миссии была посадка на астероид Итокава и возврат образцов его грунта на Землю. В качестве маршевой двигательной установки на космическом аппарате использовались четыре ионных двигателя с радиочастотной ионизацией µ10 (N=350Br; T=8мH,  $I_{yd}$ =30км/с). Двигатели суммарно отработали около 39000 часов и обеспечили приращение скорости КА 2100м/с [27].

Параметры летных образцов ионных двигателей приведены в таблице 1.2.

Кроме рассмотренных выше с конца 90х годов фирмой Thales Electron Devices GmbH из Германии разрабатывается еще один тип ЭРД, который в иностранной литературе получил название HEMPT (High Efficiency Multistage Plasma Thruster). В настоящее время разрабатываются два варианта двигателя: HEMPT-3050 (N=1500BT; T=50мH,  $I_{yo}$ =30км/с), и более мощный двигатель HEMPT-30250 (N=7,5кBT; T=250мH,  $I_{yo}$ =30км/с). Модели на основе

НЕМРТ демонстрируют привлекательные характеристики, и поэтому могут найти применение в космосе в ближайшем будущем [28].

Стран а	Название (изготовитель )	Мощность , кВт	Тяга , мН	Удельны й импульс, м/с	Состояние разработки	Назначение
США	XIPS-13 (BoeingSS)	0,45	18	23500	Серийная эксплуатация на платформе для ГКА серии BSS-601HP	Коррекция орбиты, демпфировани е возмущающих моментов
	XIPS-25 (BoeingSS)	4,2	165	35000	Серийная эксплуатация на платформе для ГКА серии BSS-702	Коррекция орбиты, демпфировани е возмущающих моментов, выведение на рабочую орбиту, увод с ГО на захоронение
	NSTAR (Glenn research center, JPL, BoeingSS )	2,3	92	32800	На межпланетных аппаратах DeepSpace 1, Dawn	Маршевая двигательная установка
Великобритания	UK-10 (QinetyQ)	0,6	20	30000	Летные испытания на экспериментально м аппарате Artemis, научный аппарат GOCE	Коррекция орбиты, компенсация воздействия со стороны атмосферы, орбитальные маневры
Германия	RIT-10 (EADS Astrium)	0,59	15	31500	Летные испытания на экспериментально м аппарате Artemis	Коррекция орбиты
Япония	IES (Mitsubishi)	0,8	20	22000	Исследовательский спутник ETS-VIII	Коррекция орбиты
	μ10 (ISAS)	0,35	8	30000	Межпланетный аппарат Hayabusa	Маршевая двигательная установка

Таблица 1.2 - Ионные двигатели, прошедшие летные испытания в космосе

В последние годы активизировались работы по ионным двигателям и в России, причем сразу по двум направлениям. Так, в исследовательском центре имени М.В. Келдыша разрабатывается серия ИД типа Кауфмана: ионный двигатель малой мощности ИД-50 с диаметром ионного пучка 50мм и мощностью до 150Вт, ионный двигатель средней мощности ИД-300 (N=2кВт; T=80мН,  $I_{yo}=30$ км/с), а также ИД мощностью около 30кВт и с удельным импульсом ~70км/с, который, как предполагается, будет использовать аргон в качестве рабочего тела [4]. Второе направление – это совместный российско-немецкий проект ИД ВЧИД-45 большой мощности (N=35кВт; T=758мН,  $I_{yo}=68,8$ км/с) на основе ионного двигателя с радиочастотной ионизацией, который разрабатывается в НИИ ПМЭ МАИ при участии Гиссенского университета имени Юстуса Либиха (Германия) [29]. Однако, как уже отмечалось ранее, технология ионных двигателей достаточно сложна и пока в России до конца не освоена. Поэтому обоснованной является стратегия развития технологии СПД для обеспечения создания двигателей с повышенным, по крайней мере, до (30-35)км/с удельным импульсом тяги.

# 1.2. Обзор работ по исследованиям СПД на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги

Как известно, удельный импульс КА это есть отношение полного импульса тяги полученной в ходе работы ускорителя за время t, к изменению массы КА за тоже время. Если тяга T и расход рабочего тела  $\dot{m}$  постоянны во времени, то величина удельного импульса определяется средней скоростью истечения плазмы в продольном направлении z:

$$I_{sp} = \frac{T}{m} = g\langle V_{iz} \rangle \tag{1.1}$$

Выражение для средней скорости истечения РТ из СПД в первом приближении можно записать в виде

$$\langle V_{iz} \rangle \approx \sqrt{\frac{2e(U_d - \Delta U)}{M}}$$
 (1.2)

Где *е*, *М*,  $U_{d}$ ,  $\Delta U$  - соответственно, заряд электрона и масса иона рабочего газа, эффективные значения разрядного напряжения и вольт-эквивалент потерь. Как следует из выражения (1.2) существует два способа увеличения скорости истечения плазмы: за счет увеличения приложенного разрядного напряжения, а также за счет использования рабочих тел с меньшей атомной массой.

Известно, что на начальном этапе разработки СПД проводилось большое количество экспериментов с различными рабочими телами, например, использовались разные газы: водород, аргон, криптон, кислород и другие, так и металлические рабочие тела: цезий или эвтектика натрий-калий [30, 31]. В этих экспериментах было определено, что оптимальным рабочим телом для СПД является ксенон с атомной массой 131,29 а.е.м. В последнее время возник интерес к использованию в качестве РТ криптона, атомная масса которого равна 83,3 а.е.м. к тому же стоимость криптона на порядок меньше ксенона. Предполагалось, что выигрыш в удельном импульсе при использовании криптона может составить до 25% по сравнению с ксеноном.

$$\sqrt{\frac{M_{Xe}}{M_{Kr}}} \approx 1.25$$

В результате в НИИ ПМЭ МАИ была проведена серия экспериментов с двигателем СПД-100, в котором рабочим телом являлась криптон-ксеноновая смесь, а доля криптона варьировалась в пределах от 0 до 100% [32]. Однако величина приращения удельного импульса оказалась незначительной и при приложенном разрядном напряжении 400В составила не более 1,5км/с. При этом тяговая эффективность работы двигателя была ниже, чем на ксеноне, как минимум, на 5% и составила ~ 54%. Это связано с тем, что переход на другое рабочее тело, должен сопровождаться оптимизацией всех рабочих процессов в ускорителе. Прежде всего, необходимо оптимизировать процесс ионизации. Одно из условий сопоставимости параметров рабочего режима двигателя для достижения высокой эффективности ионизации можно записать в виде:

$$\left(\frac{\lambda_i}{L_c}\right)_{Kr} \approx \left(\frac{\lambda_i}{L_c}\right)_{Xe} \tag{1.3}$$

где  $\lambda_i$  - длина свободного пробега атомов до ионизации,  $L_c$  - продольная протяженность (толщина) слоя ионизации и ускорения (СИУ).

При анализе результатов испытаний [32] проведенная оценка величины коэффициента использования рабочего тела показала, что в случае с криптоном его величина, при том же массовом расходе, меньше на 11% по сравнению с ксеноном. Кроме того, в той же работе было показано, что в соответствии с соотношением (1.3) для получения сопоставимых эффективности ионизации и значений тягового КПД при работе на криптоне (или любом более легком газе) необходимо работать на повышенных плотностях потока частиц рабочего тела. Это приводит к повышению мощности разряда, так как в первом приближении  $N_d \sim I_d \sim m_a/M$ .

В целом же, эти исследования показали, что, работая на криптоне, можно добиться достаточно высокой эффективности работы двигателя, однако значительного увеличения величины удельного импульса при этом не наблюдается. Кроме того, повышение мощности разряда, по сравнению с аналогичными значениями на ксеноне, вызывает ряд проблем и, прежде всего, проблему обеспечения большого ресурса двигателя. Следовательно, можно прийти к заключению, что переход на газы с более низкой массой, по крайней мере, для моделей масштаба СПД-100 не дает значительных преимуществ. В связи с этим, основным способом повышения удельного импульса тяги в настоящее время является увеличение разрядного напряжения, так как скорость ионов в первом приближении пропорциональна разности потенциалов, реализующейся в канале двигателя.

Исследования СПД на режимах работы с высоким разрядным напряжением проводились еще во времена первых экспериментов с ускорителями с замкнутым дрейфом электронов, на основе которых созданы СПД. Однако систематические исследования начались лишь после успешного внедрения первых СПД в состав КА, когда стало ясно, что с ростом срока активного существования спутников будут востребованы ЭРД с существенно большим удельным импульсом, чем у серийных СПД.

Так, в ОКБ «Факел» по заказу фирмы Atlantic Research Corporation (ARC) была разработана модель СПД-1. которая является гибридной схемой, сочетающей металлическую стенку разрядной камеры, как у ДАС, с выходными кольцами из диэлектрического материала, как у СПД. Данная модель работала с мощностью разряда в пределах 1,0-3,2 кВт при напряжении до 1250В. Максимальный «анодный» (рассчитанный без учета расхода РТ в катод) удельный импульс достигал величины более 35км/с, а при разрядном напряжении 1000В – порядка 32км/с с КПД - 0,57 [33]. Также в процессе исследования СПД-1 установлено несколько важных особенностей работы на повышенных разрядных напряжениях: во-первых, с увеличением разрядного напряжения при постоянном расходе РТ через анод с некоторого момента начинает расти разрядный ток; во-вторых, тяговая эффективность с увеличением напряжения растет до определенного промежуточного значения, после которого с ростом напряжения происходит падение КПД [33]. Рост разрядного тока, вероятнее всего, обусловлен несколькими факторами: увеличением числа многозарядных ионов, улучшением использования РТ и, наконец, увеличением доли сквозного электронного тока.

После работ с моделью СПД-1 в ОКБ «Факел началась разработка двухрежимных двигателей СПД-100Д и СПД-140Д, на основе СПД-100 и СПД-140. Двигатели СПД-100Д и СПД-140Д способны работать на режиме большой тяги и на режиме с высоким удельным импульсом (*I*<sub>yd</sub>=27,5км/с). Кроме того, СПД-140Д прошел 5000 часовые испытания на

режиме большой тяги и 1000-часовые испытания на режиме с повышенным до 27,5км/с удельным импульсом тяги [34].

В НИИ ПМЭ МАИ осуществлялась разработка высоковольтных моделей различных моделей СПД-80 и СПД-115, результаты исследования которых были продолжены в работах с лабораторной моделью двигателя типоразмера СПД-100, получившей обозначение СПД-100В. Кроме того исследовались модели масштаба СПД-140, которые продемонстрировали возможность работы на режимах с разрядным напряжением порядка 1000В и с анодным удельным импульсом до 36км/с [35].

В последнее время активную разработку СПД с повышенным удельным импульсом ведет исследовательский центр имени М.В. Келдыша. Серия двигателей центра Келдыша спроектирована с использованием гибридной разрядной камерой, как у СПД-1. Основные характеристики двигателей показаны в таблице 1.3 [4].

Некоторые двигатели уже прошли длительные испытания. Так, например, двигатель КМ-88 отработал более 1000 часов при мощности разряда 1600Вт и разрядном напряжении 550В. Удельный импульс в ходе испытаний изменялся от 22,5км/с в начале эксперимента до 19км/с – в конце. По результатам испытаний была произведена оценка, согласно которой ресурс двигателя составит не менее 4000 часов [36].

Таблица 1.3 - Основные параметры СПД, разработанных в исследовательском центре им М.В. Келдыша

Тип двигателя	Потребляемая мощность, кВт	Тяга, мН	Удельный импульс тяги, м/с	Ресурс, часов
KM-45	0,2 - 0,4	10-25	12500-15000	3500-4000 (проект)
KM-60	0,9	43,0	20000	3500
KM-75	2,1	80,0	27500	7000 (проект)
КМ-5 (прошел летные испытания)	2,0	100-110	18800-20900	7000 (проект)
KM-7	4,5	290,0	17900	10000 (проект)

Следует добавить, что двигатель КМ-88 прошел длительные испытания с *U<sub>d</sub>*=700В и удельным импульсом порядка 28км/с. Двигатель КМ-7 также отрабатывается на режимах с *U<sub>d</sub>*=1000В [4].

СПД с высоким удельным импульсом разрабатываются и за рубежом. В Европе наибольших результатов в этом направлении добилась французская фирма Snecma. Так, на базе лабораторной модели PPS-1350-MLM, который является модификацией летного двигателя PPS-1350, разрабатывается новый двигатель PPS-5000 с высоким удельным

импульсом. На этом двигателе исследуются режимы с разрядным напряжением до 1000В и удельным импульсом порядка 30км/с. КПД на данных режимах достигает 50-60% [37-39].

Американская компания Busek при поддержке NASA разрабатывает СПД с высоким удельным импульсом BHT-1500, который должен составить конкуренцию ионному двигателю NSTAR. Для этого BHT-1500 должен обладать удельным импульсом 32км/с при мощности 2,3кBt, аналогично NSTAR. В ходе предварительных испытаний BHT-1500 продемонстрировал удельный импульс на уровне 32км/с при разрядном напряжении 1000B, КПД на данном режиме составил более 50% [40].

Также в США в рамках программы In-Space Propulsion Technology Program под управлением NASA's Science Mission Directorate прорабатываются варианты использования СПД в научных миссиях в дальнем космосе класса Discovery, как альтернатива программе с ионным двигателем NEXT. Программа получила название High Voltage Hall Accelerator (HiVHAc) и к ней предъявляют следующие требования: широкий диапазон мощности разряда 0,3-3,5 кВт и удельный импульс 10-28км/с. Данную разработку совместно осуществляют Aerojet и NASA Glenn Research Center, в ходе которой были созданы 3 лабораторные модели СПД: NASA-77M, NASA-94M и NASA-103M.XL, основой для которых послужила модель СПД-1, рассмотренная выше. Наибольший прогресс достигнут с двигателем NASA-103M.XL (мощность до 3,5кВт и  $I_{yo}$ =28км/с) [41]. Также, стоит отметить, что данный двигатель прошел ресурсные испытания продолжительностью 4731ч на режиме с разрядным напряжением 700В. Предполагается, что данный двигатель будет иметь ресурс более 15000 часов на режиме с  $U_d$ =700В и  $I_d$ =5A, израсходовав за это время более 300кг ксенона.

В Мичиганском университете (University of Michigan) испытана модель двигателя NASA-173M для работы на высоковольтных режимах. Модель имеет наружный диаметр 173мм и рассчитана на номинальную мощность разряда порядка 5кВт. Кроме того, двигатель предназначен для работы по двухступенчатой схеме питания разряда, аналогично той, что используется для двухступенчатых ДАС. Основная идея работы по двухступенчатой схеме в данном случае – разделение зон ионизации и ускорения с целью улучшить ионизацию рабочего тела. Кроме того, для управления топологией магнитного поля по длине канала в модели предусмотрена дополнительная анодная катушка намагничивания. В результате при разрядном напряжении 1000В и мощности разряда порядка 5,3кВт удалось получить анодный удельный импульс около 34км/с при «анодной» эффективности более 0,5. Помимо прочего установлено, что ток намагничивания в дополнительной анодной катушка предпочтительно направлять противоположно токам в наружных и внутренний катушках.

При этом вблизи анода создается отрицательное магнитное поле, что ведет к росту КПД и удельного импульса [42].

В последние годы программа HiVHAc дала качественно новые результаты, а именно: по этой программе разработан способ «магнитной защиты» стенок разрядной камеры [43-46]. Суть его сводится к тому, что конфигурация выходной части стенок разрядной камеры и силовых линий магнитного поля проектируются таким образом, что:

- ускорительный канал выполняется с уширением его выходной части;

-отдельные силовые линии магнитного поля вблизи выхода из ускорительного канала входят внутрь ускорительного канала, по возможности, не касаясь стенок разрядной камеры (рисунок 1.2) [47, 48].



Рисунок 1.2 — Конфигурации выходной части ускорительного канала и силовых линий магнитного поля, а также расчетное распределение потенциала в выходной части разрядной камеры.

При этом удается получить существенно меньшие скорости износа стенок разрядной камеры за счет того, что потенциал у стенок получается близким к анодному, и ионы, попадающие на стенки, имеют малую энергию (см., например, [49]). Поэтому специалисты США надеются создать СПД с магнитной защитой стенок разрядной камеры с удельным импульсом тяги до 30км/с и с ресурсом до 50 тысяч часов. Это позволит им заменить ионные двигатели на существенно более дешевые СПД при решении целого ряда задач космических исследований [50].

Все изложенное подтверждает актуальность и перспективность работ по повышению удельного импульса СПД.

# 1.3 Особенности схем СПД, работающих при повышенном разрядном напряжении

СПД, работающие на режимах работы с повышенным разрядным напряжением должны иметь конструкцию, несколько отличающуюся от конструкции моделей, работающих на низковольтных режимах. Прежде всего, это отличие заключается в усилении возможностей магнитной системы по созданию магнитного поля. Для этого необходимо увеличить количество Ампер-витков в катушках намагничивания и увеличить сечение элементов магнитопровода магнитной системы двигателя. Кроме того, по причине увеличения разрядного напряжения требуется улучшить электрическую прочность цепей двигателя.

С учетом указанных требований в НИИ ПМЭ МАИ была разработана лабораторная модель двигателя СПД-100В для работы на повышенных разрядных напряжениях (рисунок 1.3). Эта модель имела конфигурацию и размеры полюсов, а также расстояния между полюсами и торцами магнитных экранов, близкие к соответствующим размерам в серийном двигателе СПД-100. Таким образом, формирование топологии магнитного поля в выходной части разрядной камеры осуществлялось традиционными полюсами и магнитными экранами, охватывающими разрядную камеру.



 фланец магнитной системы, 2- центральный сердечник, 3- внутренний полюс, 5-6 —элементы магнитной системы, 7-9 – катушки намагничивания, 10 – корпус разрядной камеры, 11-катод, 12-13- съемные выходные кольца разрядной камеры, 14- наружный полюс, 15-анод, 16-анодный токоподвод, 17- крепежный элемент разрядной камеры Особенности данной модели заключаются в следующем: магнитная система была выполнена с увеличенными примерно на 20% по сравнению с двигателем СПД-100 сечениями элементов магнитопровода и увеличенным числом витков катушек намагничивания для обеспечения эффективной работы при повышенных разрядных напряжениях. В схеме двигателя предусмотрена дополнительная катушка намагничивания (позиция 9 на рисунке 1.3), позволявшая изменять топологию магнитного поля в прианодной области.

Интегральные характеристики модели СПД-100В, полученные при различных разрядных напряжениях  $U_d$  и расходах  $\dot{m}$  ксенона через ускорительный канал приведены на рисунках 1.4(а) – (в). Из этих данных следует, что с увеличением разрядного напряжения, как и ожидалось, возрастает удельный импульс тяги, что объясняется увеличением скорости ионов при увеличении разрядного напряжения в соответствии с соотношением (1.2). Это приводит к увеличению тяги двигателя, поскольку степень переработки потока атомов в ионы в СПД на оптимальных режимах его работы оказывается достаточно высокой. Возрастает при этом и мощность разряда в соответствии с увеличением как разрядного напряжения, так и тока разряда. Поэтому для обеспечения умеренного уровня мощности, приемлемого для достижения большого ресурса двигателя, приходится уменьшать расход рабочего газа через ускорительный канал, что приводит к снижению тяговой эффективности двигателя (см. рисунок 1.4(в)).

В прикладном плане важно то, что, например, при приемлемой для длительной работы двигателя масштаба СПД-100 мощности разряда 2кВт были получены значения «анодного» (рассчитанного без учета расхода ксенона через катод) значения удельного импульса тяги (31,5-32км/с). Однако если учесть обратный поток рабочего газа из вакуумной камеры и расход через катод, то величина удельного импульса уменьшится до 26,6км/с [1]. Также стоит принять во внимание то, что при длительной наработке двигателя происходит падение удельного импульса тяги примерно на 10%, т.е. средний за ресурс удельный импульс тяги будет порядка 25км/с.

В работе [1] отмечалось также, что одной из основных причин снижения тягового КПД является расширение СИУ (увеличивается потеря ионов на стенках) в направлении анода вследствие уменьшения расхода рабочего газа через него. Сказанное подтверждается результатами определения распределений потенциала плазмы  $\varphi_{pl}$ (рисунок 1.5(а) и плотности тока ионов  $j_i$  (рисунок 1.5(б)) на пристеночные зонды. В частности, на приведенных графиках отчетливо видно, что распределение потенциала и распределения плотности ионного тока на стенки, характеризующие положение зоны преимущественной ионизации, смещаются в направлении анода при уменьшении расхода ксенона через

ускорительный канал. Последнее приводит к расширению зоны износа, увеличению потерь ионов на стенках и увеличению скорости износа стенок разрядной камеры [1]. Соответственно, усложняется решение проблемы обеспечения большого ресурса двигателя на режимах работы с повышенным удельным импульсом тяги.



Рисунок 1.4. (а) - ВАХ лабораторной модели СПД-100В; (б) - Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-100В от разрядного напряжения; (в) - Зависимость тягового КПД модели СПД-100В от разрядного напряжения



Рисунок 1.5 (а) - Распределения потенциала плазмы вдоль ускорительного канала СПД-100В; (б) - Распределения плотности ионного тока на пристеночные зонды, расположенные вдоль канала СПД-100В при разрядном напряжении 700В

В дальнейшем для выявления закономерностей износа стенок разрядной камеры и влияния на этот процесс режима работы двигателя в НИИ ПМЭ МАИ был проведен ряд эрозионных испытаний, которые включали режимы работы с разрядным напряжением 500, 700, 850, 1000В. Длительность испытаний составляла от 30 до 200ч, и выбиралась исходя из возможности четкого определения профиля стенок. Картина профилей стенок разрядной камеры для некоторых режимов, показана на рисунках 1.6 [51]. Обращает на себя внимание то, что с увеличением разрядного напряжения протяженность зон износа возросла до 15мм на внутренней стенке, что подтверждает расширение слоя ионизации и ускорения при увеличении разрядного напряжения и сопутствующем этому уменьшении расхода ксенона через ускорительный канал.

Для сопоставления скоростей износа штатной модели двигателя СПД-100 и двигателей того же масштаба, но работающих при повышенных разрядных напряжениях, было проведено моделирование износа. Моделирование проводилось при помощи программного обеспечения, специально разработанного для этих целей [52]. На основании результатов этого моделирования сопоставлялись времена достижения одинакового по величине износа на срезе разрядной камеры для режимов работы с напряжением разряда 300В и режимов с повышенным разрядным напряжением. Износ профиля за время 310ч был взят из рисунка 1.6(а) и соответствует второму профилю стенок при испытаниях двигателя СПД-100 [53].



Рисунок 1.6. (а) — Результат эрозионных испытаний для лабораторной модели двигателя СПД-100 на режиме с разрядным напряжением 700В и разрядным током 2,1А; (б) - Результат эрозионных испытаний для лабораторной модели двигателя СПД-100 на режиме с разрядным напряжением 850В и мощностью разряда 1,8кВт

Моделирование показало, что при работе с высоким разрядным напряжением происходит увеличение скорости износа, причем непропорционально нарастанию разрядного напряжения (рисунок 1.7 и таблица 1.4), а именно: скорость износа стенок ускорительного канала возрастает быстрее отношения разрядного напряжения к базовому (здесь 300В) увеличивается медленнее, чем скорость износа стенок ускорительного канала на режимах с соответствующим разрядным напряжением. Кроме того, работа на режимах с меньшим расходом рабочего тела при той же мощности разряда сопровождается большей скоростью износа (рисунок 1.7(б)) [51].



Рисунок 1.7 (а) - Эрозия стенок ускорительного канала двигателя СПД-100 (*U*<sub>d</sub>=300B, *I*<sub>d</sub>=4.5A); (б) - Отношение абсолютной величины скорости износа к величине износа в ходе ресурсных испытаний СПД-100 (1 - *m*=4,3-4,5 мг/с, 2- *m*=2,0-2,3 мг/с)

Таблица 1.4 - Зависимость нормализованного коэффициента скорости износа от разрядного напряжения

U <sub>d</sub> , B	300	500	700	850	1000
U <sub>d</sub> /300	1	1,67	2,33	2,83	3,33
ξ <sub>i.m1</sub> /ξ <sub>1.mi</sub>	1,0	2,5	4,7	6,3	7,6

Примечание: **ξ**<sub>i.m1</sub>/**ξ**<sub>1.mi</sub> – отношение абсолютной скорости износа на выбранном разрядном напряжении к величине износа при разрядном напряжении *U*<sub>d</sub>=300B

Таким образом, основными проблемами при разработке двигателя с повышенным удельным импульсом тяги является снижение тяговой эффективности и ресурса при повышении разрядного напряжения. Для решения данных проблем необходимо провести более глубокую модернизацию конструкции СПД, причем основное внимание следует уделить совершенствованию магнитной системы, определяющей основные характеристики двигателя.

Одной из возможностей улучшения конструктивной схемы двигателя является переход к схеме с магнитным экраном, отделенным от остальных элементов магнитной системы. Предполагается, что данная схема позволяет снизить потоки рассеяния магнитного потока и, соответственно, снизить затраты на создание магнитного поля и массу магнитной системы. С учетом этого были рассмотрены следующие схемы СПД с отделенным магнитным экраном:

Схема 1 с магнитным экраном, охватывающим керамическую разрядную камеру. Возможная реализация такой схемы показана ниже на примере модели СПД-100 (рисунок 1.8). Эта схема была предложена еще в патенте [54], но в России прижилась схема с магнитным экраном, соединенным с остальными элементами магнитной системы, также предложенная в упомянутом патенте и реализованная в современных серийных двигателях типа СПД-50, СПД-70, СПД-100 и опытных образцах двигателей типа СПД-140 и СПД-140Д разработки ОКБ «Факел».



Рисунок 1.8 - Схема двигателя масштаба СПД-100 с «оторванным» магнитным экраном

Схема 2 по патенту РФ [55] с магнитным экраном, охватывающим разрядную камеру, часть которой выполнена из проводящего материала (рисунок 1.9(а)). В этой схеме в выходной части разрядной камеры устанавливаются керамические кольца, ограничивающие область разряда в области максимальных значений индукции магнитного поля, в которой реализуются большие электрические поля.

Схема 3 двигателя с магнитным анодом по патентам РФ [55, 56], у которой магнитный экран, выполняет функции разрядной камеры, на выходе которой устанавливаются керамические кольца, перекрывающие области разряда с большими значениями магнитной индукции (рисунок 1.9(б)). При этом магнитный экран может выполнять также функции анода и газораспределителя [57].

Варианты 2 или 3 реализуются в разработках исследовательского центра имени М.В. Келдыша (ИЦК), а вариант с магнитным экраном, выполняющим функции части разрядной камеры и анода, разрабатывается в ОКБ «Факел» [57].



Рисунок 1.9 (а) – Схема двигателя с проводящей частью разрядной камеры; (б) - Схема СПД с магнитным анодом – газораспределителем

Следует отметить, что наряду с указанными выше достоинствами схемы 2 и 3 обладают следующим недостатком, существенным при рассмотрении проблемы создания высоковольтных двигателей. Он сводится к тому, что проводящая часть разрядной камеры контактирует с плазмой и приобретает потенциал, близкий к анодному, даже если она не соединена с анодом. Поэтому необходима ее надежная изоляция для предотвращения паразитных разрядов и пробоев с нее. Эта изоляция в ДАС и в схемах 2 и 3 осуществляется электростатическим экраном, окружающим проводящую часть разрядной камеры и расположенным на достаточно малом расстоянии от нее. Этот экран выполняется либо в виде магнитного экрана, если он расположен снаружи разрядной камеры, либо специальным электростатическим экраном, если магнитный экран исполняет роль проводящей части разрядной камеры. Возможность такой защиты от пробоев и паразитных разрядов известна давно, но при этом необходимо предотвращать повышение давления в рассматриваемом промежутке между проводящей частью разрядной камеры и электростатическим экраном и обеспечивать чистоту поверхностей, ограничивающих рассматриваемый зазор, в течение длительных промежутков времени как при наземных испытаниях, так и в условиях натурной эксплуатации. И даже при выполнении защитных мер всегда существует вероятность возникновения паразитных разрядов или пробоев, особенно, при увеличении размеров двигателя и, соответственно, при увеличении площади поверхностей, ограничивающих рассматриваемый зазор.

С учетом указанных выше требований в НИИ ПМЭ МАИ разработана схема 4 высоковольтного двигателя с магнитным экраном (рисунок 1.10), выполняющим функции на выходе которой установлены керамические кольца, части разрядной камеры, ограничивающие область разряда с максимальной индукцией магнитного поля. Одновременно с этим проводящая часть разрядной камеры изолирована от других керамическим проводящих элементов двигателя корпусом, что предотвращает возникновение пробоев и паразитных разрядов [58]. Таким образом, получается схема с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры.



Рисунок 1.10 - Базовая конструктивная схема модели типоразмера СПД-100П (1 –анод – газораспределитель; 2 – магнитный экран; 3,4 - магнитные полюса; 5,6 – катушки намагничивания; 7,8 - выходные кольца разрядной камеры; 9 – экранирующая сетка)

Размещение магнитного экрана внутри разрядной камеры позволяет расширить зону регулирования магнитного поля в области межполюсного зазора, что обеспечивает расширение возможностей управления положением зоны ускорения ионов и зон эрозии стенок разрядной камеры. Таким образом, отличием конструкции модели СПД-100П (в дальнейшем все модели, выполненные по схеме 4, обозначаются с индексом «П») от рассмотренной выше модели СПД-100В является введение отделенного от остальных элементов магнитной системы магнитного экрана 2, размещенного внутри керамического корпуса разрядной камеры (см. рисунок 1.10). Данный магнитный экран может быть изготовлен из пермендюра (железокобальтовый сплав 49КФ), ключевыми свойствами

которого являются высокая магнитная проницаемость и высокая температура точки Кюри, равной 980<sup>0</sup>С.

В результате моделирования магнитного поля с помощью стандартных программ было получено, что магнитная система модели СПД-100П позволяет получать магнитное поле с отчетливо выраженной фокусирующей геометрией силовых линий магнитного поля (рисунок 1.11(а)) и с большей скоростью ее нарастания к выходу из ускорительного канала, чем в модели СПД-100В (рисунок 1.11(б)). Это позволяет уменьшить при прочих равных условиях протяженность СИУ и протяженность зон эрозии на стенках. Соответственно, можно было ожидать, что она позволит добиться лучших результатов в плане оптимизации работы двигателя при повышенных разрядных напряжениях.



Рисунок 1.11 (а) – Конфигурация силовых линий магнитного поля и распределение магнитной индукции вдоль срединной поверхности ускорительного канала при токе во внутренней катушке намагничивания 1,2А и 1,5А в наружных катушках; (б) - Распределение индукции магнитного поля в канале в моделях типа СПД-100В и СПД-100П при одинаковых Ампер-витках

Помимо «отрыва» магнитного экрана от остальных элементов магнитной системы двигателя увеличение индукции в максимуме по длине ускорительного канала обусловлено тем, что за счет уменьшения внутреннего диаметра наружного полюса с 117мм до 110мм и одновременного увеличения внутреннего полюса с 45мм до 50мм уменьшен межполюсной зазор с 36мм до 30мм. При прочих равных условиях данное уменьшение межполюсного зазора должно привести к росту магнитной индукции на 20%. Фактическое же увеличение индукции составило примерно 50%. Таким образом, за счет перехода на новую схему удается увеличить магнитную индукцию еще на 20-30 процентов.

Как отмечалось выше, в связи с уменьшением плотности расхода при увеличении разрядного напряжения и уменьшении расхода рабочего газа через ускорительный канал и возможным снижением вероятности ионизации атомов рабочего газа в ускорительном

канале определенный эффект может дать организация дополнительного разряда. Поэтому представляло интерес изучение влияния схем питания разряда в СПД на его работу и характеристики, в том числе, при работе по двухступенчатой схеме. Одним из преимуществ моделей с экраном внутри разрядной камеры является возможность снабдить магнитный экран электрическим выводом и таким образом двигатель сможет работать по двухступенчатой схеме питания разряда. В случае двухступенчатого режима экран исполняет роль промежуточного электрода или катода в разряде первой ступени. Кроме возможности организации дополнительного разряда для более эффективной ионизации РТ, магнитный экран может исполнять роль электрода, управляющего переносом электронов в прианодной области. И, наконец, его можно соединить с анодом и получить версию «двигателя с магнитным анодом». Таким образом, модели данной схемы обладают расширенными функциональными возможностями. С учетом того, что предварительные исследования характеристик модели СПД-100П показали, что на режимах работы с повышенными значениями удельных импульсов тяги существует возможность получать достаточно высокие тяговые характеристики, представленная схема была выбрана в качестве базовой для дальнейшего исследования особенностей работы и характеристик двигателей такой схемы.

# 1.4 Обзор методов и результатов исследования процессов, протекающих в струе СПД

Одним из важных условий штатного использования СПД в составе ГКА с длительным САС является оценка взаимодействия плазменной струи, истекающей из СПД, с элементами конструкции КА. Известно, что СПД создает вокруг себя искусственное плазменное облако, которое изменяет зарядовое состояние поверхностей КА, а также оказывает эрозионное, механическое и тепловое воздействие на элементы как спутника, так и самого двигателя. Поэтому с целью оценки взаимодействия СПД и КА в конце 1970-х гг. в СССР было проведено первое систематическое исследование струи СПД на расстояниях от среза двигателя до 10м [59]. В этой работе были определены распределения плотности ионного тока в струе и плотности потока нейтральных частиц; энергетический спектр ионов и температура электронов. В результате было установлено, что плотность ионного тока убывает по закону  $\sim 1/R^2$  от двигателя; электронная температура медленно убывает с увеличением расстояния от двигателя и ее величина изменяется в пределах от ~1эВ возле среза СПД до 0,15эВ на расстоянии 9м. Также показано, что на основе распределения

энергии ионов можно сделать вывод о наличии в струе расширяющегося ядра с большой энергией ионов, которая постепенно уменьшается в направлении периферии.

Затем в начале 1990-х с целью обеспечения интеграции российских СПД с зарубежными КА были проведены дополнительные исследования струи двигателя СПД -100 [60, 61]. В данных работах определялись угловые расходимости плотности ионного тока и энергии ионов относительно оси двигателя. Данные о плотности ионного тока были получены с помощью зондов Фарадея и с помощью многосеточного зонда измерены также распределения энергии энергоанализатора. Были ИОНОВ. Зонды располагались на подвижной штанге, которая перемещалась по окружности с радиусом 1м и с центром, совпадающим с пересечением оси двигателя и выходной плоскости двигателя, как это показано на рисунке 1.12(а). Диапазон измерений по углу находился в пределах  $\pm 60^{\circ}$ относительно оси двигателя. Результаты, полученные в данном исследовании (рисунок 1.12(б)), показали, что 95% «быстрых» ионов пересекают контрольную поверхность в пределах конуса с полууглом при вершине ~45<sup>0</sup>. В то же время данные для распределения энергии ионов совпадают с результатами, полученными в предыдущих исследованиях [59], и свидетельствуют о существовании ионов с энергией, близкой к соответствующей приложенному разрядному напряжению в центре струи, и о низкоэнергетических ионах на больших углах относительно оси двигателя [60].



Рисунок 1.12 (а) — Расположение зондов на поворотной штанге; (б) - Распределение плотности ионного тока, измеренное многосеточным зондом с потенциалом на отсечной сетке 30В и 50В

По похожей схеме проводились исследования струй нескольких двигателей: ДАС Д-55 (ЦНИИМаш), СПД-100 (две модели: первая – новая модель, вторая – отработавшая 6000 часов; обе модели изготовлены в ОКБ «Факел») и Т-100 (испытания проходили три двигателя разных поколений, разработанные в исследовательском центре им. М.В. Келдыша), представленных в работе [61]. Система измерения была близка к той, что использовалась в работе [60], однако зонды перемещались в диапазоне  $\pm 100^{\circ}$  относительно оси двигателя и по окружности с радиусом 0,6м. В работе было проведено сравнение расходимости струй всех перечисленных двигателей на номинальном режиме работы, в результате чего установлено, что расходимости струи разных двигателей не имеют заметных отличий. Затем исследовалось изменение формы струи и величины ионного тока при различных разрядных напряжениях и расходах рабочего газа. Как ожидалось, при изменении расхода РТ происходит эквивалентное изменение величины ионного тока, а форма струи при этом остается практически неизменной. Изменение разрядного напряжения в большей степени влияет на величину ионного тока. Так при увеличении напряжения ионный ток растет, и на данной основе сделан вывод об увеличении доли многозарядных ионов. Кроме сравнения расходимости струй данных двигателей в работе оценивалось влияние на расходимость следующих факторов: остаточное давление в вакуумной камере, расход рабочего газа через катод и величина токов в катушках намагничивания. В результате выявлено, что расход РТ через катод и величина токов в катушках намагничивания не влияет на расходимость струи. В то же время изменение остаточного давления в вакуумной камере показало, что с ростом давления увеличивается величина плотности ионного тока на больших углах относительно оси двигателя, что свидетельствует об интенсификации процессов перезарядки.

Также необходимо обратить внимание на то, что, как и в исследовании [59], были обнаружены ионные потоки за плоскость среза ускорительного канала. Авторы сделали предположение, что данные «обратные» ионные потоки образуются в результате упругого рассеяния ускоренных ионов на нейтральных частицах и на медленных ионах.

Несколько позже в НИИ ПМЭ МАИ было проведено детальное исследование параметров струи СПД-70 [62], в котором также определялось влияние остаточного давления в вакуумной камере на расходимость струи, среднюю энергию ионов в струе и на локальные параметры плазмы на расстоянии 0,7м от двигателя. В результате установлено, что с ростом давления в камере расходимость струи постепенно уменьшается (рисунок 1.13(а)).

Также установлено, что с увеличением давления происходит снижение средней энергии ионов на больших углах относительно оси двигателя (рисунок 1.13(б)).

Данное обстоятельство объясняется увеличением плотности нейтральных атомов на срезе двигателя, что ведет к деформации эквипотенциальных линий в выходной части ускоряющего слоя, сдвигая его в направлении анода и, тем самым, уменьшая расходимость потока ускоренных ионов. В тоже время максимум средней энергии ионов практически не изменяется при разных значениях давления. Отмеченное явление можно объяснить тем, что ионы с максимальной энергией рождаются ближе к аноду и двигаются по параллельным оси двигателя траекториям и, следовательно, на их движении в меньшей степени сказывается увеличение концентрации нейтральных атомов на срезе двигателя.



Рисунок 1.13 (a) — Зависимость полуугла расходимости струи СПД-70 от давления в вакуумной камере; (б) - Средняя энергия ионов относительно оси двигателя

В рассматриваемом исследовании было установлено также, что концентрация ионов в струе двигателя в стендовых условиях, главным образом, формируется за счет ионов перезарядки. Движение данных медленных ионов определяется электрическими полями в струе, которые возникают за счет разности потенциалов плазмы с максимумом в центре струи и постепенным уменьшением в направлении периферии, из чего следует, что ионы перезарядки двигаются преимущественно в радиальном направлении и за плоскость среза двигателя, формируя так называемые «обратные» ионные потоки. Для оценки величины обратных ионных потоков использовалась система плоских зондов, собирающие поверхности которых находились в выходной плоскости СПД.

Кроме прямых методов диагностики параметров струи также применяются бесконтактные методы измерения. Например, в [63] скорости ионов на выходе из двигателя определялась с помощью лазера. Данный метод измерения скорости ионов основан на регистрации индуцированного лазером свечения с использованием эффекта Допплера. Данным способом определялась осевая, радиальная и азимутальная скорости ионов на расстоянии 11мм от среза двигателя для первых двух типов скоростей, а азимутальная
скорость измерялась на срезе двигателя. В результате было установлено, что азимутальная скорость достигает 250м/с, а осевая изменяется в диапазоне 12,7-15,8км/с при разрядном напряжении 250-350В. Изменение радиальной скорости имеет более сложный характер и зависит от радиального положения точки измерения относительно середины кольцевого ускорительного канала. Так максимальной величины 7,5км/с радиальная скорость достигает на расстоянии 8мм от середины ускорительного канала в направлении наружного полюса. Стоит отметить, что максимальное значение радиальной скорости достигнуто в крайней точке измерения и, возможно, если бы измерения были продолжены в сторону наружного полюса, радиальная скорость была бы больше.

Наиболее полное исследование струи СПД-100 проведено в работах [64 - 68]. Так были проведены описанные выше методы измерения струи, результаты которых совпали с новыми данными. Также было получено распределение потока нейтральных атомов в струе двигателя, определенного прямым методом с помощью детектора нейтральных частиц. Измерение показало, что наибольшее количество нейтральных частиц приходится на ядро струи в пределах  $\pm 10^0$  от оси двигателя.

Кроме того, было произведено измерение энергии ионов в струе двумя методами. Вопервых, энергия ионов определялась с помощью широко используемого многосеточного зонда – энергоанализатора, а затем - с помощью сконструированного в Мичиганском университете молекулярного масс-спектрометра. В целом результаты измерений двумя способами достаточно близки, однако есть некоторые различия: так обнаружено, что при углах в диапазоне  $\pm 5 \cdot 10^0$  значительную часть ионного потока составляют ионы с энергией ~500эВ, что существенно больше приложенной разности потенциалов в 300В, а при углах ~10<sup>0</sup> от оси двигателя данные ионы доминируют (рисунок 1.14(а)). Подобный результат с помощью многосеточного зонда получить не удавалось.

Также с использованием масс-спектрометра установлено, что при отклонении от оси двигателя на  $60^{0}$  в струе появляются ионы с энергией порядка 100эВ, доля которых с увеличением угла постепенно растет и на  $80^{0}$  данная компонента уже преобладает над другими. Одновременно с этим, за плоскостью среза двигателя присутствуют ускоренные ионы с энергией до 230эВ. При отклонении более  $120^{0}$  преобладают ионы перезарядки (рисунок 1.14(б)).



Рисунок 1.14 (a) – Энергия ионов в струе СПД-100 между 7-20<sup>0</sup> относительно оси двигателя на расстоянии 1м; (б) - Наиболее вероятная энергия ионов в зависимости от угла относительно оси двигателя на расстоянии 0,5м и 1м

Для объяснения факта присутствия ускоренных ионов на углах порядка  $\pm 90^{0}$  и за плоскостью среза двигателя было выдвинуто предположение об упругом рассеянии ускоренных ионов на нейтральных частицах и других ионах, и сделан вывод, что именно данные ионы формируют высокоэнергичную часть радиальных ионных потоков. Представленная в этой работе [69] модель описывает процессы, протекающие в расходящемся основном потоке ускоренных ионов, в том числе, процессы перезарядки ускоренных ионов на нейтральных частицах, которые присутствуют как в струе двигателя, так и на нейтральных частицах фоновой атмосферы в вакуумной камере. Также в работе моделируются потоки рассеянных ионов и их энергетический спектр, на которые, по мнению авторов, приходится большинство ионов с энергией более 50эВ при углах более  $45^{0}$ . Полученный результат сравнивался с данными экспериментального исследования струи американского двигателя ВРТ-4000 на режиме работы с разрядным напряжением  $U_d$ =300В (рисунок 1.15) [70].

Измерения энергии ионов в зависимости от угла относительно оси двигателя показали, что на производной кривой задержки на углах порядка  $35^{0}$  присутствует четко выраженный пик ионов с энергией около 150эВ, который является сигналом рассеянных ускоренных ионов. Моделирование потоков рассеянных ионов подтвердило данный вывод, что можно увидеть на рисунке 1.15, где пунктирными линиями показаны распределения энергий основного потока ускоренных ионов и потока рассеянных ионов. Бесспорно то, что на углах  $35^{0}$  -  $70^{0}$  количество рассеянных ионов значительно, однако на  $80^{0}$  –  $100^{0}$  данное утверждение не может быть столь категоричным по причине того, что во всех приведенных

исследованиях средства измерения располагались на слишком большом расстоянии от двигателя. Подобное расположение может сильно исказить картину происходящего непосредственно вблизи двигателя ввиду того, что на удалении присутствуют ионы, попавшие туда из других областей струи двигателя. К тому же упор только на один механизм при объяснении присутствия ионов с энергией больше 50эВ в радиальных потоках представляется однобоким.



Рисунок 1.15 — Сравнение результатов моделирования с данными энергетического анализа струи ВРТ-4000 на 35<sup>0</sup> относительно оси двигателя

В качестве примера попытки найти другой механизм формирования высокоэнергичных ионов на больших углах можно привести исследование [71]. В данной работе изучалась возможность появления высокоэнергичных ионов в радиальных ионных потоках за счет колебания потенциала плазмы в ускорительном канале, в результате чего за срезом двигателя может возникнуть значительная разность потенциалов в радиальном направлении. Однако математическое моделирование показало, что с помощью данного механизма можно объяснить появление в радиальных потоках ионов с энергией ~100эВ, в то время как проблема возникновения ионов с энергией до 220эВ (при  $U_d$ =250В), которые были обнаружены в ходе экспериментального исследования, остается нерешенной.

С началом систематических исследований СПД, работающих при повышенных разрядных напряжениях, появилась необходимость детальных исследований струи таких двигателей еще на этапе их разработки. Известно, что большая расходимость струи СПД является его серьезным недостатком, а при увеличении разрядного напряжения и, следовательно, энергии ионов данный фактор становится критически важным. Так в работе [72] проводилось теоретическое и экспериментальное изучение струи двигателя ВНТ-1500, работающего в диапазоне разрядных напряжений 300-1000В. В результате было установлено, что с увеличением напряжения повышается эффективность ионизации рабочего тела, о чем можно судить по увеличению ионного тока в приосевой части струи.

Также с ростом напряжения разряда наблюдается сужение струи на периферии, что ведет к уменьшению полуугла расходимости (рисунок 1.16(а)).



Рисунок 1.16 (а) – Зависимость полуугла β<sub>0,95</sub> от разрядного напряжения; (б) -Распределение энергии ионов при угле -90<sup>0</sup> при различных разрядных напряжениях

Похожий результат был получен в НИИ ПМЭ МАИ при исследовании струй различных двигателей, работающих на повышенных разрядных напряжениях: высоковольтные лабораторные модели PPS-1350, СПД-100 и СПД-140М [73]. Также в этих работах проводился энергетический анализ струй двигателей в зависимости от угла направления измерений относительно оси двигателя с использованием многосеточного зонда – энергоанализатора.

Так было установлено, что с увеличением разрядного напряжения происходит увеличение разницы между потенциалом, характеризующим максимальное значение средней энергии ионов в струе, и величиной приложенного разрядного напряжения. А именно, для модели СПД-100 при  $U_d$ =300В разница составляет 60В, при напряжении 500В – 90В, а при 900В разница уже достигает 110В [1]. На основе данного наблюдения автор сделал вывод об увеличении прианодного падения потенциала.

Еще одним любопытным пунктом, на который необходимо обратить внимание, является результат измерения энергии ионов на больших углах. Так на рисунке 1.16(б) показана энергия ионов при угле 90<sup>0</sup>, на котором видно доминирование в данной области ионов перезарядки. [72].

Кроме рассмотренных ранее экспериментальных данных в работе [74] было проведено моделирование струи двигателя, работающего на различных режимах. Полученные результаты для приосевой области струи двигателя в целом совпадают с экспериментом, а также и с некоторыми другими исследованиями [72]. Следует отметить, что для всех

режимов работы двигателя, смоделированных в данном исследовании, присутствуют четко выраженные радиальные и обратные ионные потоки в окрестности выходной плоскости СПД (рисунок 1.17(а)). Движение данных радиальных ионных потоков можно объяснить преимущественно продольным направлением изоконцентралей, которые в первом приближении являются эквипотенциальными линиями электрического поля, в результате чего напряженность электрического поля направлена преимущественно по радиусу. Поэтому ионы перезарядки под действием электрического поля ускоряются в радиальном направлении. Как видно на рисунке 1.17(б) моделирование показывает доминирование ионов перезарядки на периферии струи двигателя на расстоянии 1-2 калибров (наружный диаметр двигателя) от оси двигателя.



Рисунок 1.17(а) — Линии уровня равной плотности ионов в продольном сечении для двигателя типа СПД-100; (б) — Линии уровня равной относительной концентрации ионов перезарядки в продольном сечении; (в) - Распределение плотности тока «обратных» потоков ионов вдоль выходной плоскости двигателя СПД-100 на разных режимах его работы

Расчетная величина обратных ионных потоков на выходную плоскость двигателя достигает максимального значения на расстоянии 1-2 калибра от оси двигателя и затем быстро убывает с увеличением расстояния (рисунок 1.17(в)).

Однако ионы перезарядки не могут приобрести энергию порядка 100-200эВ, полученную в работе [68]. Поэтому представляло интерес продолжить исследование параметров ионов в радиальных потоках.

Для построения полной картины, протекающих в струе двигателя процессов, необходимо учитывать то, что условия проведения наземных испытаний существенно изменяют параметры струи двигателя. Особенно это влияние заметно на периферии струи, откуда идет наибольший поток ионов на поверхности КА. Поэтому, с целью проверки достоверности стендовых испытаний в 2000-2001гг были проведены натурные испытания на двух ГКА «Экспресс-А2» и «Экспресс-А3», в составе которых работает ЭРДУ из восьми СПД-100 [75]. С помощью прямых измерений были определены следующие характеристики струи двигателя: распределение плотности ионного тока, которое измерялось с помощью зондов Фарадея, размещенных в различных местах спутника; энергия ионов измерялась многосеточными зондами, величина электрического поля и давление собственной атмосферы спутника при работающем двигателе (рисунок 1.18(а)).

В результате установлено, что энергия ионов на больших углах относительно оси двигателя, измеренная на «Экспрессах» больше, чем в стендовых условиях. Кроме того, распределение плотности ионного тока заметно ниже данных, полученных на земле (рисунок 1.18(б)).



Рисунок 1.18 (а) - Расположение датчиков на борту ГКА «Экспресс-АЗ»; (б) – Зависимость плотности ионного тока от угла

Таким образом, на основании проведенного анализа исследований струй СПД различных конструкций и работающих на различных режимах можно сделать несколько выводов. Во-первых, процессы, протекающие в основном потоке ускоренных ионов в приосевой области, достаточно хорошо изучены: результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученных как в стендовых условиях, так и в

натурных исследованиях. В тоже время параметры струи на больших углах относительно оси двигателя выглядят противоречивыми. Так в некоторых экспериментальных и теоретических исследованиях говорится о преобладании на периферии струи ускоренных рассеянных ионов со средней энергией [68, 69] тогда, как в других работах [63, 72, 74] отмечается присутствие только ионов перезарядки с энергией не более 50эВ. Также необходимо обратить внимание на то, что разница между стендовыми испытаниями и натурными в наибольшей степени сказывается на периферийной части струи. Следовательно, для более ясного понимания процессов, происходящих в этой области, необходимы дополнительные исследования.

Значимость радиальных ионных потоков нельзя недооценивать. Они могут распылять элементы конструкции самого двигателя, а также подвергать эрозионному воздействию некоторые элементы КА, в частности, его солнечные батареи. Так, примером негативного воздействия данных потоков является эрозия поджигающих электродов катодов, как это показано на рисунке 1.19, что в конечном итоге может привести к выходу из строя катода.



Рисунок 1.19 — Внешний вид катодов СПД-100 после ~917 часов и после 7000 часов работы

Также является очевидным, что столь значительная эрозия электродов не может быть вызвана ионами перезарядки, энергия которых не достигает 50эВ. Следовательно, в радиальных ионных потоках присутствуют ионы с энергией не менее 100эВ, ответственных за распыление катодов.

Поэтому исследование радиальных ионных потоков весьма актуально с прикладной точки зрения. Для этого необходимо определить энергетическую структуру радиальных ионных потоков, а также преимущественное направление движения высокоэнергичной компоненты на различных режимах работы.

Также следует проработать механизмы защиты катодов от ионного распыления, начиная от простого способа перемещения катода в зоны с минимальной величиной энергии ионов в радиальных потоках, а также рассмотреть возможность защиты катода путем его экранирования. При этом необходимо обратить внимание на эффективность работы двигателя, так как установлено [76], что положение катода относительно анодного блока существенно влияет на величину потенциала катод – земля, что, в свою очередь, влияет на величину разницы потенциалов, непосредственно идущей на ускорение ионов.

## 1.5 Цели и основные задачи диссертационной работы

С учетом изложенного выше в качестве основных целей в диссертационной работе были определены следующие:

• выявление особенностей работы двигателей с магнитным экраном внутри разрядной камеры на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги;

•оптимизация конструкции двигателей с магнитным экраном внутри разрядной камеры, схемы питания разряда и режимов работы с высокими удельными импульсами тяги с целью повышения тяговых характеристик и разработки рекомендаций по проектированию двигателей такой схемы для работы на режимах с высоким удельным импульсами тяги;

• определение параметров ионов в радиальных ионных потоках, движущихся в окрестности выходной плоскости СПД, где обычно располагаются катоды;

• проверка возможности защиты катода от ионного распыления путем его переноса за срез ускорительного канала двигателя и определение влияние такого переноса на тяговые характеристики двигателя.

Для достижения этих целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести исследование характеристик и выявить особенности работы выбранной схемы на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги.

2. Провести оптимизацию конструкции и схемы питания разряд в СПД выбранной схемы и разработать рекомендации по выбору схемы, параметров конструкции и рабочих режимов СПД с высоким удельным импульсом тяги.

3. Провести экспериментальное исследование параметров радиальных ионных потоков в окрестности выходной плоскости СПД на различных режимах работы.

4. Установить влияние на тяговые характеристики СПД перемещения катода за выходную плоскость и его экранирования с целью защиты катода от ионного распыления.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ СПД-100П И СПД-85П НА РЕЖИМАХ С ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТЯГИ

## 2.1. Описание экспериментальной установки и методик и средств измерения интегральных параметров моделей

### 2.1.1. Описание вакуумного стенда У-2В-1

Исследования характеристик моделей СПД проводились в вакуумной камере (рисунок 2.1), объем которой составлял около  $11 \text{ M}^3$  (диаметр - 2м и рабочая длина – 3,5м). Камера оснащена шестью высоковакуумными криогенными насосами Velco 630Xe с суммарной скоростью откачки более 100000л/с. Для удаления водорода, гелия и неона, которые не откачиваются криогенными насосами, вакуумная камера оборудована турбомолекулярным насосом FT-6300WH фирмы Shimadzu. Для создания предварительного разряжения используется «сухой» форвакуумный насос типа Рутса iH1000 DOC Edwards. В итоге данная конфигурация средств откачки позволяет получить статическое давление в вакуумной камере  $2 \cdot 10^{-6}$  Topp., а при расходах ксенона 2-5мг/с динамический вакуум в камере достигает  $2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$  Topp. Измерение давления в вакуумной камере стенда производится высоковакуумными датчиками PKR 251 фирмы Pfeiffer.

Для определения интегральных характеристик двигатель устанавливался на тягоизмерительное устройство (ТИУ), принцип действия которого основан на электромагнитной компенсации отклонения маятника подвески двигателя от следящего маятника, установленного строго по вертикальной оси. Диапазон измерения тяги от 0 до 200мH с ошибкой измерения ±2мH.

Система питания двигателей ксеноном имеет две независимые системы подачи и контроля расхода, основанные на использовании стандартных контроллеров, произведенных компанией MKS Instruments. При этом в магистрали подачи ксенона в катод создается избыточное давление (0,5-1,0) атмосферы путем установки дозатора на входе магистрали в вакуумную камеру с целью предотвращения отравления катода атмосферным воздухом. В анодной линии подачи диапазон изменения расхода РТ составлял 0-10мг/с. Оценка погрешности измерения расхода РТ была произведена весовым способом при взвешивании

баллона с ксеноном до калибровки и после. Калибровка осуществлялась при величине расхода ксенона 5мг/с в течение 10ч. В результате погрешность измерения расхода в анодной линии подачи газа была оценена величиной порядка 2.4%. Диапазон расхода в катодной линии подачи составлял 0-5мг/с с погрешностью ±0,2мг/с.



1 — вакуумная камера; 2 — тягоизмерительный отсек; 3 — высоковакуумный криогенный насос Velco 630Xe; 4 — форвакуумная магистраль; 5 — высоковакуумный затвор; 6 — турбомолекулярный насос Shimadzu FT-6300WH. Форвакуумный насос не показан

Для обеспечения питания электрических цепей двигателя, использовались независимые источники питания:

- источник питания разряда с диапазоном изменения напряжения 100-1500В;

- источник поджигающего напряжения с номинальным значением 300В с балластным сопротивлением;

-источник постоянного напряжения типа PSW7 для питания накальной цепи катода с диапазоном напряжения 0-80В и с током до 40А, пульсация напряжения составляет 0,05%;

- три независимых источника постоянного напряжения типа PSW7 для питания магнитных катушек двигателя с диапазоном напряжения 0-80В и с током до 40А, пульсация напряжения составляет 0,05%.

Измерения всех электрических параметров в цепях питания разряда и катушек намагничивания осуществлялось при помощи системы автоматической регистрации, а также контролировалось независимыми измерениями при помощи стандартных амперметров и вольтметров точностью  $\pm 0,5\%$  относительно максимального значения в диапазоне измерения. Контроль параметров в остальных цепях осуществлялся приборами с погрешностью измерений 1,5% от максимального значения в диапазоне измерения.

Между источником питания разряда и двигателем был установлен стандартный фильтр низких частот с индуктивностью в анодной цепи L=0,35мГн и емкостью между анодом и катодом С=6мкФ. Была предусмотрена также возможность изменения параметров фильтра.

Стенд оснащен также системой автоматической регистрации основных электрических параметров двигателя, расхода газа, показаний ТИУ в темпе эксперимента. Указанная система производит также расчет значений тягового КПД и удельного импульса двигателя.

Измерения параметров струи двигателя на стенде У-2В-1 проводятся обычно с центром в точке пересечения оси двигателя с плоскостью среза его ускорительного канала вдоль окружности, лежащей в плоскости, содержащей ось двигателя. Расстояние R от двигателя до контрольной поверхности выбирается таким образом, чтобы в пределах объема, ограниченного рассматриваемой поверхностью, процессы взаимодействия «первичных» атомов и ионов между собой были бы в основном завершены, и дальнейшее их движение происходило без столкновений. В [77] было показано, что это расстояние должно составлять 5-10 калибров двигателя, т.е. для двигателей типа СПД-100 и СПД-140 R=0.7-1m. Аналогичная система диагностики была апробирована в работах [60, 61].

В НИИ ПМЭ МАИ основным средством диагностики струи СПД является многосеточный зонд – энергоанализатор. Для диагностики локальных параметров плазмы используются электростатические лэнгмюровские зонды различной формы: в основном цилиндрические и плоские.

Энергоанализатор устанавливается внутри вакуумной камеры на штанге, перемещающей его по окружности с радиусом R=0,15-0,9M, расположенной в плоскости, содержащей ось двигателя, с центром в точке пересечения оси двигателя с плоскостью среза ускорительного канала (см. рисунки 2.2). При этом ось зонда в каждом положении штанги направлена в названный центр окружности. Таким образом, предполагается, что ионы распространяются из центра и двигаются прямолинейно.



1 – ТИУ; 2 – СПД; 3 – датчик; 4 – устройство для перемещения зондов. Рисунок 2.2. (а) - Схема размещения устройства для перемещения зондов относительно двигателя; (б) - Общий вид устройства для перемещения зондов в вакуумной камере

### 2.1.2. Многосеточный зонд - энергоанализатор

Для определения основных пространственных и энергетических характеристик струй СПД в НИИ ПМЭ МАИ используется многосеточный зонд – энергоанализатор, схема которого показан на рисунке 2.3. Энергоанализатор имеет простую конструкцию, небольшие размеры и позволяет получать энергетические характеристики ионных потоков, а также измерить ионный ток в струе двигателя.



Рисунок 2.3 – Принципиальная схема многосеточного зонда – энергоанализатора

Принципиальная схема такого энергоанализатора изображена на рисунке 2.3. Он имеет несколько, последовательно расположенных перед коллектором 5 сеток, включая экранирующую сетку 2, сетку 3 для разделения ионов и электронов, а также анализирующую

сетку 4. Поэтому прозрачность анализатора от входа до коллектора существенно зависит от конструктивных параметров сеток. Сетки размещаются в корпусе 1, а потенциалы на них задаются обычно стабилизированными источниками питания (G1, G2 на рисунке 2.3). Измерение тока коллектора осуществляется либо высококлассным микроамперметром 8, либо регистрируется с помощью измерительного осциллографа [78].

Принцип работы описанного энергоанализатора основан на электростатическом разделении ионов и электронов плазмы отсечной сеткой 3 с последующим электростатическим торможением ионов анализирующей сеткой 4. Отсечная сетка 3 находится под отрицательным потенциалом (30-40В) относительно плавающего потенциала защитной сетки 2, соответствующего потенциалу запирания электронной компоненты. Необходимо также учесть, что отверстия в сетке 3 не должны превышать дебаевский радиус экранирования в месте измерения. В режиме измерения плотности ионного тока на анализирующую сетку 4 подается постоянный положительный потенциал U<sub>a</sub>, а в режиме измерения энергетического спектра ионов – сканирующий (пилообразный) положительный потенциал  $U_a$ . Потенциал  $U_a$  задерживает ионы, энергия направленного движения которых не превышает текущего значения  $eU_a$ . Ионы с энергией выше  $eU_a$  собираются коллектором и регистрируются схемой регистрации тока коллектора. В данном случае в качестве регистратора зондовых характеристик используется четырехканальный цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TPS2024.

При проведении исследований с энергоанализатором необходимо учитывать ряд недостатков. Во-первых, из-за наличия сеток существенно уменьшается регистрируемый ионный ток, который измерялся бы при отсутствии сеток. Отношение измеренного ионного тока к реальному называется прозрачностью энергоанализатора. Для определения прозрачности зонда необходимо проводить его калибровку. Чаще всего для этого используется электростатический зонд с охранным кольцом, расположенный В непосредственной близости от энергоанализатора. Измерения производятся одновременно двумя зондами в ядре струи, где доминируют ускоренные ионы и результаты измерений с отсечкой медленных ионов и без их отсечки [60]. Другим недостатком энергоанализатора является то, что он не различает однозарядные и многозарядные ионы. Информация о многозарядных ионах очень важна, т.к. они имеют существенно большую энергию по сравнению с однозарядными ионами. Так, например, в [79] установлено, что для двигателя СПД-100 в основном ионном потоке при углах ~10<sup>0</sup> ускоренные многозарядные ионы доминируют над однозарядными. Следует также отметить, что в случае высокого остаточного давления в вакуумной камере или низкой прозрачности зонда возможна ситуация, когда внутри энергоанализатора существенно возрастает остаточное давление, что

49

может привести к существенной интенсификации процесса перезарядки и в результате привести к занижению величины энергии ионов.

Однако необходимо отметить, что энергоанализатор дает правильное значение средней энергии ионов, отнесенной к единице заряда. Так, например, если в струе имеются только однозарядные и двухзарядные ионы, ускоренные, соответственно, разностями потенциалов  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$ , то средняя энергия иона на единицу заряда:

$$\langle \varepsilon \rangle_1 = \mu_1 e \Delta U_1 + \mu_2 2 e \Delta U_2$$
 (2.1)

Таким образом, нетрудно убедиться в том, что такое же среднее значение энергии ионов на один заряд получается, если рассматривать энергию двухзарядного иона как энергию, переносимую двумя отдельными зарядами, относительная доля которых, очевидно, равна  $2\mu_2$  [74]. Следовательно, если энергоанализатором измеряется плотность ионного тока и среднее значение энергии ионов, то правильно определяется плотность потока энергии, переносимая ионами независимо от того, имеются в этом потоке многозарядные ионы или нет. Сказанное служит дополнительным обоснованием возможности использования электростатического энергоанализатора для контроля параметров струй СПД.

## 2.1.3. Методика определения параметров ионного потока с использованием многосеточного зонда – энергоанализатора

С помощью многосеточного зонда – энергоанализатора можно определить следующие характеристики струи СПД: пространственное распределение плотности ионного тока, а также энергетическое распределение ионов. Для измерения плотности тока ускоренных ионов на анализирующую сетку подается потенциал, достаточный для отсечки медленных ионов, которые всегда существуют в струе СПД вследствие перезарядки ускоренных ионов на нейтральных атомах. Побочный ионный ток так называемых «плазменных» ионов, попадающих в энергоанализатор, возникает вследствие того, что потенциал энергоанализатора смещен в отрицательную сторону относительно потенциала плазмы. Так для летных образцов СПД потенциал плавания корпуса энергоанализатора может составлять (15-20В) относительно катода, тогда как потенциал плазмы еще примерно на (10-15В) больше. Поэтому на вход энергоанализатора с плавающим корпусом и защитной сеткой попадают даже очень медленные ионы, вытянутые из плазмы отрицательным смещением потенциала корпуса энергоанализатора относительно потенциала плазмы. Таким образом, они формируют «плазменный» ионный ток, который необходимо исключить при измерениях тока ускоренных ионов. Кроме того, на вход энергоанализатора могут попадать родившиеся в струе медленные ионы, ускоренные плазменным электрическим полем, созданным градиентами концентрации плазмы. Поэтому при измерении тока ускоренных ионов используется величина задерживающего потенциала на анализирующей сетке порядка +50В относительно катода или +(20-30В) относительно потенциала плавания корпуса энергоанализатора, если потенциалы на сетках задаются относительно потенциала корпуса энергоанализатора.

Вышесказанное подтверждается результатами определения распределений измеренной энергоанализатором плотности тока при разных потенциалах анализирующей сетки (см. рисунок 1.12(б) [60]). Как видно из этого рисунка, увеличение потенциала анализирующей сетки до +50В относительно катода (или до ~ +25В относительно потенциала плавания зонда или энергоанализатора) резко уменьшает измеряемый коллектором энергоанализатора ток.

Для определения суммарного тока ускоренных ионов проводится измерение распределения плотности тока  $j_i(R,\beta)$  этих ионов на рассмотренной выше контрольной сферической поверхности с радиусом *R* по углу  $\beta$  отклонения направлений измерения от оси двигателя (см. рисунок 1.12(а)). Интегрируя это распределение по всей сферической контрольной поверхности можно определить величину искомого суммарного тока по соотношению

$$I_i = 2\pi R^2 \int_0^{\pi/2} j_i(R,\beta) \sin\beta \, d\beta \tag{2.2}$$

Суммарный ток, рассчитанный по результатам измерений энергоанализатором при потенциале анализирующей сетки +50В относительно катода в струе СПД-100, составляет ~0,8 от разрядного тока [1], что близко к значениям ионного тока, измеренным плоским зондом вблизи среза ускорительного канала, где доминирует ток ионов из ускорительного канала, и роль плазменного ионного тока мала [80].

Для определения распределения ионов по энергии штанга с зондом останавливается в нескольких положениях с разными углами  $\beta$ . Для каждого положения датчика снимаются так называемые «кривые задержки», т.е. зависимости тока  $I_c(R, \beta, U_a)$  на коллектор энергоанализатора от потенциала анализирующей сетки. С использованием полученных кривых задержки рассчитывается функцию распределения ионов по задерживающему потенциалу или по энергии ионов  $f(R, \beta, U_a)$  (2.3):

$$f(R,\beta,U_a) = \frac{\left|\frac{\partial I_c(R,\beta,U_a)}{\partial U_a}\right|}{\int_0^\infty \left|\frac{\partial I_c(R,\beta,U_a)}{\partial U_a}\right| dU_a}$$
(2.3)

## 2.2. Результаты исследования интегральных параметров СПД-100П при различных схемах питания разряда

### 2.2.1. Оптимизация конструкции модели СПД-100П

Как уже отмечалось ранее на основе первичного анализа разных конструкторских схем СПД, спроектированных для работы на режимах с высоким удельным импульсом тяги, выбор для дальнейших исследований в НИИ ПМЭ МАИ был остановлен на схеме с магнитным экраном, который является составной частью разрядной камеры (рисунок 2.4(а)). Отмечалось также, что в данной модели магнитный экран изготовлен из пермендюра и изолирован керамическим корпусом от других металлических частей двигателя.



1 –анод-газораспределитель, 2 – магнитный экран, 3,4 - магнитные полюса,
 5,6 – катушки намагничивания, 7,8 - выходные кольца разрядной камеры,
 9 – экранирующая сетка

Рисунок 2.4(а) — Базовая конструктивная схема модели СПД-100П; (б) - Результаты моделирования магнитного поля в модели СПД-100П, вариант с расширенной выходной частью ускорительного канала

Кроме того, магнитный экран был снабжен электрическим выводом для возможности сравнения характеристик двигателя при различных схемах соединения экрана с анодом. Выходные диэлектрические кольца (позиции 7 и 8 на рисунке 2.4(а)) были изготовлены из керамики БГП-10. Была предусмотрена также возможность перемещения магнитного экрана с целью управления распределением магнитного поля в выходной части разрядной камеры.

Как было отмечено в главе 1, размещение магнитного экрана, реализованное в модели СПД-100П, привело к увеличению величины магнитной индукции на срезе ускорительного канала почти на 50% (см. рисунок 1.11(б)) с одновременным увеличением градиента нарастания поля. Таким образом, подтверждено, что при переходе к схеме с магнитным экраном, оторванным от остальных элементов магнитной системы, можно при сопоставимых условиях уменьшить суммарные Ампер-витки в катушках намагничивания и, в том числе, уменьшить число витков в катушках намагничивания и снизить массу магнитной системы. Поэтому переход к такой конструктивной схеме создает предпосылки, как минимум, для снижения затрат на создание магнитного поля и массы двигателя. Но для реализации этих предпосылок необходимо осуществить серию прикладных исследований, поскольку для сравнения характеристик двигателей традиционной и новой схемы нужно добиться сопоставимого уровня оптимизации конструкции и режимов работы двигателя новой схемы.

Поэтому был проведен комплекс прикладных исследований, посвященный названной оптимизации применительно к двигателю с оторванным от остальных элементов магнитной системы магнитным экраном. Результаты этих исследований приведены в последующих разделах данной главы.

На первом этапе испытаний оптимизировалась конструкция двигателя, а именно: подбиралось оптимальное отношение ширины выходной диэлектрической части ускорительного канала с шириной металлической части, во-вторых, определялся зазор между торцами магнитного экрана и плоскостью магнитных полюсов. Критериями оптимизации на данной стадии можно считать следующие:

- модель должна устойчиво работать в широком диапазоне рабочих режимов и обеспечивать получение достаточно высоких тяговых характеристик, по крайней мере, при повышенных разрядных напряжениях;

- длина и диаметры выходных колец должны быть такими, чтобы зоны эрозии гарантированно располагались на цилиндрических частях выходных колец, поскольку при попадании зон эрозии на обращенную к аноду торцевую поверхность выходных колец наблюдалась повышенная скорость их эрозии;

- режимы работы должны обеспечивать умеренную плотность мощности разряда, чтобы обеспечивалась возможность получения достаточно большого ресурса модели.

Методика для определения оптимальной геометрии выходной части ускорительного канала и топологии магнитного поля заключалась в следующем. Для каждого варианта определялись интегральные характеристики в диапазоне расходов ксенона через ускорительный канал 2-3 мг/с и разрядных напряжений 300-900В по типовой методике параметрических испытаний, а именно:

53

после откачки вакуумной камеры до давления остаточных газов до 1•10<sup>-5</sup> Торр.
 осуществлялся запуск двигателя и его обезгаживание при работе с разрядным напряжением
 300В и разрядной мощности порядка 1кВт не менее 1 часа;

 затем снимались вольтамперные характеристики модели при 2-3 расходах ксенона через ускорительный канал постепенным повышением напряжения ступенями на (50-100)В с оптимизацией токов в катушках намагничивания по минимуму разрядного тока и выдержкой при заданном разрядном напряжении до установления всех параметров двигателя в течение 5 минут;

- определение интегральных параметров двигателя при разрядном напряжении порядка 800В и разрядной мощности 2,0-2,1 кВт в течение 2-3 часов, что обеспечивало регистрацию параметров двигателя на установившемся режиме работы.

При этих испытаниях использовались катоды разработки ОКБ «Факел» типа КЭ-5 и КН-3В. Поэтому расход ксенона через них поддерживался постоянным и равным номинальному расходу ксенона через них ~0,45 мг/с.

В результате было установлено, что вариант модели с раскрытой выходной частью, т.е. когда ширина выходного зазора, образованного керамическими кольцами, больше ширины проводящей части ускорительного канала, не обеспечила высокий уровень тяговых характеристик. Отмеченный результат можно объяснить тем, что вследствие упомянутого раскрытия выходной части ускорительного канала снижается концентрация нейтральных атомов и плазмы в этой части канала. Как было показано ранее, это должно приводить к увеличению протяженности слоя ионизации и ускорения (СИУ). В рассматриваемом случае она, по-видимому, увеличилась настолько, что граница этого слоя со стороны анода попадает в область, где силовые линии магнитного поля уже не создают препятствий стоку электронов на магнитный экран и анод. Как видно из рисунка 2.4(б), из-за специфики конфигурации силовых линий магнитного поля вблизи торцов магнитного экрана, эта область значительно приближена к выходному сечению ускорительного канала.

Наилучшие тяговые характеристики продемонстрировала модель, у которой выходная часть ускорительного канала была более узкой, чем металлическая часть канала (СПД-100П2).

Далее приведены результаты параметрических испытаний лабораторной модели СПД-100П2 (рисунки 2.5(а)-(г)).

Следует отметить, что на рисунке 2.5(в) и (г) приведены данные, рассчитанные без учета расхода в катод и влияния давления в вакуумной камере. Если принять для оценки, что расход через катод составляет типичную для современных двигателей долю в 10% от общего расхода, и учесть влияние давления в камере, то можно получить, что при разрядных

54

напряжениях (800-850)В и разрядной мощности ~2,0кВт, типичной для двигателя такого же масштаба, можно получить значения удельного импульса ~30км/с без коррекции на обратный поток и расход ксенона через катод и порядка 27,7км/с с учетом обратного потока ксенона и расхода через катод. Таким образом, модель СПД-100П2 позволила получить примерно на 1000м/с более высокие значения удельного импульса тяги по сравнению с моделью СПД-100В. Это подтверждает перспективность разработанной схемы двигателя.



Рисунок 2.5. (а) - Вольтамперные характеристики модели СПД-100П2 с плавающим магнитным экраном; (б) - Зависимость тяги модели СПД-100П2 с плавающим магнитным экраном от разрядного напряжения; (в) - Зависимость «анодного» тягового КПД модели СПД-100П2 с плавающим магнитным экраном от разрядного напряжения; (г) -Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-100П2 с плавающим магнитным экраном от разрядного напряжения

Также было обнаружено, что при изолированном магнитном экране и ширине выходной части ускорительного канала, меньшей ширины полости в магнитном экране, затрудняется зажигание разряда в двигателе при малых расходах рабочего газа через ускорительный канал. Более детальное описание данного явления приведено в третьей главе. Для устранения этого эффекта магнитный экран при проведении ряда испытаний модели СПД-100П соединялся с анодом через сопротивление порядка 20кОм. Это обеспечивало значение потенциала экрана, близкое к потенциалу анода, и устраняло проблему с зажиганием разряда. При этом ток в цепи магнитного экрана на установившемся режиме с разрядным напряжением 800В и мощностью ~2кВт не превышал 1мА, что практически не сказывалось на тяговых характеристиках модели. Поэтому значительная часть экспериментов с названным соотношением размеров элементов конструкции двигателя была выполнена при указанном соединении магнитного экрана с анодом.

# 2.2.2. Результаты исследования характеристик модели СПД-100П2 при двухступенчатой схеме питания разряда

Помимо приведенных характеристик модели СПД-100П2 с плавающим магнитным экраном осуществлялось определение характеристик модели при реализации двухступенчатой схемы питания разряда, т.е. когда на магнитном экране подавалось некоторое смещение потенциала относительно анода (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Схема питания двухступенчатого разряда в СПД-100П

Следует отметить, что в случае использования промежуточного электрода - магнитного экрана в качестве «катода» первой ступени он не выполняет функции катода в известном понимании этого названия, так как эмиссия с его поверхности затруднена из-за низкой температуры. При небольших отрицательных смещениях потенциала относительно анода он работает как второй анод, т.е. ток  $I_d$  разряда в этом случае делится между промежуточным электродом и анодом. При этом промежуточный электрод перераспределяет потоки электронов между ним и анодом.

При значительном отрицательном смещении промежуточный электрод начинает работать аналогично зонду с отрицательным смещением относительно плазмы и влияет на величину продольного электронного ток, попадающего к аноду из-за уменьшения

взаимодействия электронов с ним. Таким образом, промежуточный электрод в обоих случаях исполняет роль управляющего электрода.

Суммарные затраты мощности в разряде при потенциале экрана, превышающем потенциал плазмы могут быть определены по соотношению:

$$N_{\Sigma} = I_2 U_2 + I_1 (U_1 + U_2) = I_1 U_1 + I_d U_2$$
(2.4)  
где  $I_d = I_1 + I_2$ 

При потенциале экрана, меньшем потенциала плазмы:

$$N_{\Sigma} = I_d (U_1 + U_2) + |I_2| U_1 = I_1 (U_1 + U_2) - |I_2| U_2$$
(2.5)  
rge  $I_d = I_1 - |I_2|$ 

Параметрические испытания модели СПД-100П2 с питанием разряда по приведенной схеме были проведены в диапазоне разрядных напряжений (300-1000)В и при расходах рабочего газа – ксенона 2,0мг/с, 2,25мг/с и 2,5мг/с с тем, чтобы оценить возможности этой модели на режимах с повышенным удельным импульсом тяги при умеренных (не более 2,5кВт) суммарных мощностях потребляемых двигателем.

Напряжения на первой ступени составляли 0, 50В, 100В и 150В. Следует отметить, что нулевое напряжение на первой ступени реально соответствует тому, что анодгазораспределитель и экран образуют единый анод, а схема питания вырождается в одноступенчатую.

Процедура определения интегральных параметров состояла в следующем. При установленном заранее расходе рабочего газа в ускорительном канале и некоторых начальных значениях токов в катушках намагничивания зажигался разряд повышением напряжения на второй ступени. Затем устанавливались требуемые значения напряжения на первой и второй ступенях и оптимизировались токи в катушках намагничивания для получения минимума разрядного тока во второй ступени. При установлении всех параметров двигателя они фиксировались, и изменялось напряжение на второй ступени. При новом значении напряжения на второй ступени определялись оптимальные токи намагничивания и все соответствующие параметры двигателя. После этого изменялось значение напряжения на первой ступени, и снимались вольтамперные и соответствующие тяговые характеристики при новом значении напряжения на первой ступени. В результате получались характеристики модели двигателя при разных расходах рабочего газа через ускорительный канал и разных значениях напряжения на первой ступени, которые приведены на рисунках 2.7(a) - (r).

Вольтамперные характеристики второй ступени, как и при работе в одноступенчатом режиме, являются слабо растущими (см. рисунки 2.7(а)-2.7(б)). При этом при повышенных напряжениях и расходах рабочего газа ток в первой ступени оказывается очень близким к

разрядному току (см. рисунок 2.7(а)), а ток в цепи магнитного экрана оказывается минимальным (см. рисунок 2.7(б)). Это свидетельствует о том, что оба источника напряжения прокачивают близкий поток электронов и работают на ускорение ионов. В то же время при напряжении на второй ступени 400В, а также при напряжениях (700-800В) в случае минимального расхода 2мг/с ток в первой ступени заметно меньше тока во второй ступени, а ток на экран значителен. Последнее означает, что потенциал экрана на этих режимах был выше потенциала плавания в плазме прианодной области разряда.



Рисунок 2.7. (а) - Зависимость тока в первой ступени от напряжения на второй ступени; (б) - Зависимость тока через экран от напряжения на второй ступени; (в) - Зависимость «анодного» тягового КПД, рассчитанного по суммарной мощности разрядов, от напряжения на второй ступени; (г) - Зависимость «анодного» удельного импульса тяги от напряжения на второй ступени

Как видно, модель СПД-100П2 работает по двухступенчатой схеме достаточно эффективно, но при расходах рабочего газа более 2,3мг/с она не обеспечивает заметного преимущества перед одноступенчатой схемой с плавающим экраном. Поскольку с прикладной точки зрения наибольший интерес представляют режимы работы с малыми расходами и повышенными напряжениями, обеспечивающие высокие значения удельного импульса тяги, ниже приведено сравнение характеристик одноступенчатого и двухступенчатого режимов работы для расходов менее 2,3 мг/с (рисунки 2.8 (а)–(г)), при этом в качестве параметра используется «суммарное» напряжение (сумма напряжений на первой и второй ступенях).



Рисунок 2.8. (а) - Зависимость тока во второй ступени от суммарного напряжения; (б) -Зависимость суммарной мощности разряда от суммарного напряжения; (в) -Зависимость «анодного» тягового КПД от суммарного напряжения; (г) - Зависимость «анодного» удельного импульса тяги от суммарного напряжения

Как видно из приведенных данных, при низких разрядных напряжениях одноступенчатая схема с плавающим магнитным экраном позволяет получить более высокие значения тяговой эффективности, а при высоких разрядных напряжениях тяговый КПД двухступенчатой схемы выше тягового КПД одноступенчатой схемы даже при меньших расходах. Это обусловлено тем, что при работе по двухступенчатой схеме при сопоставимых расходах газа меньше разрядный ток и, соответственно, мощность разряда. Поэтому при фиксированной мощности разряда по двухступенчатой схеме можно работать при более высоких разрядных напряжениях и получить более высокий удельный импульс тяги.

Переходя к обсуждению полученных результатов, следует отметить, что согласно полученным данным, при низких разрядных напряжениях и небольших смещениях потенциала магнитного экрана относительно анода, этот потенциал оказывается выше потенциала «плавания» в плазме прианодной зоны. Поэтому он собирает электроны, убирая их из разряда и снижая эффективность ионизации потока рабочего газа в ускорительном канале и тяговую эффективность. При высоких разрядных напряжениях и больших смещениях потенциала магнитного экрана этот потенциал оказывается ниже потенциала «плавания» изолированных поверхностей в плазме прианодной области. Поэтому магнитный экран начинает собирать больше ионов из этой плазмы. Но, из-за выхода с экрана электронов за счет вторичной ионно-электронной эмиссии разряд переходит в режим реального двухступенчатого разряда. И в этом режиме его вклад оказывается положительным по сравнению с режимом «плавания» магнитного экрана. Следовательно, двухступенчатая схема имеет право на жизнь и может быть рекомендована к дальнейшей разработке.

В целом проведенные исследования показали, что при исходной цилиндрической геометрии стенок выходных колец могут быть получены тяговые характеристики модели СПД-100П2, не уступающие характеристикам моделей традиционной схемы, а при переходе к двухступенчатой схеме - превосходящие характеристики модели традиционной схемы на режимах с высокими удельными импульсами тяги и малыми расходами рабочего газа.

# 2.3. Исследование стабильности выходных параметров моделей типа СПД-100П во времени

### 2.3.1. Предварительные испытания модели СПД-100П2

Эрозионные испытания моделей СПД-100П были начаты с вариантом СПД-100П2. Была проведена 50-часовая наработка на режиме работы с разрядным напряжением 850В и расходом порядка 2,15мг/с, обеспечивавшими разрядную мощность порядка 2кВт. При этом через каждые 1-2 часа должно было осуществляться кратковременное выключение двигателя для контроля нуля и коррекции промежуточных значений тяги, что было предусмотрено в программе обработки результатов измерений (рисунок 2.9 (а) – (г)).

По окончании испытаний был осуществлен визуальный осмотр, фотографирование наиболее интересных элементов конструкции и измерение профилей стенок для оценки скорости их износа.

Полученные данные свидетельствуют о том, что можно выделить два периода, во время которых характер работы двигателя существенно отличается, а именно:

60

1. Период стабильной работы модели, который составил 15-20 часов, когда флуктуации его параметров незначительны, а тенденции их изменения аналогичны тенденциям изменения параметров всех СПД. В этот период разрядный ток уменьшается, а флуктуации значений разрядного тока незначительны. При этом тяга, тяговый КПД и удельный импульс тяги незначительно уменьшаются, и их флуктуации также незначительны.

2. Значительные изменения всех параметров начались примерно после 20 часов, а резкие изменения параметров - после 30 часов, когда флуктуации разрядного тока составляли до  $\pm 13\%$ , а колебания тяги - до  $\pm 3$ мН или до  $\pm 4,5\%$ . Соответственно, заметно изменялись во времени и удельные характеристики. Визуальные наблюдения показали, что уже в начале второго периода появились периодические выбросы светящихся частиц из канала модели, и примерно в этот момент времени началось постепенное нарастание разрядного тока. Затем наступило некоторое «затишье» (примерно после 30 часов работы).



Рисунок 2.9 (а) – Изменение разрядного тока модели СПД-100П в процессе контрольной наработки; (б) – Изменение тяги модели СПД-100П в процессе контрольной наработки; (в) – Изменение «анодного» тягового КПД модели СПД-100П в процессе контрольной наработки; (г) – Изменение «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-100П в процессе контрольной наработки;

В этот же период наблюдалось появление свечения части пристеночной области вдоль внутренней поверхности наружной стенки в секторе между «6 и 9 часами», которое постепенно перемещалось против часовой стрелки. К концу испытаний, т.е. после 50 часов работы область свечения сместилась таким образом, что ее середина оказалась в районе 6часовой отметки. При этом тяга и удельный импульс тяги оставались примерно на одном уровне, а мощность и тяговый КПД изменялись примерно в тех же пределах, что и разрядный ток.

В результате осмотра двигателя после его испытаний было обнаружено скопление порошкообразных частиц осаждающегося на внутренние поверхности разрядной камеры (рисунок 2.10(а)) вещества между наружным торцом экрана и выходным кольцом. При этом видно, что в отдельных местах высота упомянутых скоплений такова, что верхние части выступают внутрь канала за пределы контура, ограниченного внутренней поверхностью наружного выходного кольца разрядной камеры. При этом важно отметить, что эти скопления находились не только в нижней части разрядной камеры, но и практически по всей окружности рассматриваемой части разрядной камеры. Это означает, что их образование происходило по всей названной окружности, а накопление их внизу разрядной камеры происходило в результате сползания частиц порошка под действием силы тяжести и, возможно, под действием вращающегося потока дрейфующих электронов.

Самые большие частицы порошка имели размер порядка 1мм (рисунок 2.11(а)), и были слабо связаны с элементами конструкции разрядной камеры. Впоследствии они были легко удалены пылесосом.



Рисунок 2.10 (а) - Модель СПД-100П после 50 часовых испытаний. Выходные керамические кольца сняты; (б) - Фото разряда СПД-100П в конце испытаний на стабильность параметров

Исследование химического состава частиц порошка с помощью электронного микроскопа EFO40 фирмы Карл Цейс с приставкой для рентгеновского микроанализа типа

IMTA показало, что эти частицы состоят в основном из компонент, входящих в состав керамики БГП (рисунок 2.11(б)). Таким образом, рассматриваемые частицы образованы, главным образом, из распыленного материала стенок разрядной камеры.



Рисунок 2.11 (а) - Увеличенное изображение фрагментов пленки; (б) - Спектральный анализ состава фрагмента одной частицы пленки

С учетом изложенного представляется возможным заключить, что отмеченное выше свечение (рисунок 2.10(б)) в пристеночной области разрядной камеры было обусловлено взаимодействием дрейфующих электронов с выступающими в ускорительный канал частями скоплений частиц порошка. Резкое изменение характеристик двигателя в конце испытаний можно объяснить тем, что часть осколков скатилась с боковой поверхности вниз, и выступающая в ускорительный канал часть горки порошка в этот момент стала достаточно большой и сильно выступающей в ускорительный канал, существенно возмущая движение электронов.

К сказанному следует добавить, что структура распыленного вещества, осаждающегося на металлической поверхности, существенно отличается от структуры типичной, достаточно прочной пленки, образующейся на поверхности керамики, а именно: как уже отмечалось, это частицы порошка, слабо связанного с поверхностью подложки. Поэтому, можно было попытаться использовать это обстоятельство для разработки способа «самоочистки» двигателя. В частности, можно облегчить выход частиц порошка в область выходных колец за счет выполнения равных радиальных размеров полости в магнитном экране и радиальных размеров ускорительного канала в выходной его части.

### 2.3.2. Испытания модели СПД-100ПЗ на стабильность параметров

Для проверки идеи «самоочистки» было решено провести аналогичные описанным выше эрозионные испытания модели СПД-100П3 с одинаковыми радиальными размерами

полости в магнитном экране и выходной части ускорительного канала, которая была испытана по «двухступенчатой» схеме. Полученные при этом результаты приведены на рисунках 2.12(а)–(г).



Рисунок 2.12. (а) — Вольтамперные характеристики образца СПД-100П3 до и после испытаний на стабильность параметров при расходе через ускорительный канал 2,2 мг/с; (б) - Зависимость тяги от напряжения на второй ступени; (в) -Зависимость значений «анодного» удельного импульса тяги от напряжения на второй ступени; (г) - Зависимость «анодного» тягового КПД от напряжения на второй ступени

Модель СПД-100ПЗ обладала до проведения эрозионных испытаний достаточно высоким для пониженных расходов рабочего газа уровнем тяговых характеристик и обеспечивала получение «анодного» удельного импульса тяги более 30км/с при расходе через ускорительный канал 2,2мг/с, напряжениях на первой ступени 50В и на второй ступени - 750В. При этом в исходном состоянии модели разрядная мощность была менее 2кВт. С учетом того, что при выбранном напряжении на первой ступени ток через экран был мал, в качестве разрядного напряжения в случае СПД-100ПЗ на приведенных рисунках использовалось значение суммы напряжений на первой и второй ступенях. Эрозионные испытания проводились по укороченной схеме и длились 50 часов. Для проверки

стабильности характеристик модели за время продолжительной наработки до и после испытаний определялись вольтамперные характеристики модели (рисунки 2.12(а)- (г)).

В процессе испытаний было обнаружено, что не удалось полностью избавиться от загрязнения ускорительного канала, ибо в отдельных местах, как и ранее, наблюдаются эффекты взаимодействия электронов с азимутальными неоднородностями, очевидно, возникшими из-за образования локальных скоплений порошка осажденного материала

Таким образом, проведение контрольных испытаний двух вариантов высоковольтных моделей СПД-100П показало, что разрядный ток модели СПД-100ПЗ изменяется в меньших пределах по сравнению с изменением разрядного тока в образце СПД-100П2, что, естественно, сказывается на мощности разряда и тяговом КПД. Одновременно с этим, тяговые характеристики модели СПД-100П2 оказались более стабильными. Второй пункт, в-первую очередь, касается тяги и удельного импульса тяги, в то время как тяговый КПД у модели СПД-100П2 уменьшался скачкообразно, а у СПД-100П3 происходило постепенное снижение без значительных скачков (рисунки 2.13(а) – (г)).



Рисунок 2.13 (а) — Сравнение изменения разрядного тока моделей СПД-100П2 и СПД-100П3 в процессе испытаний на стабильность параметров; (б) — Сравнение изменения тяги моделей СПД-100П2 и СПД-100П3; (в) — Сравнение изменения удельного импульса тяги моделей СПД-100П2 и СПД-100П3; (г) — Сравнение изменения тягового КПД моделей СПД-100П2 и СПД-100П2 и СПД-100П3

Осмотр двигателя после его испытаний показал, что в отдельных местах по азимуту остались относительно небольшие скопления частиц порошка, хотя в целом объем «горок» порошка был явно меньше, чем после 50-часовых испытаний модели СПД-100П2. Это позволило заключить, что определенный эффект «выметания» частиц порошка разрядом достигнут, но он не устранен полностью. Поэтому необходимы и другие меры снижения влияния осаждения распыленного материала на стенки разрядной камеры.

## 2.4. Результаты оценки времени износа выходных элементов модели СПД-100П с использованием поэтапной методики

Как было отмечено в главе 1, одной из проблем при работе на высоковольтных режимах может стать проблема обеспечения длительного ресурса двигателя, связанная с увеличением скорости распыления стенок разрядной камеры. Поскольку разработанная схема двигателя представляет практический интерес, для более полной ее оценки представлялось необходимым провести эрозионные испытания модели СПД-100П с целью получения данных о скоростях износа наиболее нагруженных ее элементов, которыми являются выходные кольца, и оценки достижимого ресурса такой модели с использованием разработанной в МАИ поэтапной методики [52]. Эта методика предполагает проведение эрозионных испытаний и расчетного моделирования износа с использованием профилей стенок разрядной камеры, получающихся в результате испытаний. Краткое ее описание будет приведено в следующем разделе.

### 2.4.1. Методика ускоренной оценки времени износа выходных элементов ускорительного канала

Основным положением при анализе износа диэлектрических стенок ускорительного канала является то, что износ определяется ионной бомбардировкой стенок канала аналогично катодному распылению. Поэтому локальная скорость перемещения поверхности стенки из-за удаления с нее распыленного материала может быть записана следующим образом:

$$\dot{\xi} = j_{iw} S_V(\alpha, \varepsilon_i) \tag{2.6}$$

где  $j_{iw}$ ,  $S_V(\alpha, \varepsilon_i)$  – соответственно плотность ионного тока на поверхность и коэффициент объемного распыления материала при угле падения ионов на поверхность  $\alpha$  и энергии ионов  $\varepsilon_i$ . [81, 82].

Обычно коэффициент распыления определить через названные параметры достаточно сложно, поэтому его часто выражают через  $S_V(0,\varepsilon_i)$  – зависимость коэффициента ионного распыления от энергии ионов при нормальном падении на поверхность и зависимость  $\overline{S_V}(\alpha,\varepsilon_i)$  относительного коэффициента распыления от угла падения при фиксированной энергии ионов. Таким образом, при фиксированной энергии ионов можно записать [82]:

$$S_{V}(\alpha,\varepsilon_{i}) = S_{V}(0,\varepsilon_{i}) \cdot \overline{S_{V}}(\alpha,\varepsilon_{i})$$
(2.7)

При этом изменение энергии ионов в ограниченном диапазоне и нормальном падении на поверхность может быть аппроксимирована линейной функцией  $S_V(0,\varepsilon_i) \approx k_S \varepsilon_i$ , где  $k_S \approx const$  – числовой коэффициент. При таких условиях уравнение (2.6) можно записать

$$\dot{\xi} = k_S \overline{S}(\alpha) j_{iw} \varepsilon_i = k_S e \overline{S}(\alpha) \frac{j_{iw}}{e} \varepsilon_i = k_S \overline{S}(\alpha) Q$$
(2.8)

где Q – распыляющая способность ионного потока, попадающего на стенку [1].

Таким образом, при наличии информации о распыляющей способности ионного потока на поверхности стенки и исходных данных о характеристиках распыления материала стенки возможно моделирование ее износа во времени. Помимо выше перечисленного при моделировании износа в НИИ ПМЭ МАИ делаются следующие допущения:

- принимается «лучевая» структура ионного потока в ускорительном канале, по которой ионы истекают из области с максимальной интенсивностью ионизации и, если рассмотреть продольный разрез ускорительного канала, то данную область можно трактовать как точку, центр из которой истекает поток ионов [83];

 также предполагается, что ионы не имеют азимутальной компоненты скорости и двигаются прямолинейно вдоль лучей, исходящих из названного центра, что позволяет описать пространственную структуру ионного потока, а также рассчитать вектор плотности тока в любой точке текущей поверхности стенки, получающейся при длительной работе двигателя;

- энергия ионов зависит от продольной координаты точек на текущих профилях стенок,
 и зависимость ее от этой координаты задается с учетом результатов измерения продольного
 распределения потенциала плазмы в ускорительном канале;

 для перемещения поверхности стенки численно решается уравнение (2.8) с учетом того, какие текущие значения углов падения и энергии ионов получаются на текущей поверхности;

 при моделировании необходимо учитывается изменение структуры ионного потока при уширении выходной части ускорительного канала путем изменения положения центра, из которого истекают ионы. В качестве исходных данных для моделирования используются: геометрия задачи, положение центра и параметры ионного потока на исходной поверхности стенки, закон изменения энергии ионов в процессе их перемещения к текущей поверхности, свойства материала (зависимость коэффициента распыления от энергии и угла падения).

Данная методика была апробирована с использованием результатов ресурсных испытаний двигателя СПД-100, для которого имеется большой набор экспериментальных данных по профилям стенок при различных наработках двигателя. Затем в НИИ ПМЭ МАИ на основе показанной выше модели было разработано программное обеспечение VKS 1.0 [52].

Согласно упомянутой методике реализуются один или несколько этапов, включающих в себя проведение эрозионного испытания, измерение профилей стенок после испытания, позволяющих восстановить или уточнить распыляющую способность потока, расчет с использованием полученной распыляющей способности потока дальнейшего износа стенок за период времени, значительно превышающий время испытаний, доведение профилей стенок до расчетных механической обработкой, приработку профилей после механической обработки путем работы двигателя и определение профилей стенок после приработки. Вторые и последующие профили стенок позволяют скорректировать распыляющую способность ионного потока таким образом, чтобы расчетные профили лучше соответствовали полученным в результате испытаний на обоих этапах. За счет этого удается повысить точность прогнозирования износа.

### 2.4.2. Результаты оценки времени износа выходных элементов модели СПД-100П с использованием поэтапной методики

В данной работе оценка износа стенок разрядной камеры была реализована следующим образом. Был проведен первый этап испытаний модели СПД-100П2 на режиме работы с разрядным напряжением 800В и мощностью (2,0-2,1) кВт с длительностью 36 часов. По окончании первого этапа испытаний были проведены измерения профилей обращенных к разряду поверхностей выходных колец. Они показали, что износ стенок на большей части зоны эрозии достаточен для измерений с точностью 0,1мм (рисунок 2.14(а)). Эти данные были использованы в качестве исходных для расчета эрозии стенок по описанной выше методике, и был определен момент времени, когда поворот профилей стенок из-за их неравномерного по длине износа произойдет примерно на 30 градусов (рисунок 2.15(а)). Это время составило около 100 часов. Далее было осуществлено механическое доведение профилей стенок до расчетных при наработке 100 часов и реализовано 2 подэтапа

приработки: длительностью 28 часов и 38 часов. После каждой приработки осуществлялось измерение профилей стенок. Результаты измерений после 2-ой приработки показали, что профили стенок качественно не изменились по сравнению с профилями после 1-ой приработки (рисунок 2.14(б)). Поэтому профили стенок после 1-го этапа испытаний и после 2-ой приработки были использованы для дальнейшего расчета износа стенок.

Полученные результаты показали, что выход границ износа на полюса магнитной системы произойдет примерно через 5000-10000 часов (рисунок 2.15(б)).



Рисунок 2.14.(а) — Профили стенок разрядной камеры после первого этапа испытаний; (б) - Профили стенок разрядной камеры после второго этапа испытаний (28 и 38 часов соответственно)

Следует обратить внимание на то, что согласно результатам моделирования достаточно значительное уширение ускорительного канала, например на 30 градусов на сторону, должно происходить через (100-200) часов тогда, как последующее уширение на угол порядка 45 градусов ожидается через (1000-2000) часов. Это подтверждается и результатами ресурсных испытаний (см., например, результаты испытаний двигателя СПД-100 – [53]). Поэтому предварительное уширение ускорительного канала не приведет к значительному уменьшению ресурса двигателя.

Важно также то, что в результате оптимизации модели СПД-100П удалось при сопоставимых наработках уменьшить протяженность зон эрозии до ~(7-8) мм на наружной и до ~10мм на внутренней стенке, что примерно в 1,5 раза меньше, чем было в модели типа СПД-100В на высоковольтных режимах работы (см. рисунок 1.6). Таким образом, приведенные результаты подтвердили возможность некоторого повышения тяговой эффективности и уменьшения протяженности зон эрозии на стенках разрядной камеры за счет перехода к схеме с магнитным экраном внутри разрядной камеры, т.е. создать предпосылки для обеспечения достаточно большого ресурса моделей типа СПД-100П.





Проведенные испытания кроме данных о скорости эрозии и профилях стенок разрядной камеры при разных наработках позволили убедиться также в том, то при уширении ускорительного канала уменьшается поток распыленного со стенок вещества внутрь этого канала и за счет этого уменьшаются отрицательные проявления осаждения этого вещества. Кроме того, подтверждено, что при выбранных параметрах рабочего режима уширение канала приводит к снижению тяговых характеристик из-за снижения концентрации плазмы и соответствующего снижения вероятности ионизации атомов, наблюдавшееся и в других работах (см., например, доклад из НИИТП на [84]). Следует отметить, что при больших уширениях ускорительного канала тяговые характеристики могут восстановиться, как это произошло в процессе ресурсных испытаний двигателя СПД-100. Объяснить это можно тем, что при большом уширении ускорительного канала снижается интенсивность взаимодействия электронов со стенками и повышается их температура аналогично тому, что имеет место в ДАС. Соответственно, повышается ионизирующая способность электронов и вероятность ионизации атомов в канале

восстанавливаются. Поэтому, естественно, возникает идея создания двигателей исследуемой в данной работе схемы с достаточно большим предварительным уширением канала и с тяговыми характеристиками, близкими к получаемым при цилиндрической геометрии стенок, в которой подавлено отрицательное влияние осаждения распыленного с выходных колец вещества внутри разрядной камеры. Такое решение отрабатывается в настоящее время в США и в центре имени М.В. Келдыша, а также реализовано в конструкциях моделей СПД типа ПлаС, разрабатываемых в ОКБ «Факел» (см. рисунок 1.9(б)). При этом значительное предварительное уширение ускорительного канала означает потерю определенной части ресурса двигателя, но, как уже отмечалось ранее, в силу быстрого снижения скорости износа по мере уширения ускорительного канала эти потери оказываются незначительными.

Проверке возможности практической реализации этой идеи были посвящены дальнейшие исследования. Полученные при этом результаты изложены в следующей главе.

## 2.5. Результаты разработки и испытаний модели СПД-85П

Разработка лабораторной модели СПД-85П осуществлялась по заказу АО «Информационные спутниковые системы» (АО «ИСС») на разработку высокоимпульсного двигателя блока коррекции БК - 2000 для КА, разрабатываемых эти предприятием. С учетом технического задания АО «ИСС» 790. ТЗ 980-2600-12 «Разработка и лабораторноотработочные испытания инженерной модели блока коррекции на базе высокоимпульсного плазменного двигателя» для ОКБ «Факел» в НИИПМЭ МАИ были осуществлены разработка, изготовление и испытания лабораторной модели СПД-85П мощностью 2,1 кВт с целью проверки возможности обеспечения «сдаточного» удельного импульса тяги 28км/с и среднего за ресурс значения удельного импульса тяги 27км/с. В процессе реализации этой разработки решались следующие задачи:

- выбор схемы и основных размеров лабораторной модели СПД-85П, которые могут обеспечить значения удельного импульса тяги на начальном этапе испытаний (эксплуатации) не менее 28км/с при разрядном напряжении (800-810)В и массе модели не более 4 кг;

 изготовление и испытания разработанной модели с целью проверки достижимости требуемых значений удельного импульса тяги, стабильности параметров двигателя не менее 20-ти часов, а также приемлемого для обеспечения большого ресурса теплового режима элементов конструкции двигателя; - определение ресурсных характеристик модели с целью обоснования возможности обеспечения достаточно большого ресурса двигателя БК, если он будет разрабатываться на основе модели СПД-85П.

Несмотря на то, что при разработке модели СПД-85П решались чисто прикладные задачи, отдельные из полученных результатов представляют определенный интерес и для решения рассматриваемых в данной диссертации проблем. Поэтому ниже упомянутые результаты будут рассмотрены более подробно.

### 2.5.1. Описание конструкции лабораторной модели СПД-85П

Основной проблемой при разработке двигателя БК-2000 являлось обеспечение требуемого удельного импульса тяги, так как двигатель СПД-100Д разработки ОКБ «Факел», а также лабораторные модели масштаба СПД-100П, разрабатывавшиеся в НИИ ПМЭ МАИ, позволяли получать начальное (сдаточное) значение удельного импульса тяги не выше 27,5км/с. Таким образом, при разработке СПД-85П необходимо было обеспечить повышение удельного импульса тяги на (500-1000м/с). Кроме того, масса двигателя СПД-100Д составляет более 5 кг, а для БК-2000 целесообразно снизить ее. С учетом этого в ТЗ на разработку модели СПД-85П было определено, что масса ее не должна превышать 4кг.

Анализ возможных путей повышения удельного импульса тяги показал, что наиболее надежным среди них является повышение плотности потока рабочего вещества в ускорительном канале за счет уменьшения масштаба модели. Дело в том, что физической причиной, ограничивающей возможность повышения тяговой эффективности и удельного импульса тяги двигателей масштаба СПД-100 при ограничении мощности разряда уровнем (2,0-2,1)кВт на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги является необходимость снижения расхода рабочего газа через ускорительный канал, приводящего к снижению эффективности переработки потока газа в ионы, т.е. к снижению коэффициента использования рабочего газа в названном канале. Кроме того, как показали исследования, выполненные ранее в НИИ ПМЭ МАИ, уменьшение расхода приводит к расширению СИУ в направлении анода.

Уменьшение масштаба модели должно приводить при прочих равных условиях к увеличению плотности расхода рабочего газа и концентрации плазмы в ускорительном канале, уменьшению длины свободного пробега атомов до их ионизации  $\lambda_i = V_a/\langle \sigma_i V_e \rangle n$ , где  $V_a, \langle \sigma_i V_e \rangle, n$  соответственно, скорость атомов, коэффициент скорости ионизации, усредненный по функции распределения электронов по скоростям и концентрация плазмы. Поэтому оно должно приводить к повышению коэффициента использования рабочего газа в
нем, и, соответственно, к увеличению тяговой эффективности и удельного импульса тяги двигателя.

Возможность увеличения удельного импульса тяги таким путем была проверена в НИИ ПМЭ МАИ путем увеличения плотности расхода и мощности разряда в лабораторной модели двигателя типа СПД-100П. Так, увеличение мощности разряда в этой модели за счет увеличения расхода рабочего газа с 2,0 до 2,5кВт при разрядном напряжении 800В позволило получить увеличение удельного импульса тяги на (500-700м/с). С учетом изложенного было решено уменьшить наружный диаметр разрядной камеры до (80-85)мм.

Как уже отмечалось, при разработке модели СПД-85П было решено использовать результаты оптимизации параметров конструкции модели СПД-100П. Поэтому в этой модели была выбрана ширина канала 14,5мм, апробированная в лабораторной модели СПД-100П и близкая к ширине канала в двигателях типа СПД-100 и СПД-100Д. При этом площадь поперечного сечения ускорительного канала возрастает не меньше, чем на (15-20)% по сравнению с плотностью в ускорительном канале двигателя СПД-100П. Таким образом, ожидаемый эффект должен был быть заметным. Кроме того, за основу была принята схема двигателя с магнитным экраном, размещенным внутри ускорительного канала, также апробированная в лабораторной модели типа СПД-100П. Эта апробация показала, что, кроме отмеченных ранее изменений, при упомянутой схеме двигателя более экономно используется пространство внутри контура, ограниченного наружным диаметром разрядной камеры, и упрощается решение проблемы размещения центрального сердечника и необходимого числа витков на центральной катушке намагничивания. Это заключение было проверено путем моделирования магнитной системы с помощью программы FEMM (некоторые результаты упомянутого моделирования будут приведены позже). Более того, соотношения размеров элементов магнитной системы, отработанные в модели СПД-100П, были перенесены в модель СПД-85П. Также, для проверки приведенных рассуждений была изготовлены и испытаны лабораторные модели СПД с наружным диаметром ускорительного канала 80мм и 82мм с магнитной системой упомянутого типа, которые в целом подтвердили ожидания, но показали, что целесообразно несколько увеличить число витков во внутренней катушке намагничивания.

С учетом всего изложенного было решено выбрать в окончательном варианте наружный диаметр ускорительного канала равным 85мм. В результате разработана конструкция модели СПД-85П. Краткое описание конструкции лабораторной модели СПД-85П приведено ниже.

Лабораторная модель СПД-85П имеет конструктивную схему, представленную на рисунке 2.16(а). Особенностями этой схемы, как и схемы модели СПД-100П, являются:

- размещение магнитного экрана внутри разрядной камеры и выполнение его из железокобальтового сплава 49КФ (пермендюр), чтобы исключить возможное негативное влияние перегрева экрана на магнитное поле и характеристики модели;

- выполнение выходного кольца 7 и выходного диска 6 разрядной камеры из керамики типа БГП-Д.

В остальном конструкция лабораторной модели имеет традиционные для СПД черты (4 наружных катушки намагничивания, анод с козырьками для защиты выходных отверстий для поступления рабочего газа в разрядную камеру от напыления распыленными со стенок разрядной камеры и со стенок вакуумной камеры материалами, газоэлектрическую развязку 15, разработанную в ОКБ «Факел»).

Результаты моделирования магнитного поля с помощью названной выше программы FEMM показали, что при токах в катушках намагничивания 3A должно получаться достаточно большое максимальное значение индукции магнитного поля на срединной поверхности ускорительного канала ~30мTл (рисунок 2.16(б)).



1 – анод – газораспределитель; 2 - центральный сердечник магнитной системы; 3 - сердечники наружных катушек намагничивания; 4 – защитная сетка; 5 – корпус разрядной камеры; 6, 7 – выходные кольца разрядной камеры; 8 – магнитный экран; 9 – наружный магнитный полюс; 10 – фланец магнитной системы
Рисунок 2.16 (а) – Конструктивная схема модели СПД-85П; (б) - Картина силовых линий магнитного поля в модели СПД-85П при токах в катушках намагничивания ЗА

По опыту работы с моделью типа СПД-100П с аналогичной схемой магнитной системы и близким по величине зазорами между элементами магнитной системы названного значения индукции должно быть достаточно для работы с разрядным напряжением 800В.

Следует также отметить, что при выбранном оптимальном соотношении размеров элементов магнитной системы, подобранном по опыту работы с моделью типа СПД-100П, реализуются следующие особенности:

1. В части ускорительного канала можно получить достаточно четкую фокусирующую геометрию силовых линий магнитного поля и достаточно заметное вынесение области с максимальной индукцией за выходную плоскость наружного полюса магнитной системы. Дальнейшее вынесение названной области с максимальной индукцией может быть достигнуто перемещением магнитного экрана к плоскости полюсов, но при этом значительно возрастают потоки через магнитный экран и требуемые Ампер-витки в катушках намагничивания, а также несколько снижается тяговая эффективность двигателя.

2. Достаточно четко определяется положение анодной границы ускоряющего слоя, так как внутри магнитного экрана отчетливо разделяются зоны с линиями, направленными к аноду, которые должны выравнивать потенциал в этой области, и зона с квазирадиальным магнитным полем. Поэтому анодная граница СИУ должна быть локализована в области, где начинается область канала с конфигурацией силовых линий магнитного поля, близкой к радиальной.

При одинаковых токах в катушках намагничивания можно было ожидать также, что анодная граница СИУ у внутренней стенки и, соответственно, зона эрозии на внутренней стенке ускорительного канала будут расположены ближе к аноду, чем у наружной стенки (рисунок 2.16(б)). Кроме того, результаты моделирования позволяют выбрать протяженность выходных элементов разрядной камеры, исходя из того, что диэлектрические поверхности должны перекрывать области, в которых возможно значительное падение потенциала. С учетом изложенного были выбраны продольные размеры выходных элементов разрядной камеры, а также их продольное положение, обеспечивающее перекрытие пристеночных зон с квазирадиальной направленностью силовых линий магнитного поля в пределах прианодной части распределения магнитного поля вплоть до сечения с максимальными значениями индукции магнитного поля.

Наружный полюс и фланец магнитной системы выполнены без срезов для увеличения площади теплосброса с них, так как плотность мощности разряда в лабораторной модели СПД-85П выше, чем в моделях масштаба СПД-100. Как уже отмечалось, наружный диаметр выходной части разрядной камеры составляет 85мм. При ширине канала 14,5мм внутренний его диаметр получился равным 56мм. Таким образом, площадь поперечного сечения ускорительного канала составила 32см<sup>2</sup>, что примерно в 1,25 раз меньше, чем в СПД-100Д. Следовательно, плотность мощности при одинаковой мощности разряда возрастает в модели СПД-85П примерно на 25%. Облегчает ситуацию то, что за счет возрастания плотности

расхода ожидалось увеличение примерно на 5% тягового КПД модели. Кроме того, оценки и измерения температуры элементов магнитной системы, наиболее чувствительной к перегреву, показали, что эти температуры можно удержать на приемлемом уровне. Результаты этих измерений будут приведены позже.

Масса модели СПД-85П без учета массы подводящих проводов составила при выбранных ее размерах ~3,5кг. Подобная масса модели обеспечивала возможность разработки на ее основе двигателя БК-2000 с массой ~4кг, поскольку масса двух катодов с кронштейном их крепления может составить (300-400)г., а тепловые экраны, обычно применяемые в летных конструкциях СПД, и прочие вспомогательные элементы конструкции имеют небольшую массу.

## 2.5.2. Результаты испытаний модели СПД-85П в НИИ ПМЭ МАИ и ОКБ «Факел»

Описанная модель СПД-85П прошла несколько циклов доводочных испытаний в НИИ ПМЭ МАИ и ОКБ «Факел», в процессе которых осуществлялись устранение недостатков ее изготовления и оптимизация геометрии выходной части разрядной камеры, а также положения магнитного экрана. Испытания на первом этапе проводились с катодом типа КЭ-5 ОКБ «Факел», работавшим с расходом 0,45мг/с, а затем с катодом КНД, также разработанным в ОКБ «Факел» и работавшим с расходами ксенона от 0,2 до 0,4мг/с.

При малых расходах ксенона через ускорительный канал наблюдалось затрудненное зажигание разряда при «плавающем» магнитном экране. Поэтому магнитный экран в модели СПД-85П соединялся с анодом либо напрямую, либо через сопротивление порядка 20кОм в соответствии с полученными ранее результатами исследования моделей типа СПД-100П.

Электропитание основного разряда осуществлялось от стендовых источников питания, при этом в разрядную цепь был включен фильтр стандартной схемы с емкостью 6мкФ, шунтирующей промежуток анод-катод, и индуктивностью в анодной цепи ~0,15мГн, зашунтированной сопротивлением 100Ом.

Испытания включали в себя:

- снятие вольтамперных характеристик на режимах работы с расходами 2,0мг/с-3,0мг/с в диапазоне разрядного напряжения (300-900)В, проверка достижимости требуемых выходных параметров модели и предварительный выбор рабочего режима лабораторной модели СПД-85П (рисунки 2.17(а) – (б));

- контрольные испытания длительностью 20-50 часов с целью уточнения выбора режима для длительной работы лабораторной модели СПД-85П и проверки стабильности начальных («сдаточных») параметров модели;

Вольтамперные характеристики мало отличались от вольтамперных характеристик модели СПД-100П с тем лишь исключением, что тяга и удельный импульс тяги модели СПД-85П в результате перехода на уменьшенный размер модели, как и ожидалось, получились выше, чем у моделей СПД-100П.



Рисунок 2.17. (а) - Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-85 от разрядного напряжения; (б) - Зависимость «анодного» тягового КПД модели СПД-85П от разрядного напряжения

После параметрических испытаний модели в НИИ ПМЭ МАИ, подтвердивших возможность разработки двигателя для блока коррекции БК-2000 на основе СПД-85П, была передана в ОКБ «Факел» для прохождения контрольных параметрических, а затем и ресурсных испытаний.

В процессе упомянутых доводочных испытаний было установлено следующее:

- уширение ускорительного канал на угол до 45 градусов на сторону при постоянном расходе ксенона через ускорительный канал приводит к снижению тяги, тягового КПД и удельного импульса тяги примерно в тех же пределах, что было получено для модели СПД-100П и снижению устойчивости рабочих процессов, проявляющееся в том, что после работы в течение (40-50) часов разряд в двигателе теряет азимутальную симметрию, что приводит к резкому снижению тяговых характеристик и перегреву отдельных секторов выходных элементов разрядной камеры;

 влияние уширения ускорительного канала из-за износа стенок выходных элементов на устойчивость рабочих процессов может быть объяснено расширением СИУ в направлении анода, приводящим к попаданию части этого слоя в области с малой радиальной составляющей магнитного поля и азимутальной неравномерностью характеристик магнитного поля;

- устойчивость рабочих процессов может быть повышена за счет обеспечения более высокой азимутальной равномерности характеристик магнитного поля и профилированием

стенок выходных элементов разрядной камеры, которое обеспечивает наличие значительной радиальной составляющей магнитного поля в зоне ускорения;

- влияние осаждения распыленного с выходных элементов материала на стенках разрядной камеры на стабильность характеристик двигателя может быть снижено защитой прианодной части стенок разрядной камеры козырьками - экранами из того же материала, что и материал выходных элементов.

В результате выполненных доработок тяговые характеристики модели удовлетворяли сдаточным требованиям, а именно: удельный импульс тяги составлял не менее 28км/с при мощности разряда 2,1кВт и разрядном напряжении 810В. Тяговые параметры в течение контрольных испытаний длительностью 50 часов сохранялись в пределах требуемых значений.

#### 2.5.3. Результаты испытаний модели СПД-85П в ОКБ «Факел»

Испытания модели СПД-85П в ОКБ «Факел» были проведены на стенде 71-1-84 [85]. Этот стенд оборудован тремя криогенными вакуумными насосами: один с проходным сечением 1200 мм, и два насоса с проходным сечением 900 мм.

Суммарная производительность вакуумных насосов позволяет при номинальных значениях расхода в двигатель создавать в вакуумной камере давление в диапазоне от 3,4 до 5,0 E-05 мм рт. ст. (калибровка по воздуху) в зависимости от места расположения датчиков давления относительно работающего двигателя.

Основные геометрические размеры камеры и схема расположения двигателя в ней показаны на рисунке (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Схема стенда 71-1-84

Перед началом испытаний и в процессе их проведения выполнялись (в случае необходимости) калибровки систем измерения тяги и расхода.

При обработке результатов измерений тяги учитывались поправки на тепловой дрейф «нуля» ТИУ и результаты контрольных тарировок ТИУ.

В ОКБ «Факел» были проведены 2 цикла параметрических и контрольных испытаний длительностью до 50 часов, после которых осуществлялась доработка модели. Затем были проведены ресурсные испытания, которые включали в себя снятие вольтамперной характеристики, проверку влияния давления в вакуумной камере на параметры двигателя, проверку параметров двигателя в заданном диапазоне токов и напряжений разряда и снятие магнитной характеристики (проверку устойчивости режима работы двигателя при изменении тока в магнитных катушках) [85]. Ниже приведены наиболее интересные результаты этих испытаний.

Следует отметить, что в процессе ресурсных испытаний для проверки влияния различных факторов на работу и характеристики модели 2 раза осуществлялись «очистки» разрядной камеры. В процессе первой очистки были удалены мягкой кистью легко удаляемые фрагменты осажденного на поверхностях стенок материала. В процессе второй тонкой шкуркой были удалены фрагменты отслаивающейся пленки осажденного материала на поверхности выходных элементов, более прочно связанные с поверхностью.

Снятие вольтамперной характеристики (ВАХ) выполнялось при анодном расходе 2,5мг/с в начале ресурсной наработки и после 98 часовой наработки. Давление в вакуумной камере при этих испытаниях составляло от 3,4 до 3,5•10<sup>-5</sup>мм рт. ст.

При снятии ВАХ в начале ресурсной наработки при каждом значении напряжения разряда выполнялась оптимизация токов в магнитных катушках (по минимуму разрядного тока). При повторном снятии ВАХ оптимизация токов не производилась, а значения токов устанавливались такими же, как и при первых испытаниях. Результаты параметрических испытаний модели испытаний представлены на рисунках 2.19(а) – (б).

Также в ходе параметрических испытаний определялась и «магнитные» характеристики для проверки устойчивости режима работы двигателя к изменению тока в магнитных катушках.

При определении магнитной характеристики наибольший диапазон изменения токов в катушках составлял - 25% до + 15% относительно их номинальных значений. При снятии магнитной характеристики токи в катушках изменялись пропорционально, т.е. соотношение токов в катушках оставалось неизменным. Исходный режим разряда двигателя – номинальный (2,6A/810B).



Рисунок 2.19 (а) - Вольтамперные характеристики модели СПД-85П, снятые в ходе испытаний в ОКБ «Факел»; (б) - Зависимости удельного импульса тяги модели СПД-85П. Серия 1 — результаты испытаний, полученные непосредственно при первых включениях двигателя. Серия 2 — результаты испытаний, полученные после очистки разрядной камеры от порошка распыленного материала

Результаты испытаний по определению магнитной характеристики в различные периоды ресурса приведены на рисунке 2.20 (а)–(б). Зависимость параметров показана относительно тока в центральной катушке.



Рисунок 2.20 (а) — Изменение тяги модели СПД-85П при определении магнитной характеристики в ходе ресурсных испытаний; (б) - Изменение полного удельного импульса тяги модели СПД-85П при определении магнитной характеристики

Как можно видеть из представленных на рисунке результатов испытаний, по мере увеличения наработки изменяется характер зависимости тяги и удельного импульса тяги от магнитного поля. Если в начальный момент времени наблюдался довольно четкий экстремум тяги - максимум при токе во внутренней катушке 2,5А, то при наработке ~ 100 часов и выполнения очистки изоляторов разрядной камеры четкого пика не наблюдается, а тяга монотонно увеличивается по мере увеличения тока в катушках.

По результатам определения магнитной характеристики после наработки ~ 100 часов были изменены номинальные значения токов в магнитных катушках: во внутренней катушке

с 2,5А на 2,8А, а в наружной – с 2,8 до 3,1А. Эти значения токов в оставались неизменными в течение всего последующего времени ресурсной наработки.

В целом отмеченные результаты указывают на зависимость параметров двигателя от степени его «загрязнения» и уширения разрядной камеры в процессе ресурсных испытаний в стендовых условиях.

Общие результаты ресурсных испытаний и приведены на рисунках 2.21 (а)-(б).



Рисунок 2.21 (а) — Зависимость тяги в ходе ресурсных испытаний модели СПД-85П от времени; (б) - Зависимость удельного импульса тяги в ходе ресурсных испытаний модели СПД-85П от времени

Вертикальными линиями на рисунке, иллюстрирующем зависимость тяги от времени работы, показаны также моменты остановок испытаний на очистку изолятора разрядной камеры.

Как видно из приведенных рисунков «мягкая» очистка устранила лишь резкие отклонения тяги от средних ее значений, но не устранила общее снижение уровня тяги и удельного импульса тяги. Поэтому после наработки 270 часов была осуществлена более

жесткая ручная очистка стенок разрядной камеры вблизи зоны эрозии с использованием абразивной бумаги. Следует отметить, что такая очистка дала временный эффект повышения тяги в течение примерно 30 часов (см. рисунок 2.21 (а)). Затем зависимости тяги и удельного импульса тяги вернулись на «генеральную» зависимость, определяемую загрязнением стенок и изменением их геометрии. С учетом того, что очистки разрядной камеры не давали кардинального изменения хода временных зависимости параметров двигателя, можно заключить, что отмеченная «генеральная» зависимость отражала, главным образом, влияние уширения канала по мере работы двигателя. Таким образом, одной из ключевых проблем создания достаточно эффективных высокоимпульсных двигателей является разработка способов снижения значимости этого влияния.

После наработки двигателем ~ 530 часов испытания были приостановлены, а вакуумная камера стенда была вскрыта для выполнения очередной операции очистки.

При внешнем осмотре двигателя после вскрытия вакуумной камеры было обнаружено, что произошло разрушение внутреннего выходного элемента камеры (керамического кольца) (рисунок 2.22 (а)–(б)).



Рисунок 2.22 (а) — Общий вид двигателя после выключения; (б) — Вид на «щель» внутреннего выходного элемента

На поверхности зоны эрозии выходного элемента образовалась "щель", через которую был виден внутренний магнитный экран. Наибольшая ширина "щели" - в месте локального перегрева разрядной камеры. Кроме того, произошло разрушение винта крепления внутреннего выходного элемента к внутреннему магнитному полюсу, что привело к отделению выходного элемента от остальной конструкции модели. Выходной элемент окончательно разделился на две части: кольцевую, закрывавшую внутренний магнитный экран и торцевую, прикрывавшую внутренний магнитный полюс. С учетом отмеченного было решено остановить ресурсные испытания модели СПД-85П.

К изложенным результатам следует добавить, что для определения скорости эрозии выходных частей разрядной камеры были выполнены измерения зон эрозии на начало испытаний, через ~ 98 часов и на момент их окончания.

Ширина эрозии в начальный момент испытаний составляла: для внутренней стенки - 8,6...8,8 мм, для наружной стенки – 5,2...5,3 мм. Сравнение вида зон эрозии при наработке двигателем ~98 часов и на момент ~440 часов, показывает, что произошло расширение зоны эрозии в направлении анода. Это расширение, как и в модели СПД-100П, объясняется уширением ускорительного канала.

Результаты измерений профиля эрозии в нескольких сечениях на наружной и внутренней стенках разрядной камеры на момент окончания испытаний приведены на соответствующих рисунках 2.23 (а)-(б). На этих же рисунках приведены профили эрозии, определенные при измерениях перед началом испытаний и на момент времени наработки ~ 98 часов.



Рисунок 2.23 (а) - Профиль эрозии наружной стенки; (б) - Профиль эрозии внутренней стенки

Для оценки скорости эрозии выходных элементов разрядной камеры могут быть использованы результаты измерений размеров на глубине 1,5 мм от среза разрядной камеры. Этот выбор обусловлен тем, что выходная часть наружного выходного элемента в исходном состоянии была проточена на конус.

За первые ~ 98 часов скорость эрозии на глубине 1,5 мм от среза за указанный период времени для наружной стенки составила ~ 0,008 мм/час, а для внутренней ~ 0,025 мм/час. За последующие ~ 440 часов работы она составила: для наружной стенки составляет~ 0,0045 мм/час, а для внутренней ~ 0,0064 мм/час. Сравнение скоростей эрозии за первые ~ 98 часов ресурсной наработки со скоростями эрозии за последующие ~ 440 часов испытаний показывает существенное их замедление в процессе увеличения наработки, типичное для СПД. С учетом отмеченной тенденции можно было ожидать, что модель СПД-85П способна обеспечить достаточно большой ресурс. Однако рассмотрение полученных после испытаний профилей эрозии показало, что в результате проведенных испытаний получены значительно отличающиеся от получавшихся ранее профили стенок, а именно: если раньше они были близки к коническим, то профили стенок в модели СПД-85П получились с очевидным изломом (см. рисунок 2.23 (б)). Это не было предусмотрено при разработке модели СПД-85П, что и привело к разрушению внутреннего выходного элемента, поскольку именно в месте излома профиля было расположен стык выходного элемента с базовой частью разрядной камеры. Поскольку крепление выходного элемента осуществлялось в данной модели только его прижатием внешним кольцом, то после выхода границы износа на упомянутый стык этот элемент разделился на две части. Таким образом, в результате ресурсных испытаний модели СПД-85П выявлена новая особенность износа выходных частей стенок разрядной камеры.

Представляет интерес понять причины отмеченного изменения характера профилей стенок. Они могут быть объяснены изменением разрядного напряжения, поскольку оно значительно выше большинства напряжений, при которых проводились ресурсные испытания СПД, составлявших не выше 400В. Отмеченное увеличение разрядного напряжения, как следует из имеющихся данных [86], должно было привести к увеличению температуры электронов в СИУ, максимум которой должен находиться у начальной части зоны эрозии со стороны анода. Соответственно в этой части канала должен увеличиться пристеночный скачок потенциала. Поэтому ионы, родившиеся в этой части канала, должны, во-первых, приобретать большие радиальные скорости, чем это было ранее, и большие энергии в пристеночном скачке потенциала, что, возможно, и привело к увеличению распыляющей способности ионного потока в рассматриваемой части канала.

Таким образом, ресурсные испытания модели СПД-85П помимо подтверждения рассмотренных ранее причин изменения характеристик двигателя по мере увеличения наработки двигателя позволили выявить новую особенность износа стенок разрядной камеры при работе СПД с повышенным разрядным напряжением, которая требует дальнейших исследований.

#### Заключение к Главе 2

По материалам, изложенным в главе 2, представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Подтверждена перспективность схемы двигателя с магнитным экраном внутри разрядной камеры, которая определяется возможностью повышения тяговых характеристик двигателя по сравнению с двигателями традиционной схемы за счет обеспечения более эффективного управления характеристиками магнитного поля в ускорительном канале и перехода к двухступенчатой схеме питания разряда.

2. Выявлены особенности работы двигателей такой схемы, к которым, в первую очередь, относится возникновение нового фактора изменения тяговых характеристик двигателя при длительной работе – осаждение распыленного с выходных участков стенок разрядной камеры материала на поверхности магнитного экрана в порошкообразном виде и образование нерегулярных скоплений этого материала, приводящих к усилению взаимодействия дрейфующих электронов с этими скоплениями, увеличению электронной составляющей разрядного тока и снижению тяговых характеристик двигателя. Показано также, что основным фактором, определяющим снижение тяговых характеристик разработанных моделей СПД по мере увеличения их наработки, является уширение выходной части ускорительного канала. Выявлены также новые особенности износа стенок разрядной камеры, которые требуют дальнейшего изучения.

3. Показано, что определенный эффект по борьбе с отрицательным влиянием загрязнения ускорительного канала могут дать:

- защита поверхности магнитного экрана козырьками из того же материала, что и материал выходных элементов разрядной камеры;

- предварительное уширение ускорительного канала, позволяющее снизить потоки распыленного с выходных элементов вещества в прианодную часть разрядной камеры.

В следующей главе будут представлены результаты дальнейшего исследования названных возможностей.

### ГЛАВА З. ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ СПД-100ПМ И СПД-140ПМ НА РЕЖИМАХ РАБОТЫ С ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТЯГИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ПИТАНИЯ РАЗРЯДА

#### 3.1. Модернизация модели СПД-100ПМ для повышения стабильности тяговых характеристик с уширенной выходной частью ускорительного канала

#### 3.1.1. Основные сведения о модернизации модели СПД-100П

Как было показано в предыдущей главе модели СПД-100П и СПД-85П способны обеспечить при исходной геометрии укорительного канала получение удельный импульс тяги на уровне 30км/с с тяговым КПД около (55-60%). Однако по мере наработки двигателя и, следовательно, уширения выходной части ускорительного канала происходит значительное ухудшение тяговых параметров модели: удельный импульс тяги падает на 3000м/с (10%) и более с одновременным уменьшением КПД практически до 0,4. Подобный эффект наблюдался при испытаниях модели СПД-100Д на режиме работы с разрядным напряжением 800В, когда после наработки порядка 380 часов тяга снизилась с 70-75 мН до 60мН, а средние значения «анодного» тягового КПД снизились с 55% до 45% [87]. Данные негативные эффекты проявляются вследствие уширения ускорительного канала из-за изменения геометрии выходных диэлектрических колец, что ведет к уменьшению плотности расхода через ускорительный канал, а это, в свою очередь, приводит к расширению СИУ в направлении анода [1].

Для объяснения расширения СИУ можно привести следующие соображения. Расход рабочего газа в первом приближении пропорционален разрядному току, который в рассматриваемом случае постоянной мощности, обратно пропорционален разрядному напряжению, т.е.

$$\dot{m}_a \sim I_d = \frac{N_d}{U_d} \tag{3.1}$$

Плотность ионного тока  $j_i$  в ускорительном канале

$$j_i = n_i V_i e = \eta_m \frac{\dot{m}_a}{MS_{ch}} e \sim \eta_m \frac{N_d}{MS_{ch} U_d} e$$
(3.2)

где  $\eta_m$ ,  $n_i$ , M, e,  $S_{ch}$ - соответственно коэффициент переработки атомов в ионы (коэффициент использования рабочего газа), концентрация, масса и заряд ионов, площадь поперечного сечения ускорительного канала.

Откуда видно, что концентрация ионов в ускорительном канале должна уменьшаться. Поскольку она изменяется по длине ускорительного канала, в качестве характерной ее величины можно выбрать значение на границе «зоны ионизации»

$$n_i \sim \eta_m \frac{N_d}{S_{ch} U_d V_i} \sim \eta_m \frac{N_d}{S_{ch} U_d \sqrt{2eU_i}}$$
(3.3)

где  $V_i$ ,  $U_i$  - значения скорости ионов и падения потенциалов в зоне ионизации.

Таким образом, даже при постоянных значениях  $V_i$ ,  $U_i$  с увеличением разрядного напряжения характерные значения концентрации ионов и электронов должны уменьшаться с увеличением разрядного напряжения. Соответственно, может увеличиваться длина пробега атомов до их ионизации и толщина СИУ  $L_c$ . Толщина слоя ионизации и ускорения может быть оценена с использованием следующего известного соотношения [88]:

$$L_{c} \approx R_{eL}(U_{d}) \sqrt{\frac{\nu_{eff}}{\nu_{i}}}$$
(3.4)

где  $R_{eL}(U_d)$ ,  $v_{eff}$ ,  $v_i = \langle \sigma_i V_e \rangle n_e$ , - соответственно, Ларморовский радиус электронов при их скорости, соответствующей приложенной разности потенциалов, эффективная частота электронов, описывающая перенос электронов поперек магнитного поля и частота ионизационных столкновений электронов с атомами.

С увеличением разрядного напряжения первый сомножитель в выражении (3.4) должен возрастать пропорционально  $\sqrt{U_d}$ . Что касается отношения  $v_{eff}/v_i$ , то его зависимость от

разрядного напряжения оценить непросто из-за того, что пока недостаточно изучены механизмы поперечного переноса электронов. Экспериментальные же данные свидетельствуют о том, протяженность зон эрозии возрастает с увеличением разрядного напряжения, что свидетельствует о расширении СИУ. Это приводит к увеличению потерь ионов на стенках разрядной камеры и снижению тяговой эффективности двигателя.

Ранее было показано, что в модели СПД-100П за счет модификации магнитной системы двигателя и уменьшения ширины выходной части ускорительного канала удалось добиться значительного сужения СИУ и, соответственно, роста тягового КПД. Однако при достаточно длительной работе модели происходит уширение выходной части укорительного канала, что также ведет к расширению СИУ и соответствующим негативным эффектам. Кроме того, в модели СПД-100П происходило накопление в канале двигателя распыленного

материала разрядной камеры в виде порошкообразных частиц, приводившее к увеличению сквозного электронного тока и уменьшению тягового КПД. Все отмеченные эффекты были получены и в модели СПД-85П. Таким образом, представлялось целесообразным снизить влияние перечисленных факторов за счет модернизации модели СПД-100П, чтобы сохранить уровень тяговых характеристик, близкий к начальному, и тем самым повысить их средний уровень за ресурс. Принципиальная возможность такой модернизации вытекала из результатов ресурсных испытаний двигателей СПД-100 и ВРТ-4000 [50, 89], а также из отмечавшихся в главе 1 результатов исследований американских специалистов по магнитной защите стенок разрядной камеры.

Основная идея модернизации заключалась в оптимизации магнитного поля в ускорительном канале с целью сужения и выдвижения СИУ в выходном направлении таким образом, чтобы большая часть СИУ располагалась за плоскостью полюсов магнитной системы. Это позволило бы сократить протяженность зон эрозии и снизить значимость уширения ускорительного канала, а также реализовать предварительное его уширение с целью снижения влияния потока распыленного порошка. Однако только изменение характеристик магнитного поля недостаточно для решения задачи, поскольку магнитное поле только формирует каркас, в пределах которого реализуются рабочие процессы. Поэтому необходимо согласованное с изменением магнитного поля изменение параметров, характеризующих названные процессы. Одним из таких параметров является продольная протяженность слоя ионизации, которая в соответствии с соотношением (3.3) и (3.4) при прочих равных условиях определяется плотностью потока рабочего вещества и уровнем концентрации плазмы в ускорительном канале. Поэтому при модернизации модели СПД-100П была решено уменьшить ширину ускорительного канала с тем, чтобы повысить плотность плазмы.

Для реализации принятых решений проводилось моделирование магнитного поля для модели СПД-100П при различных положениях магнитного экрана относительно полюсов магнитной системы. В результате было найдено такое положение торцов магнитного экрана, при котором удается получить магнитное поле, удовлетворяющее приведенным выше требованиям (рисунок 3.1(б)). В частности, была получена более высокая скорость нарастания магнитной индукции к срезу ускорительного канала, который традиционно предполагалось располагать в области сечения с максимальным значением индукции на срединной поверхности ускорительного канала. Это создавало предпосылки для сужения СИУ. Кроме того, при указанном положении торцов магнитного экрана и выбранном соотношении размеров всех элементов магнитной системы удалось получить выдвижение максимума индукции магнитного поля на 7-8 мм от плоскости наружного полюса.



Рисунок 3.1 (а) — Модернизированная модель двигателя типа СПД-100ПМ; (б) - Картина силовых линий магнитного поля и распределение радиальной компоненты индукции магнитного поля вдоль срединной поверхности ускорительного канала

Следует также добавить, что, как видно из рисунка 3.1(б), можно получить такую конфигурацию силовых линий магнитного поля, при которой российские и американские специалисты надеются получить двигатель с очень малой скоростью износа стенок разрядной камеры за счет выполнения профилей стенок, близкими к конфигурации силовых линий магнитного поля на границе СИУ со стороны анода [50]. Но, поскольку в американских вариантах конструкции моделей двигателя возникла новая проблема - износ полюсов магнитной системы [90, 91], стратегия разработки модели СПД-100ПМ сводилась к тому, чтобы модель значительное время работала с такой конфигурацией стенок разрядной камеры, при которой достаточно большое время стенки разрядной камеры защищали бы полюса, как это реализуется в современных СПД. Больше того, представлялось возможным за счет максимального выдвижения области с максимальными значениями индукции и, соответственно, СИУ за плоскость полюсов обеспечивать защиту полюсов и при предельной конфигурации стенок, соответствующей условиям магнитной защиты стенок.

С учетом изложенного была изготовлена модернизированная лабораторная модель СПД-100ПМ (рисунок 3.1(a)).

Модернизация включала в себя:

 изготовление новых элементов разрядной камеры, а также элементов крепления и фиксации ее продольного положения, позволивших изменять продольное положение всей разрядной камеры с магнитным экраном за счет смены колец 4 на рисунке 3.1(а);

- изготовление сменных выходных колец (2 и 3 на рисунке 3.1(а)) разрядной камеры, позволивших изменить ширину ускорительного канала, которая с учетом полученной топологии магнитного поля и опыта работы с моделью СПД-85П была выбрана равной 11мм.

При этом выходные кольца были изготовлены вместе с козырьками для предотвращения загрязнения поверхности магнитного экрана продуктами распыления выходных кромок.

#### 3.1.2. Этапы и результаты исследования характеристик модели СПД-100ПМ

Исследования характеристик модели СПД-100ПМ включали в себя следующие этапы:

1. Определение вольтамперных характеристик модели при расходах ксенона через ускорительный канал 2,1 мг/с, а также 2,6-2,8 мг/с, 3,0-3,1 мг/с и 3,2 мг/с, обеспечивавших разрядную мощность соответственно 2,0-2,1 кВт, 2,3-2,4 кВт и 2,5-2,6кВт при разрядном напряжении 800В.

2. Контрольная наработка не менее 15 часов с целью определения стабильности характеристик и определение магнитных характеристик на режимах работы с разрядным напряжением 800В для анализа устойчивости рабочих процессов.

Контрольная наработка осуществлялась циклами при расходах ксенона через ускорительный канал, обеспечивавших разрядную мощность соответственно 2,0 - 2,1 кВт и 2,3-2,4 кВт и 2,5-2,6 кВт при разрядном напряжении 800В. Это дало возможность оценить стабильность параметров двигателя на разных режимах при ограниченной общей длительности контрольной наработки. После контрольной наработки были проведены измерения профилей стенок разрядной камеры и протяженности зон эрозии на них.

Механическое уширение выходной части разрядной камеры после упомянутой (первой) контрольной наработки и определение ВАХ модели с уширенной (расточенной – РК) разрядной камерой, вторая контрольная наработка длительностью около 30 часов с определением магнитной характеристики модели с уширенной разрядной камерой и определением характеристик струи на одном из приведенных ранее режимов работы. Профили стенок после расточки выходной части разрядной камеры и после второй контрольной наработки представлены на рисунках 3.2 (а) – (б).



Рисунок 3.2 – Профили стенок выходной части разрядной камеры модели СПД-100ПМ после двух контрольных наработок: (а) – наружная стенка; (б) – внутренняя стенка

Уширение было осуществлено на выходных кольцах разрядной камеры в местах их отчетливого износа на угол 45 градусов относительно продольного направления на длине 5мм на наружном кольце и на длине 7мм на внутреннем кольце. Такой угол уширения был выбран с учетом того, что предыдущие испытания модели СПД-100Д и СПД-85П показали, что при таком угле уширения наблюдалось значительное его влияние на параметры двигателя.

Вольтамперные и соответствующие им тяговые характеристики модели с исходной (на рисунках 3.3, 3.5 и 3.6 «новой» - НК) разрядной камерой приведены на рисунках 3.3 (а) – (г). Они свидетельствуют о том, что при исходной геометрии разрядной камеры зависимости всех параметров двигателя имеют традиционный вид за исключением того, что в высоковольтной области разрядный ток стабилизируется (см. рисунок 3.3(а)). Положительным следствием стабилизации тока в области повышенных напряжений является то, что не наблюдается обычного для большинства моделей СПД падения тягового КПД при

разрядных напряжениях выше 800В, и его значения, рассчитанные с учетом давления в вакуумной камере при разрядном напряжении 800В, составляют 0,55-0,58, т.е. близки к характеристикам модели СПД-100П с исходной геометрией разрядной камеры (см. рисунок 3.3(г)). У модели с расточенной разрядной камерой в области 800В появилась точка с небольшим минимумом разрядного тока, что определяется, по-видимому, тем, что оптимизация модели производилась для работы именно при этом напряжении.



Рисунок 3.3 (а) — Вольтамперные характеристики модели СПД-100ПМ с исходной (НК) и расточенной (РК) разрядной камерой; (б) - Зависимость тяги модели СПД-100ПМ от разрядного напряжения; (в) — Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-100ПМ от разрядного напряжения; (г) - Зависимость «анодного» тягового КПД модели СПД-100ПМ от разрядного напряжения. «Анодный» удельный импульс тяги и «анодный» тяговый КПД приведены с учетом давления в вакуумной камере.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что, как и для других моделей при уширении ускорительного канала, получено снижение удельного импульса тяги и тягового КПД, однако это снижение значительно меньше. Так, при разрядном напряжении 800В и разрядной мощности 2,1кВт получены значения «анодного» удельного импульса тяги, рассчитанного с учетом давления в вакуумной камере, не менее 29км/с (см. рисунок 3.3(в)). Это при вполне достижимом расходе ксенона через катод 0,15мг/с дает значения полного удельного импульса тяги не менее 27,5км/с. При том же разрядном напряжении 800В и разрядной мощности 2,4кВт значения «анодного» удельного импульса тяги составили не менее 31км/с, что дает при расходе ксенона через анод 2,7мг/с и через катод 0,2мг/с значение полного удельного импульса тяги не менее 28,8км/с.

Таким образом, как и ранее, было получено, что модель СПД-100ПМ работает с заметно более высокой тяговой эффективностью при повышенной плотности расхода в ускорительном канале, реализующейся при мощностях 2,4-2,5кВт. При этом важно то, что принятыми решениями удалось снизить влияние уширения разрядной камеры. Для проверки стабильности полученных результатов, как уже отмечалось, были проведены контрольные наработки модели СПД-100ПМ.

Для дальнейшего анализа полученных данных представляется важным рассмотреть и характер эрозии выходных участков стенок разрядной камеры в процессе контрольных наработок. Полученные данные (см. рисунок 3.2) свидетельствуют о том, что в результате уширения разрядной камеры произошло смещение границы зоны износа в направлении анода на (2-3) мм, обусловленное уменьшением концентрации плазмы вследствие уширения. С учетом того, что было осуществлено значительное уширение канала, можно ожидать, что по мере дальнейшей работы модели границы износа со стороны анода дальше сдвигаться не будут.

#### 3.1.3. Результаты определения изменения параметров модели СПД-100ПМ в процессе контрольных наработок

Первая контрольная наработка модели СПД-100ПМ была осуществлена при работе модели циклами с мощностями разряда 2.0-2,1кВт, 2,3-2,4 кВт и ~2,5-2,6 кВт при разрядном напряжении 800-810В. После механического уширения ускорительного канала аналогичным образом была осуществлена вторая контрольная наработка. Изменение параметров двигателя в процессе этих наработок приведено на рисунках 3.4(а)–(г). При их рассмотрении следует иметь в виду, что в процессе у контрольных наработок модель работала циклами, когда она отключалась и включалась вновь для контроля «нуля» тягомера с зажиганием разряда при напряжении 300В.

Как видно из приведенных данных, стабильность параметров двигателя в процессе контрольной наработки модели СПД-100ПМ находилась на типичном для СПД уровне, когда при неизменных расходах через двигатель на установившихся режимах работы изменения разрядного тока в отсутствие его стабилизации составляют  $\pm 3\%$ , изменения тяги находятся в пределах  $\pm 5\%$ . При этом изменения удельного импульса тяги находятся в пределах  $\pm 3\%$ .

Как уже отмечалось, что в процессе контрольных наработок осуществлялось определение магнитных характеристик модели. Это несколько увеличило разброс параметров, зарегистрированных автоматизированной системой регистрации параметров модели, представленных выше.





Для иллюстрации влияния уширения канала в таблице 3.1 приведены средние значения параметров, полученных при исходной и уширенной геометриях ускорительного канала, для одного из основных режимов работы модели с разрядной мощностью 2,1±0,1кВт.

Таблица 3.1 - Средние значения параметров модели СПД-100ПМ на сопоставимых
режимах при исходной (1) и уширенной (2) геометриях ускорительного канала

Геометрия	U <sub>d</sub> , B	ṁ <sub>а</sub> , мг/с	I <sub>d</sub> , A	N <sub>d</sub> , Вт	F <i>,</i> мН	I <sub>уд</sub> *, м/с	η <sub>t</sub>
1	800	2,77	2,6	2,1	81,3	29300	0,55
2	800	2,8	2,7	2,16	79,8	29000	0,52

\*Средние значения «анодных» параметров, рассчитанные с учетом обратного потока из камеры.

Таким образом, при уширении разрядной камеры значения тяги, удельного импульса тяги уменьшились, но незначительно. Этот результат является обнадеживающим, так как до

этого в большинстве моделей СПД с уширением ускорительного канала происходило значительное уменьшение тяги и удельного импульса тяги.

#### 3.1.4. Результаты определения магнитных характеристик модели СПД-100ПМ

Выше уже отмечалось, что в процессе контрольных наработок проводилось определение магнитных характеристик модели СПД-100ПМ и определение характеристик ее струи. При определении магнитной характеристики осуществлялось пропорциональное изменение токов в катушках намагничивания с учетом того, что на оптимальных режимах работы ток в наружных катушках намагничивания составлял 0,8 от тока во внутренней катушке. Поэтому изменение токов осуществлялось с сохранением отмеченной пропорции.

На рисунках 3.5(а)–(е) для удобства сравнения приведены результаты, полученные как при исходной, так и при уширенной геометрии ускорительного канала.

Следует отметить, что представляет интерес и разность потенциалов между анодом и магнитным экраном (рисунок 3.5(e)), которая косвенно характеризует изменение параметров плазмы в прианодной области, поскольку в данном случае магнитный экран «плавал» в прианодной плазме. Как видно, значения названной разности потенциалов существенно различается для цилиндрического и уширенного канала. Изменение этой разности потенциалов характеризует либо изменение температуры электронов, либо изменение потенциала прианодной плазмы, либо изменение прианодного скачка потенциала. Более определенные выводы можно будет сделать после проведения соответствующих измерений.

В целом, результаты определения «магнитных» характеристик свидетельствуют о том, что полученные зависимости являются достаточно плавными. Они мало изменяются при значительном изменении конфигурации выходной части разрядной камеры И свидетельствуют о сохранении достаточно большого запаса по диапазону возможного изменения токов в катушках. Это является положительным эффектом введенных изменений, так как, например, при сопоставимом изменении геометрии разрядной камеры в модели СПД-85П изменение характера этих зависимостей было значительным. Таким образом, получено еще одно свидетельство положительных изменений в работе модели СПД-100ПМ вследствие проведенной ее модернизации.



Рисунок 3.5 (а) - Зависимость разрядного тока модели СПД-100ПМ с исходными и расточенными каналами от тока во внутренней катушке намагничивания при пропорциональном изменении тока в наружных катушках; (б) - Зависимость тяги модели СПД-100ПМ (в) - Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-100ПМ; (г) - Зависимость «анодного» тягового КПД в модели СПД-100ПМ; (е) – Зависимость потенциала анод – магнитный экран в модели СПД-100ПМ

# 3.1.5 Результаты измерения расходимости струи модели СПД-100ПМ на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги

В процессе определения магнитных характеристик и контрольной наработки модели СПД-100ПМ с уширенным каналом производилось определение полуугла  $\beta_{0,95}$  расходимости струи для 95% ускоренных ионов с использованием методики, разработанной в НИИ ПМЭ МАИ (см раздел 2.1.3). Измерения проводились с помощью электростатического энергоанализатора, перемещаемого в плоскости, содержащей ось двигателя, вдоль окружности с радиусом 0,7м и центром в точке пересечения оси двигателя с выходной его плоскостью. Полученные результаты для магнитных характеристик представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.6.

Из приведенных данных видно, что на оптимальных режимах работы с токами в катушках намагничивания  $I_{m1}$ =4,5A и  $I_{m2}$ =3.6A и более расходимость струи находится на уровне сопоставимом для штатных СПД. Характер изменения распределений плотности тока ускоренных ионов можно оценить из данных, представленных на рисунке 3.6.

Таблица 3.2 - Результаты определения полуугла расходимости струи при различных токах в катушках намагничивания для режима работы с разрядным напряжением 800В и расходом ксенона через анод 2,8мг/с

U <sub>d</sub> , B	I <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	β <sub>0.95</sub> , град
800	2,81	3,0	2,4	50,98
800	2,84	3,5	2,8	50,93
800	2,78	4,0	3,2	52,19
800	2,73	4,5	3,6	48,20
800	2,69	5,0	4,0	45,19
800	2,64	5,5	4,4	48,71
800	2,63	6,0	4,8	48,88



Рисунок 3.6 — Зависимость нормированной величины плотности ионного тока на многосеточный зонд модели СПД-140ПМ от угла относительно оси двигателя при различных токах в катушках намагничивания

Измерение расходимости струи модели СПД-100ПМ проводилось и в ходе контрольной наработки. Характеристики двигателя, полученные при проведении этой наработки, представлены в разделе 3.1.3. Токи в катушках намагничивания  $I_{m1}$ =4,6A и  $I_{m2}$ = 4,5A поддерживались постоянными в течение всей наработки. Результаты для режимов работы с мощностями разряда 2,1кВт и 2,5кВт попеременно показаны в таблице 3.3.

Из приведенных выше данных следует, что вторую контрольную наработку можно разделить на два этапа: первый этап – приработка выходного профиля после механической расточки выходных колец; второй этап – работа двигателя с профилем выходных колец, получаемым после длительной работы двигателя. Первый этап можно считать закончившимся после 20 часов наработки, поэтому основное внимание следует уделить результатам, полученных после 20 часов. Данные, представленные в таблице 3.3, свидетельствуют о заметной разнице в расходимости струи при работе на разных мощностях, причем уменьшение расходимости происходит с ростом разрядного тока и, соответственно, мощности разряда.

Таблица 3.3 - Результаты определения полуугла расходимости для режимов работы с разрядным напряжением 800В и мощностями разряда 2,1кВт и 2,5кВт

U <sub>d</sub> , B	N <sub>d</sub> , кВт	Наработка, час	β <sub>0,95</sub> , град
800	2,5	8	47,52
800	2,5	13,4	47,88
800	2,1	17,3	44,28
800	2,1	25,2	47,52
800	2,1	29,4	45
800	2,5	30,4	37,26
800	2,5	34,3	38,52
800	2,1	35,5	45,36
800	2,1	38,3	45
800	2,5	39,2	36,18
800	2,1	42,6	46,98
800	2,5	44,5	40,32

Таким образом, выдвижение СИУ к срезу ускорительного канала и уширение разрядной камеры не повлияло на полуугол расходимости струи, что на данном этапе разработки высоковольтного двигателя является положительным результатом. Важно также то, что с увеличением расхода ксенона через ускорительный канал и мощности разряда расходимость струи заметно уменьшается.

В целом полученные данные свидетельствуют о том, что разработанные способы повышения тяговых характеристик СПД на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги, реализованные при разработке модели СПД-100ПМ, подтвердили свою перспективность.

# 3.2. Параметрические испытания лабораторной модели СПД-140ПМ на режимах работы с повышенным удельным импульсом тяги

#### 3.2.1. Разработка лабораторной модели СПД-140ПМ

Как было показано в предыдущем разделе, модель СПД-100ПМ с магнитным экраном внутри разрядной камеры подтвердила свою перспективность для разработки на ее основе двигателя с удельным импульсом тяги на уровне 30км/с. Однако дальнейшее увеличение удельного импульса для данного типоразмера двигателя затруднено по причине ограничения мощности уровнем не более 2,0-2,5кВт, ибо требует уменьшения расхода РТ при дальнейшем увеличении разрядного напряжения, а это, как было показано в предыдущих разделах, ведет к значительному снижению тяговой эффективности. Таким образом, для продвижения вверх по удельному импульсу тяги в НИИ ПМЭ МАИ было принято решение разработать модель высоковольтного СПД масштаба СПД-140. За основу для данной модели, как и в случае СПД-100ПМ, было выбрана схема СПД с магнитным экраном, расположенным внутри разрядной камеры. Кроме того, при проектировании данной модели был учтен опыт предшествующих разработок таких, как СПД-85П и СПД-100ПМ. Вопервых, для обеспечения приемлемого уровня тяговой эффективности было решено уменьшить ширину разрядной камеры с целью повышения плотности расхода через ускорительный канал по сравнению со стандартным СПД-140, разработанным в ОКБ «Факел». Во-вторых, для обеспечения возможности достаточно большого ресурса модели, как и в модели СПД-100ПМ, было решено максимально сдвинуть СИУ в выходном направлении. Для этого необходимо было максимально сдвинуть максимум распределения индукции магнитного поля за плоскость полюсов магнитной системы. Этот известный способ управления положением СИУ в ускорительном канале [54], уже был использован при разработке двигателей СПД-70, СПД-100, СПД-140 и используется во всех современных СПД. Он основан на том, что зона ускорения в СПД локализуется в области максимальных значений индукции магнитного поля.

В результате была разработана и изготовлена лабораторная модель, получившая обозначение СПД-140ПМ, конструкция которой представлена на рисунке 3.7(а).



1 — анод, 2 — корпус разрядной камеры, 3,4- выходные кольца разрядной камеры, 5,6 — полюса магнитной системы, 7 — магнитный экран, 8 — регулировочные кольца, 9 - стакан.

Рисунок 3.7 — Конструкция модели СПД-140ПМ; (б) - Результаты моделирования магнитного поля в модели СПД-140ПМ при максимально выдвинутой разрядной камере

Таким образом, основные отличительные особенности данной модели заключаются в следующем:

- выходная диэлектрическая часть ускорительного канала выполнена с шириной 16 мм;

- магнитный экран выполнен из пермендюра, и снабжен изолированным электрическим выводом для возможности организации работы модели с различными электрическими связями пары анод-экран, в том числе, для работы по двухступенчатой схеме питания разряда.

Моделирование магнитного поля показало (рисунок 3.7(б)), что при выбранных размерах элементов разрядной камеры и магнитного экрана и при максимально выдвинутом положении разрядной камеры и экрана обеспечивается благоприятная для фокусировки ионов конфигурация силовых линий магнитного поля в выходной части ускорительного канала.

При полученной конфигурации силовых линий магнитного поля можно ожидать получения предельно малых скоростей износа при выполнении профилей стенок разрядной камеры близкими к силовым линиям магнитного поля в прианодной части СИУ, на что

рассчитывают американские специалисты. В данном же случае представляется более важным то, что область максимальных значений индукции магнитного поля вынесена достаточно далеко за плоскость полюсов магнитной системы, т.е. обеспечено достаточно большое смещение СИУ в выходном направлении и имеется значительное пространство для увеличения толщины стенок разрядной камеры для защиты полюсов магнитной системы. К сказанному следует добавить, что выдвижение распределения индукции магнитного поля в выходном направлении увеличивает магнитный поток через магнитный экран, и ценой, заплаченной за получение приведенного магнитного поля является некоторое увеличение сечений элементов магнитопровода и увеличение токов в катушках намагничивания, т.е. увеличение массы магнитной системы и затрат на создание магнитного поля.

#### 3.2.2. Результаты исследования характеристик модели СПД-140ПМ

В процессе исследования изучались характеристики модели при ее работе как в одноступенчатом, так и в двухступенчатом варианте, когда между магнитным экраном и анодом прикладывалось дополнительное смещение потенциала. Величина названного смещения потенциала была выбрана равной 70В, поскольку в результате проведенных ранее исследований (см. раздел 2.2.2) было показано, что отрицательные смещения потенциала магнитного экрана относительно анода (50 – 100) В уже дают определенный эффект. Дальнейшее увеличение смещения может привести к заметной эрозии поверхности магнитного экрана при длительной работе. При выбранном же смещении потенциала ожидалась мягкая очистка поверхности экрана от частиц, распыляемых с выходных колец разрядной камеры. Схема питания разряда и формулы для расчета потребляемой мощности полностью аналогичны тем, что использовались при работе по двухступенчатой схеме модели СПД-100П (рисунок 2.6). ВАХ при работе по одноступенчатой схеме определялись при различных способах соединения анода с магнитным экраном: первый способ – магнитный экран оторван от анода («плавает»); второй – экран соединен с анодом через резистор в 22кОм; третий – экран напрямую соединен с анодом, образуя магнитный анод.

Процедура определения ВАХ модели СПД-140ПМ описана в разделе 2.2.2. С учетом полученных ранее данных и необходимости работы при разрядных напряжениях до 1200-1400В характеристики модели исследовались в диапазоне расходов ксенона через анод 3-4 мг/с.

Модель СПД-140ПМ в данной серии исследовалась при работе с катодом типа КН-3В разработки ОКБ «Факел», используемым в двигателях типа СПД-100. Расход ксенона через этот катод во всех испытаниях поддерживался равным штатному расходу для этого катода 0,45 мг/с, хотя для ряда исследованных режимов модели СПД-140ПМ возможна работа

катода и при меньших расходах через него. Больше того, возможно использование и других катодов, способных обеспечить работу модели на указанных режимах работы при меньших расходах ксенона через них. Поэтому в дальнейшем основное внимание уделялось определению «анодных» параметров модели, т.е. рассчитанных без учета расхода в катод. На рисунках 3.8 (а)–(е) показаны характеристики модели в процессе снятия ВАХ при расходе через анод 3,5мг/с и разных схемах соединения анод – экран, а также при работе по двухступенчатой схеме.

На всех графиках (рисунки 3.8 (a)-(e)) напряжение для двухступенчатой схемы является суммарным напряжением обеих ступеней. Точно также на графиках для мощности разряда и тягового КПД используется суммарная мощность для двухступенчатой схемы.

Выше показаны характеристики модели только для анодного расхода 3,5мг/с, т.к. для больших расходов не получается достичь удельного импульса тяги более 40км/с без превышения ограничения в 5кВт по мощности разряда, а для меньших расходов тяговый КПД существенно уменьшается. В целом по ВАХ видно, что они для модели СПД-140ПМ имеют традиционный вид, а тяговый КПД для всех видов соединения анод – экран больше 0,5 вплоть до напряжений 1200-1300В. Также важным фактом является отсутствие существенной разницы в разрядном токе и тяговом КПД для всех одноступенчатых режимов, что говорит об их эквивалентности и, следовательно, о возможности работы по упрощенной схеме соединения анод - экран такой, как схема «магнитный анод». Данный результат аналогичен полученному при испытаниях модели СПД-85П.

Самым важным результатом данных параметрических испытаний является очевидное преимущество двухступенчатой схемы питания разряда над одноступенчатой при работе на режимах с высоким удельным импульсом тяги. Так, только на двухступенчатом режиме удалось достичь величины «анодного» удельного импульса тяги 40км/с, не превысив при этом 5кВт мощности разряда. На рисунке 3.8(е) видно, что тяговый КПД при работе по двухступенчатой схеме на всех режимах выше тягового КПД одноступенчатого режима, а это достигнуто за счет уменьшения разрядного тока и, соответственно, мощности разряда. Необходимо обратить внимание на то, что уменьшение разрядного тока произошло при неизменной тяге, что свидетельствует об уменьшении доли электронного тока. Таким образом, гипотеза об управлении «сквозным» потоком электронов смещением потенциала магнитного экрана подтверждается.

103



Рисунок 3.8 (а) — Вольтамперные характеристики модели СПД-140ПМ; (б) -Зависимости мощности разряда модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения; (в) -Зависимости потенциала катод - земля модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения; (г) - Зависимость тяги модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения; (д) - Зависимости «анодный» удельный импульс тяги модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения; (е) - Зависимости «анодный» тяговый КПД модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения.

Примечание: для двухступенчатого режима зависимости приведены от суммарного напряжения на обеих ступенях; МЭ – магнитный экран

Для объяснения полученных эффектов полезно сравнить характеристики для противоположных по отношению магнитного экрана к разряду случаев, а именно:

- при магнитном экране, соединенном с анодом;

- при отрицательном смещении потенциала магнитного экрана относительно потенциала анода, реализующемся либо при плавающем магнитном экране, либо при работе по двухступенчатой схеме.

В первом случае магнитный экран становится частью анода и перехватывает поток электронов, движущихся с катодной стороны разрядного промежутка. Таким образом, он фактически сокращает разрядный промежуток и ионизирующую способность электронного потока в целом. Работа же с магнитным экраном с отрицательным смещением потенциала уменьшает взаимодействие электронов с поверхностью магнитного экрана, что, как уже отмечалось, способствует повышению эффективности их использования для ионизации атомов рабочего газа и приводит к заметному повышению тяговой эффективности двигателя на режимах работы с малыми расходами, представляющими интерес для высокоимпульсных двигателей (см. рисунок 3.8(е)).

Итак, сравнение одноступенчатого и двухступенчатого режимов показало целесообразность организации питания разряда высоковольтного СПД по двухступенчатой схеме, поэтому на рисунках 3.9 (а)-(е) приведены характеристики СПД-140ПМ, полученные в ходе определения ВАХ при работе по двухступенчатой схеме питания разряда с различными расходами ксенона через анод.

Вольтамперные характеристики второй ступени, как и при работе в одноступенчатом режиме, являются слабо растущими (см. рисунки 3.9 (а)). При этом при повышенных напряжениях и расходах рабочего газа ток в первой ступени оказывается очень близким к разрядному току, а ток в цепи магнитного экрана оказывается минимальным (см. рисунок 3.9 (е)). Это свидетельствует о том, что при этом оба источника напряжения прокачивают близкий поток электронов и работают на ускорение ионов. Одновременно с этим ток на экран всегда значительно меньше тока первой ступени, т.е. потенциал экрана при всех значениях разрядного напряжения меньше потенциала плазмы в прианодной области разряда.

В целом тяговые характеристики модели при работе по двухступенчатой схеме имеют такой же вид, что и при одноступенчатой схеме, однако за счет уменьшения разрядного тока для двухступенчатой схемы появляется возможность выйти на большие разрядные напряжения, и таким образом получить больший удельный импульс тяги при достаточно высоком тяговом КПД.

105



Рисунок 3.9 (а) — Вольтамперные характеристики модели СПД-140ПМ; (б) -Зависимости суммарной мощности разряда модели СПД-140ПМ от суммарного напряжения на обеих ступенях; (в) - Зависимости тяги модели СПД-140ПМ от суммарного напряжения на обеих ступенях; (г) - Зависимости «анодного» удельного импульса модели СПД-140ПМ от суммарного напряжения на обеих ступенях; (д) -Зависимости «анодного» тягового КПД модели СПД-140ПМ от суммарного напряжения на обеих ступенях; (е) - Зависимости тока в цепи магнитного экрана анод модели СПД-140ПМ от суммарного напряжения на обеих ступенях

Таким образом, на основе результатов, полученных при исследовании работы моделей СПД-100П и СПД-140ПМ по двухступенчатой схеме, можно сделать вывод о преимуществе

данного способа питания разряда при работе СПД на режимах с высоким удельным импульсом тяги.

# 3.2.3. Результаты измерения расходимости струи модели СПД-140ПМ во время параметрических испытаний

В ходе параметрических испытаний модели СПД-140ПМ проводилось измерение полуугла  $\beta_{0,95}$  расходимости струи двигателя для 95% ускоренных ионов во всех диапазонах разрядного напряжения, пройденных при определении ВАХ с разными конфигурациями соединения пары анод-экран. Как уже отмечалось в предыдущих разделах, расходимость струи для СПД является важным ограничивающим фактором, который должен учитываться при его интеграции в состав КА. Так как струя высоковольтного СПД обладает большей распыляющей способностью, то исследование ее характеристик необходимо проводить на самых ранних этапах отработки модели и в дальнейшем проводить оптимизацию модели с учетом этих данных.

Методика проведения измерения струи модели приведена в разделе 2.1.3. Измерения проводились с помощью электростатического энергоанализатора, перемещаемого в струе вдоль окружности с радиусом 0,7м и центром в точке пересечения оси двигателя с его выходной плоскостью, лежащей в горизонтальной плоскости, содержащей ось двигателя.

Измерение полуугла расходимости производилось в процессе снятия ВАХ (см рисунок 3.8) для каждого значения разрядного напряжения после минимизации разрядного тока за счет подбора токов в катушках намагничивания.

Так как наибольший интерес представляют режимы с высоким удельным импульсом тяги, то ниже в таблицах 3.4-3.9 будут представлены результаты измерения полуугла β<sub>0,95</sub> для высоковольтных режимов.

Таблица 3.4 - Результаты определения полуугла расходимости струи для высоковольтных режима работы и расходом ксенона через анод 3,5 мг/с с «плавающим» магнитным экраном

U <sub>d</sub> , B	l <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	I <sub>уд</sub> , км/с	η <sub>t</sub>	β <sub>0.95</sub>
900	3,61	8,7	7,0	32,2	0,58	38,16
1000	3,65	9,7	7,8	33,42	0,56	35,5
1100	3,72	9,7	8,2	35,49	0,56	34,4
1200	3,75	8,3	8,8	37,53	0,57	37,34
1220	3,71	8,8	9,0	37,46	0,57	34,8

Таблица 3.5 - Результаты определения полуугла расходимости струи для высоковольтных режима работы и расходом ксенона через анод 3,5 мг/с с магнитным экраном соединенным с анодом через сопротивление 22кОм

U <sub>d</sub> , B	I <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	I <sub>уд</sub> , км/с	η <sub>t</sub>	β <sub>0.95</sub>
900	3,63	9,6	6,4	31,94	0,57	44,5
1000	3,72	9,9	7,0	34,08	0,57	41,0
1100	3,82	9,8	7,3	35,76	0,51	45,9
1200	3,9	9,6	8,0	37,87	0,51	42,4

Таблица 3.6 - Результаты определения полуугла расходимости струи для высоковольтных режимов работы и расходом ксенона через анод 3,5 мг/с с магнитным экраном соединенным с анодом напрямую

U <sub>d</sub> , B	l <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	I <sub>уд</sub> , км/с	η <sub>t</sub>	β <sub>0.95</sub>
900	3,61	9,8	5,7	31,79	0,57	55,6
1000	3,66	9,2	5,6	33,39	0,56	50,4
1100	3,71	8,8	5,5	34,91	0,55	47,7
1200	3,79	8,7	5,3	37,01	0,55	43,7

Таблица 3.7 - Результаты определения полуугла расходимости струи для двухступенчатых высоковольтных режимов работы и расходом ксенона через анод 3,5 мг/с; напряжение первой ступени – 70В

U <sub>d</sub> , B	I <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	I <sub>уд</sub> , км/с	η <sub>t</sub>	β <sub>0.95</sub>
900	3,59	9,0	1,80	33,47	0,63	52,9
1000	3,67	8,7	2,30	35,83	0,64	54,5
1100	3,72	8,4	2,90	37,28	0,62	45,5
1200	3,79	8,6	4,30	39,11	0,62	48,7
1300	3,92	8,9	4,30	40,81	0,60	45,3

Как видно из приведенных данных, полуугол расходимости струи минимален для схемы с плавающим магнитным экраном, а для всех высоковольтных режимов находится на уровне 45°±10°, что можно считать приемлемым для СПД. Важно также то, что выдвижение СИУ в направлении среза двигателя не привело к увеличению расходимости струи.

Так как наибольший интерес для высоковольтных режимов работы представляет двухступенчатая схема питания разряда, то для этой схемы рассмотрены результаты и для других расходов (таблицы 3.8-3.9 и рисунок 3.10).

Таблица 3.8 - Результаты определения полуугла расходимости струи для двухступенчатого высоковольтного режима работы и расходом ксенона через анод 3,0 мг/с; напряжение первой ступени – 70В

U <sub>d</sub> , B	I <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	I <sub>уд</sub> , км/с	η <sub>t</sub>	β <sub>0.95</sub>
900	2,99	8,0	1,0	30,55	0,54	40,30
1000	3,03	8,2	1,5	32,55	0,54	39,00
1100	3,11	8,5	2,0	35,03	0,56	44,40
1200	3,2	8,9	3,0	37,05	0,56	39,60
1300	3,32	8,9	3,3	39,5	0,56	37,90

напряжение первой ступени – 70В								
U <sub>d</sub> , B	I <sub>d</sub> , A	I <sub>m1</sub> , A	I <sub>m2</sub> , A	I <sub>уд</sub> , км/с	η <sub>t</sub>	β <sub>0.95</sub>		
900	4,22	9,9	3,50	33,71	0,62	41,0		
1000	4,3	9,4	3,40	35,12	0,60	45,1		
1100	4,37	8,8	3,40	37,3	0,60	43,2		
1150	4,39	9,2	5,40	38,34	0,61	43,2		

Таблица 3.9 - Результаты определения полуугла расходимости струи для двухступенчатого высоковольтного режима работы и расходом ксенона через анод 4,0 мг/с; напряжение первой ступени – 70В



Рисунок 3.10 – Зависимость нормированной величины плотности ионного тока на многосеточный зонд модели СПД-140ПМ от угла относительно оси двигателя. Данные двухступенчатой схемы приведены для максимальных

Полученные данные о полуугле расходимости струи модели СПД-140ПМ являются весьма обнадеживающими, так как они находятся на традиционном для двигателей типа СПД уровне. Так, для большинства режимов полуугол  $\beta_{0,95}$  составляет величину порядка  $45^{\circ}$ , а для некоторых режимов может быть меньше  $40^{\circ}$ . Таким образом, на основании данного результата можно сделать вывод о перспективности использованных при разработке моделей СПД-100ПМ и СПД-140ПМ решений.

#### 3.3. Определение потенциала изолированного магнитного экрана в момент зажигания разряда

Как отмечалось в главе 2, при испытаниях модели СПД-100П появились затруднения с зажиганием основного разряда при изолированном «плавающем» магнитном экране. Данная проблема проявилась и в ходе исследования моделей СПД-85П и СПД-140ПМ. Описать
возникающую трудность можно следующим образом: в процессе зажигания разряда, т.е. после подачи расхода рабочего газа через анодный блок и приложения разности потенциалов между анодом и катодом в 300В инициирование разряда должно производиться после кратковременной подачи напряжения между катодом и поджигающим электродом. В момент подачи поджигающего напряжения между катодом и поджигающим электродом образуется катодная плазма, из которой вытягиваются электроны для зажигания основного разряда. В экспериментах с моделями СПД-85П, СПД-100ПМ и СПД-140ПМ с изолированным магнитным экраном после приложения разрядного напряжения между катодом и анодом в 300В и при подаче напряжения на поджигающий электрод зажигания разряда либо не происходило, либо оно происходило после многократных попыток подачи напряжения на поджигающий электрод и в случайным образом. Ситуация еще больше усугубляется при попытке запуска двигателя, разогретого предыдущей работой. В таком случае приходится увеличивать приложенное напряжение между анодом и катодом до величины в 600В (в зависимости от расхода РТ через ускорительный канал) либо значительно уменьшать токи в катушках намагничивания вплоть до их полного отключения.

Основной причиной данной проблемы может являться низкий потенциал изолированного магнитного экрана относительно катода в плазме, созданной в режиме зажигания разряда. Поэтому был проведен эксперимент по измерению упомянутого потенциала в момент запуска двигателя (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Измерение потенциала магнитный экран-катод модели СПД-140ПМ в процессе запуска двигателя с зажиганием основного разряда

Таким образом, из проведенного эксперимента ясно, что при работе катода в режиме зажигания разряда потенциал экрана в катодной плазме не превышает величины (5-10)В относительно катода (на рисунке 3.11 моменты подачи поджигающего напряжения видны как отдельно стоящие пики). Поэтому разность потенциалов между катодом и пространством внутри разрядной камеры оказывается незначительной, что затрудняет попадание необходимого количества электронов в это пространство и затрудняет зажигание основного разряда. На рисунке 3.11 в конце виден пик, который является моментом зажигания главного разряда. Зажигание разряда в рассматриваемом случае удалось добиться только за счет значительного уменьшения тока в катушках намагничивания.

Также в результате проведенных экспериментов было установлено, что названные трудности устраняются при соединении магнитного экрана с анодом непосредственно или через сопротивление порядка 22кОм, повышающем потенциал магнитного экрана в момент зажигания разряда в двигателе.

### Заключение к главе 3

На основе приведенных в данной главе материалов представляется возможным заключить, что мероприятия по части модернизации модели СПД-100П с целью повышения тяговых характеристик двигателя при длительной работе на режимах с высоким удельным импульсом тяги дали положительный результат. Так была разработана модель СПД-100ПМ, которая устойчиво отработала в течение 40 часов с уширенными выходными элементами на режимах работы с разрядным напряжением  $U_d$ =800В и с мощностями разряда 2,1кВт и 2,5кВт попеременно с достаточно высокими тяговым КПД и удельным импульсом тяги.

Перспективность отмеченных решений подтверждена также исследованием модернизированной модели СПД-140ПМ, показавшей возможность работы данной модели с «анодным» удельным импульсом тяги до 40км/с и с «анодным» тяговым КПД на уровне 0,6. Подтверждено также преимущество двухступенчатой схемы питания разряда для работы на режимах с высоким удельным импульсом тяги.

Установлено, что выдвижение СИУ в направлении среза двигателя, не приводит к росту полуугла расходимости струи двигателя на высоковольтных режимах.

Показано, что причиной затруднений зажигания разряда двигателя с изолированным магнитным экраном является его низкий потенциал в плазме, созданной катодом, который работает в режиме поджига разряда. При работе по одноступенчатой схеме эту проблему можно устранить с помощью соединения экрана с анодом либо напрямую, либо через достаточно большое сопротивление. При двухступенчатой схеме проблем с зажиганием разряда даже при разрядных напряжениях (300-400)В не возникает, поскольку магнитный экран находится под потенциалом., близким к анодному.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНЫХ ИОННЫХ ПОТОКОВ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫХОДНОЙ ПЛОСКОСТИ СПД И ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ КАТОДОВ ОТ РАСПЫЛЕНИЯ ЭТИМИ ПОТОКАМИ

# 4.1. Анализ процессов формирования радиальных потоков ионов в окрестности выходной плоскости СПД

Как уже отмечалось в главе 1, характеристики струи двигателя в приосевой области достаточно хорошо изучены, причем как для серийных двигателей, так и для лабораторных и инженерных моделей, работающих на разных режимах и проходящих стендовую отработку. Вместе с тем ионные потоки, движущиеся преимущественно в радиальном направлении, исследованы недостаточно, хотя их эрозионное воздействие также может быть существенно. Так в первой главе упоминалось об эрозии поджигающих электродов катода после длительной работы на режимах с разрядным напряжением  $U_d$ =300B (см. рисунок 1.19), а с увеличением разрядного напряжения растет и энергия ионов.

Поэтому автором было проведено исследование тока и энергии ионов в радиальных потоках на различных режимах работы модели двигателя СПД-85П, а также возможности защиты катода от распыления этими ионами путем их размещения в области, где плотность потока должна быть небольшой.

В первой главе были приведены также некоторые результаты моделирования параметров плазмы в струе СПД, проведенные в работе [74]. В частности, в работе [74] было показано, что плотности тока ионов в периферийных частях струи вблизи выходной плоскости двигателя, обусловленные процессом перезарядки ионов на нейтральных атомах, направлены преимущественно по радиусу.

Упомянутые результаты свидетельствуют о том, по крайней мере, значительная часть радиальных потоков ионов формируется ионами перезарядки. Следует отметить, что эти ионы должны иметь небольшую энергию. Согласно оценкам, полученным с использованием расчетных значений концентрации плазмы и известных значений температуры электронов, составляющих в струе не больше (3-5) эВ, энергия ионов перезарядки должна составлять не более (15-20)эВ. Аналогичные результаты были получены при расчетном анализе процессов в струе СПД и в других работах [69, 72].

Экспериментальные исследования параметров ионных потоков в окрестности выходной плоскости двигателя были проведены на расстояниях (0,5-1,0)м [68, 72, 74]. Эти исследования показали, что при измерениях энергоанализатором в окрестности выходной плоскости двигателя доминируют ионы с энергиями не выше 50эВ (рисунок 1.16 (б)), хотя в работе [68] при измерениях масс-спектрометром были обнаружены и ионы со средними энергиями в диапазоне 50-200эВ. Таким образом, имеющиеся данные несколько противоречат друг другу. Причиной такого противоречия может быть то, что при измерениях на достаточно больших расстояниях энергоанализатор регистрирует ионы, попадающие в него из всей струи. Поэтому в измеряемом ионном потоке доминируют ионы перезарядки, на фоне которых сложно выделить высокоэнергетичные ионы. Наличие таких ионов однозначно подтверждается приводившимися ранее данными о характере эрозии катодов в двигателе СПД-100. Такие ионы могут возникать из-за упругого рассеяния ионов из основного потока на нейтральных атомах [68, 69], а также непосредственно из разряда, которые в окрестности выходной плоскости также должны двигаться практически в радиальном направлении.

То, что ионы, приводящие к заметной эрозии поверхностей поджигающих электродов, движутся в окрестности выходной плоскости двигателя по направлениям, близким к радиальным, подтверждается характером следов эрозии названных электродов. Так, после 300-часовых испытаний одного из образцов двигателя типа СПД-100 в НИИППЭ МАИ были обнаружены специфичные следы эрозии поджигающих электродов катодов (рисунок 4.1), а именно: было обнаружено, что зона эрозии имеет достаточно четкие границы. Одна из этих границ совпадала с плоскостью среза двигателя.



Рисунок 4.1 — Фото следов эрозии поджигающих электродов катодов после 300часовых испытаний модели СПД-100

Вторая была близка к траекториям, которые соответствовали бы прямым проведенным в продольном сечении двигателя, касающимся выходной кромки наружной стенки разрядной

камеры и наружной кромки наружного полюса магнитной системы. Это направление соответствовало углам его отклонения от оси двигателя 100-105 градусов (рисунок 4.2).

Возникновение границы повышенной эрозии в выходной плоскости двигателя может быть объяснено тем, что распыляющийся с внутренней стенки разрядной камеры поток распыленного вещества попадает на выходные участки поджигающих электродов и, осаждаясь на них, частично защищает их от распыления. Поскольку значительная часть материала керамики распыляется в виде нейтральных частиц, то они движутся прямолинейно. Поэтому эти частицы не могут попадать в зоны, затененные наружной стенкой разрядной камеры, и возникает четкая граница раздела между областями, куда эти частицы попадают, и областями, куда они попасть не могут. Соответственно возникает граница между областями на поверхности поджигающих электродов, хотя бы частично защищенными осаждающимся на них потоком распыленного с внутренней стенки разрядной камеры материала и незащищенными областями.



Рисунок 4.2 — Схема движения радиальных потоков ионов в окрестности выходной плоскости двигателя

Что касается второй границы, то она свидетельствует о том, что поток ионов, распыляющих поверхности поджигающих электродов катодов действительно движется в квазирадиальном направлении от выходной части области разряда, т.е. представляет собой радиальный поток (рисунок 4.2).

С учетом изложенного представляло интерес провести измерения параметров ионов в радиальном потоке вблизи двигателя, когда вклад ионов перезарядки из струи должен быть значительно меньше. Кроме того, для получения дополнительной информации, которая может помочь разрешить вопрос о том, какой из вышеназванных механизмов возникновения ионов средней энергии, было решено исследовать зависимость энергии от режима работы

двигателями, в частности, от разрядного напряжения. Действительно, энергия ионов, попадающих в радиальный поток вследствие упругого рассеяния, должна однозначно зависеть от приложенного разрядного напряжения. И обнаружение такой зависимости послужило бы одним из дополнительных аргументов в пользу этого механизма.

С учетом изложенного автором при участии других сотрудников НИИПМЭ МАИ было проведено измерение параметров ионов в радиальном потоке, движущемся в окрестности выходной плоскости двигателя на меньшем расстоянии от двигателя, чем это делалось ранее [92]. Методика проведенных экспериментов описана в следующем разделе.

### 4.2. Методика и результаты исследования параметров радиальных ионных потоков в непосредственной близости выходной плоскости СПД

Исследование было проведено с помощью экспериментального узла с моделью СПД-85П, представленного на рисунках 4.3. Эта модель была оборудована электростатическими зондами, расположенными примерно в окрестности выходной плоскости двигателя. Они были смонтированы на диске из дуралюмина, закрепленном на наружном полюсе магнитной системы модели. При этом названные зонды были установлены вдоль окружности с центром, совпадающим с осью двигателя, и разнесены так, чтобы по результатам измерений можно было оценить азимутальную неравномерность распределения измеряемых параметров (см. рисунок 4.3(б)).



Рисунок 4.3 – Схема расположения плоских зондов и энергоанализатора относительно модели, (а) – Вид сбоку; (б) – Вид спереди

Кроме упомянутых зондов был установлен также трехсеточный электростатический энергоанализатор, позволявший определять энергетические характеристики ионов,

движущихся в окрестности выходной плоскости модели. При этом его ось находилась примерно в плоскости выходного сечения разрядной камеры двигателя и пересекалась с осью двигателя (см. рисунок 4.3 (а)).

Измерения были проведены при двух расходах рабочего газа (ксенона) через ускорительный канал модели (2,1мг/с и 2,5мг/с) и трех разрядных напряжениях (300В, 600В, 800В) с тем, чтобы можно было оценить влияние режима работы двигателя на измеряемые параметры.

Методики определения локальных параметров плазмы и энергетического анализа ионных потоков изложены во второй главе, а теоретические основы для них представлены в работе [78].

Результаты измерений с использованием многосеточного зонда – энергоанализатора представлены на рисунках 4.4 (а).





Как видно, в радиальном потоке отчетливо проявились ионы с энергиями (50-200)эВ. И наличие ионов с такими энергиями объясняет их эрозионную способность.

К сказанному следует добавить, что измерения в данной серии экспериментов были проведены при использовании в качестве базового потенциала вакуумной камеры, который ниже потенциала плазмы на величину  $\varphi_{pl}$ . Поэтому шкала отсчета для определения энергии ионов должна быть смещена в меньшую сторону на величину  $\varphi_{pl}$ , т.е. энергия ионов, преодолевших потенциальный барьер  $U_a$  может быть определена как

$$\varepsilon_i \approx e(\overline{U_a} - \varphi_{pl})$$
 (4.1)

С учетом изложенного была определена зависимость средней энергии ионов от параметров, характеризующих режим работы двигателя (рисунок 4.4(б)).

Полученные данные свидетельствуют о том, что средняя энергия ионов в радиальном потоке, движущемся в окрестности выходной плоскости двигателя, слабо зависит от режима работы двигателя.

К изложенному выше следует добавить, что измерения с помощью энергоанализатора позволяют определить не только энергетические характеристики потока ионов, но и плотность тока ускоренных ионов, а именно: в качестве таковых можно взять полученные при определении кривой задержки значения тока при задерживающем потенциале +50B, превышающем потенциал плазмы. При этом получаются значения плотности тока, сопоставимые с измеренными обычными зондами (см. рисунок 4.5, где приведены значения плотности тока, измеренные зондом №4, расположенным рядом с энергоанализатором).

Это означает, что в местах расположения зондов плотность тока ионов с повышенными энергиями составляют большую часть полного тока ионов из плазмы на зонд. Больше того, на отдельных режимах работы плотность тока, измеренная энергоанализатором, превосходит измеренную зондом. Это может быть объяснено тем, что входное отверстие энергоанализатора в проведенных измерениях было больше приемной поверхности зонда и возрастанием плотности ионного тока по мере уменьшения угла отклонения направлений измерения от оси двигателя [74].



Рисунок 4.5 – Плотности тока, измеренные зондом №4 и энергоанализатором

Итак, из полученных результатов наибольший интерес представляет то, что средняя энергия ионов, движущихся в радиальном направлении в окрестности выходной плоскости двигателя, оказалась достаточно большой. Этот результат объясняет наблюдаемую эрозию поджигающих электродов катодов. Также важным является то, что средняя энергия ионов слабо зависит от режима работы двигателя и составляет величину (80-120) эВ. Последнее свидетельствует о том, что происхождение этих ионов не может быть увязано с упругим рассеянием ионов на нейтральных атомах, т.к. энергия упруго рассеянных ионов должна зависеть от разрядного напряжения, определяющего среднюю энергию ускоренных в разряде ионов. Однако экспериментальные данные свидетельствуют об обратном.

Оценки возможной величины тока ионов в радиальном потоке вследствие упругого рассеяния ионов на нейтральных атомах также подтверждают сделанный выше вывод. Для того чтобы ионы, рассеянные на нейтральных атомах, могли двигаться в радиальном направлении в окрестности выходной плоскости, их рассеяние должно произойти на небольшой длине непосредственно у выхода из двигателя. Если в качестве расчетной принять длину порядка  $\Delta=2$ см, то вероятность  $P_p$  упругого рассеяния ионов на такой длине составит величину порядка

$$P_p \approx 1 - exp\left(-\Delta/\lambda\right) = 1 - exp(-n_a \sigma \Delta) \tag{4.2}$$

где  $\lambda = 1/n_a \sigma$  – длина свободного пробега ионов в среде нейтральных атомов с концентрацией  $n_a$ ,  $\sigma$  – сечение упругого рассеяния ионов на нейтральных атомах [93], составляющее величину порядка 5·10<sup>-15</sup> см<sup>2</sup> [94].

Концентрация нейтральных атомов вблизи среза ускорительного канала

$$n_a \approx (1 - \eta_i)^{\dot{m}_a} /_{MV_a \pi db}$$

$$\tag{4.3}$$

где  $\eta_{i}$ ,  $\dot{m}_{a}$  - коэффициент переработки в ускорительном канале потока атомов в ионы и расход ксенона через ускорительный канал; M,  $V_{a}$  - масса и скорость атомов ксенона; d, b - средний диаметр и ширина ускорительного канала.

Оценки для исследованных режимов работы модели СПД-85П показывают, что характерное значение концентрации нейтральных атомов вблизи выходного сечения ускорительного канала могло составлять величину порядка  $1,2 \cdot 10^{12}$  1/см<sup>3</sup>. Соответственно, для длины свободного пробега ионов можно получить оценку  $\lambda \sim 1,6 \cdot 10^2$  см.

Таким образом, отношение  $\Delta/\lambda \sim 1,25 \cdot 10^{-2}$ , т.е. достаточно мало. Поэтому

$$P_{\rm p} \approx \frac{\Delta}{\lambda}$$
 (4.4)

и полная доля рассеянных ионов на длине порядка 2см непосредственно у выхода из двигателя может составлять порядка 1,25% от полного потока ионов. При расходе ксенона через ускорительный канал 2,5мг/с ионный ток на выходе из ускорительного канала составлял величину порядка 2А. Поэтому общая доля рассеянных у выхода из ускорительного канала ионов на длине порядка 2см могла составить не более 25мА. Из них на углы рассеяния порядка  $\vartheta$ =(90 ± 10) градусов рассеивается доля

$$P(\theta) \approx \frac{I(\theta)}{\sigma}$$
 (4.5)

Понятно, что эта доля рассеянных ионов на названные углы значительно меньше 1. Если принять значения  $I(\theta) \leq 5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> по данным работы [69], то получаются значения  $P(\theta) \leq 0,1$ , т.е. величина плотности тока чисто упруго рассеянных ионов, которые могли быть измерены энергоанализатором в рассматриваемом эксперименте должна была бы составить  $j_i \leq 0,1$ мА/см<sup>2</sup>. В то же время измеренные значения плотности тока составили (0,3-0,5)мА/см<sup>2</sup>, т.е. значительно больше. Следовательно, чисто упруго рассеянные ионы, повидимому, дают определенный вклад в полный радиальный ток, возможно, проявляющийся в высокоэнергетической части распределения ионов по энергии. Однако этот механизм не способен дать измеренные значения радиальных потоков ионов.

Что касается возможности ускорения ионов перепадом потенциала в плазме, то оценки, выполненные по измеренным значениям температуры электронов и концентрации плазмы, свидетельствуют о том, что этот механизм не может дать таких энергий ионов. Действительно, концентрация плазмы в месте расположения зондов составляла ~ $2\cdot10^{10}$  1/см<sup>3</sup>, а концентрация ионов на выходе из двигателя при разрядном напряжении 300В и расходе через ускорительный канал 2,5мг/с по оценкам составляет ~ $2\cdot10^{11}$  1/см<sup>3</sup>. При таком соотношении концентраций и температуре электронов (6-8)эВ перепад потенциалов в плазме не должен превышать ~(15-20)В. Это означает, что основная часть ионов в радиальных потоках с энергиями (80-120)эВ не могла быть получена за счет ускорения медленных ионов перепадом потенциалов плазмы между выходом из ускорительного канала и местом расположения зондов.

Таким образом, вероятнее всего радиальный поток ионов с достаточно большой энергией в основном формируется в разряде, часть зоны ускорения которого располагается вне ускорительного канала.

В целом результаты проведенных измерений позволили получить качественно новую информацию о потоках ионов, разлетающихся в окрестности выходной плоскости двигателя по направлениям, близким к радиальным, позволяющую сделать более определенные выводы о механизме их возникновения.

В прикладном плане важно то, что с повышением разрядного напряжения проблема эрозии элементов катода в соответствии с полученным данными не усугубляется. Тем не менее, поскольку проблема существует, в работе рассмотрены возможные пути защиты катодов. Самым простым среди них является выбор положения катода, при котором радиальные потоки ионов со средней энергией не должны попадать на поверхности элементов катода. Но важно понять, как при этом изменятся характеристики двигателя, и не затруднится ли его запуск. Поэтому было проведено исследования влияния положения катода на характеристики двигателя, работающего при повышенном разрядном напряжении.

# 4.3. Исследование характеристик модели СПД-85П при различных положениях катода при работе в широком диапазоне разрядных напряжений

Как было установлено в предыдущем разделе в радиальных ионных потоках присутствуют ионы с энергией 80-120эВ, которой достаточно для эрозии элементов катодов. Важным представляется то, что эти потоки ионов действительно имеют пространственную структуру, близкую к радиальной. Это подтверждается не только приведенной ранее картиной эрозии поджигающих электродов катодов (рисунок 4.2), но и характером эрозии поверхностей энергоанализатора после описанных в предыдущем разделе экспериментов (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 - Следы эрозии на энергоанализаторе после зондовых измерений модели СПД-85П

Как видно, и в этом случае отчетливо проявляется ленточный характер зоны эрозии. Это приводит к идее защиты катода путем размещения его в «теневых» областях, куда ионы с достаточно большой энергией не попадают. Естественно, возникает и вторая идея, состоящая в том, что возможна защита катода от эрозии его элементов путем размещения его за защитными экранами. Проблема состоит лишь в том, как положение катода в названных «теневых» областях или за защитным экраном скажется на тяговой эффективности двигателя. С учетом изложенного в НИИ ПМЭ МАИ при участии автора данной работы в качестве ответственного исполнителя было изучено влияние расположения катода в «теневых» областях, сформированной наружным полюсом магнитной системы, скажется на тяговом КПД двигателя. Для этого была проведена серия экспериментов с моделью СПД-85П при разных положениях катода.

Схема эксперимента показана на рисунке 4.7, а изменяемые размеры положения катода относительно анодного блока приведены в таблице 4.1, где отрицательные значения размера

Б означают положение верхней кромки катода за плоскостью магнитных полюсов. При наименьшем названном размере он находился вне пределов прямой видимости из сферической области на выходе разрядной камеры с радиусом порядка 1см. Таким образом, при этом положении катода ионы с достаточно большой энергией, которые должны двигаться практически прямолинейно, не должны попадать на поверхности катода.

Эксперименты проводились на режимах с разрядными напряжениями в диапазоне 300-800В с расходами рабочего тела через анод 2,1 и 2,5мг/с и на режиме, обеспечивающем мощность разряда 2,1кВт при напряжении 800В. Средние за время испытаний тяговые характеристики модели на выбранных режимах приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Параметры двигателя на режиме работы с разрядным напряжением 800В и мощностью около 2кВт при различных положениях катода

Положение катода	Nº1	Nº2	Nº3
Размер А, град	25	25	56
Размер Б, мм	12	-3	-12
Размер В, мм	123	123	118
Тяга, мН	70,75	70,8	73,9
Удельный импульс тяги, м/с	27093	28015	29709
Тяговый КПД	0,46	0,5	0,5



Рисунок 4.7 — Схема расположения катода относительно анодного блока. (а) — Катод выступает над выходной плоскостью модели; (б) — Катод за выходной плоскостью

В результате было получено, что тяговые характеристики модели с положением катода №3 оказались не хуже характеристик при других положениях катода (рисунок 4.8 (а) - (б)), хотя разность потенциалов катода и камеры возросла почти на 20В (рисунок 4.8 (в)), что должно свидетельствовать об увеличении затрат на транспортировку электронов к струе и должно приводить к уменьшению тягового КПД.



Рисунок 4.8. (а) — Зависимости «анодного» удельного импульса от времени для различных положений катода; (б) - Зависимости тягового КПД от времени для различных положений катода; (в) - Зависимости потенциала катод-земля от времени для различных положений катода

Этот неожиданный результат может быть объяснен тем, что в положении 3 возросла электронная температура, что способствовало повышению эффективности ионизации потока рабочего газа и некоторому повышению его использования в ускорительном канале.

В дальнейшем проводилась контрольная наработка длительностью 50 часов для положения катода №3, при котором получены наилучшие тяговые характеристики. Выбран режим работы с мощностью разряда 2,1кВт при разрядном напряжении 800В. Необходимо отметить, что еще перед началом испытаний на контрольную наработку выходные кольца имели значительное уширение, что объясняет немного меньшую величину удельного импульса тяги.

Характеристики модели во время контрольной наработки показаны на рисунках 4.9 (a) – (б).

121





Рисунок 4.9 (а) - Изменение разрядного тока в процессе контрольной наработки от времени; (б) - Изменение мощности разряда в процессе контрольной наработки от времени; (в) – Изменение «анодного» удельного импульса тяги в процессе контрольной наработки от времени; (г) - Изменение «анодного» тягового КПД в процессе контрольной наработки от времени

Видно, что, как и для результатов ресурсных испытаний модели СПД-85П, приведенных во второй главе, наблюдается постепенное снижение тяговых характеристик модели, что может быть объяснено уширением канала. Несмотря на сохранение негативной тенденции уменьшения удельного импульса при длительной наработке, свойственное модели СПД-85П при положении катода относительно анодного блока №1 (в такой конфигурации модель проходила ресурсные испытания (см. раздел 2.5.3)) положение катода №3 не дает какого-либо заметного ухудшения тяговых характеристик. Таким образом, полученный результат говорит о допустимости перемещения катода относительно анодного блока логосов, для его защиты от ионного распыления.

Для объяснения причины получения наилучших тяговых характеристик модели с катодом, размещенным за выходной плоскостью модели (положение №3), была выдвинута вторая версия, суть которой заключается в том, что при удалении катода поток ксенона из него создавал меньшую азимутальную неравномерность распределения концентрации нейтрального газа на выходе из двигателя и, соответственно, оказывалось меньшее негативное влияние этой неравномерности на рабочие процессы в двигателе.

Для проверки этой гипотезы был проведен следующий эксперимент. На модели СПД-85П с пластиной для крепления электростатических зондов имеется вырез для катода и именно в такой конфигурации модель проходила все выше перечисленные эксперименты. В настоящем эксперименте вырез для катода перекрывался пластиной с треугольным разрезом (рисунок 4.10 (a)), которая при движении вверх уменьшала отверстие для прохода слабоионизованной плазмы из катода в направлении основного разряда. При этом катод находился в положении №2, которое не выявило заметного отличия в тяговых характеристиках по сравнению с теми, что были получены для расположения катода, близкого к применяемому на СПД разработки ОКБ «Факел» (положение №1). Пластина с вырезом, перекрывающая прикатодную область, находилась под «плавающим» потенциалом и перемещалась к оси двигателя или от его оси (вверх-вниз на рисунке 4.10) с помощью линейного координатного устройства, соответственно уменьшая или увеличивая проходное отверстие, при этом зазор между пластиной с треугольным вырезом и пластиной для крепления зондов был меньше 1мм.



(а) (б) Рисунок 4.10 (а) – Схема перекрытия выходного отверстия катода; (б) - Фото модели СПД-85П с пластиной для перекрытия катодного отверстия

Испытания проводились на режиме с разрядным напряжением  $U_d$ =600В и расходом ксенона через анодный блок  $\dot{m}$ =2,48мг/с при токах в катушках намагничивания  $I_{m1}$ =5,6A и  $I_{m2}$ =5,1A, соответственно во внутренней и наружной катушках.

Эти эксперименты показали, что вплоть до положения, при котором остается минимальное отверстие для свободного выхода электронов из прикатодной области уменьшение проходного сечения практически не сказывается на работе двигателя (таблица 4.2).

Таблица 4.2 - Характеристики работы модели СПД-85П при различных величинах проходного отверстия между прикатодной области и пространством непосредственно перед срезом модели

Высота	Площадь	Разрядный	«Анодный»	«Анодный»	Потенциал
треугольного	треугольного	ток, А	удельный	тяговый КПД,	катод-земля,
отверстия,	отверстия,		импульс, м/с	%	В
мм	см <sup>2</sup>				
50	21	2,29	24394	55	-43,95
40	13,5	2,3	24173	54	-45,52
30	7,5	2,31	24032	53	-42,7
20	3,4	2,31	24014	53	-38,47
10	0,8	2,31	24141	53	-36,2
5	0,2	2,32	24037	53	-36,06

Итак, проведенные эксперименты показали, что уменьшение сечения для выхода из катода электронов и нейтрального газа не оказывает существенного влияния на тяговые характеристики двигателя. Следовательно, предположение о влиянии неравномерности распределения нейтрального газа на тяговые характеристики, также не подтверждается.

К положительным результатам эксперимента можно отнести подтверждение возможности защиты катода от ионного распыления с помощью дополнительных экранов, выполненных из стойкого к ионному распылению материала, т.к. перекрытие пространства между катодом и анодом мало изменяет характеристики двигателя. Поскольку работа самого катода при повышении разрядного напряжения также изменяется незначительно, возможность обеспечения большого ресурса катода с увеличением разрядного напряжения не вызывает сомнений.

### Заключение к Главе 4

В результате исследования радиальных ионных потоков в окрестности выходной плоскости СПД на различных режимах работы были получены новые данные об энергетических характеристиках радиальных ионных потоков. Так было установлено, что:

- в радиальных потоках в ближайшей окрестности выходной плоскости двигателя доминируют ионы со средней энергией в диапазоне 80-120эВ, которая слабо зависит от приложенного разрядного напряжения;

- источником ионов со средней энергией в радиальных ионных потоках является выходная часть ускоряющего слоя, выдвинутая за пределы ускорительного канала.

Проведенные эксперименты с различными положениями катода относительно анодного блока на разных режимах работы двигателя показали, что существует возможность перемещения катода в область за пределами прямой видимости из выходной части СИУ, выдвинутой из ускорительного канала, что обеспечивает минимальную интенсивность ионной бомбардировки катода из основного разряда в двигателе.

Показано также, что существует возможность защиты катода за счет установки дополнительных экранов из износостойкого материала без ухудшения тяговых характеристик двигателя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение к диссертационной работе сформулированы следующие выводы:

1. Проведен анализ состояния разработки СПД и показана актуальность разработки двигателей этого типа с повышенными до (25-30) км/с и более удельными импульсами тяги.

2. Проведен анализ возможных конструктивных схем СПД для работы на режимах с высоким удельным импульсом тяги. Показано, что предложенная в НИИ ПМЭ МАИ схема СПД с магнитным экраном внутри разрядной является перспективной для двигателей, работающих с высокими разрядными напряжениями и удельными импульсами тяги.

3. Проведено исследование лабораторных моделей СПД типа СПД-100П, СПД-85П и модернизированных моделей СПД-100ПМ и СПД-140ПМ с магнитным экраном внутри разрядной камеры, определены их интегральные характеристики и выявлены особенности работы двигателей такой схемы. В частности показано, что:

3.1. Двигатели выбранной схемы обладают значительными возможностями управления характеристиками магнитного поля в ускорительном канале и позволяют получать тяговые характеристики двигателя, сопоставимые с тяговыми характеристиками двигателей традиционной схемы при меньшей массе двигателя и меньших затратах на создание магнитного поля. Выбранная схема обеспечивает также получение меньшей протяженности слоя ионизации и ускорения и протяженности зон эрозии на стенках разрядной камеры и за счет этого обеспечивает возможность более длительной работы двигателя на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги.

3.2. При длительной работе двигателей такой схемы осаждение распыленного с выходных участков стенок разрядной камеры материала на поверхности магнитного экрана происходит в виде слабосвязанных с поверхностью порошкообразных частиц, неравномерное накопление которых на отдельных частях стенок разрядной камеры приводит к увеличению разрядного тока и снижению тяговой эффективности двигателя. Негативное влияние этого процесса можно снизить с помощью защитных экранов, выполненных из того же материала, что и материал выходных участков стенок разрядной камеры, а также за счет предварительного уширения выходной части разрядной камеры.

3.3. В двигателе выбранной схемы с изолированным («плавающим») магнитным экраном затруднено зажигание основного разряда при малых расходах через ускорительный канал из-за того, что магнитный экран приобретает низкий потенциал при работе катода в режиме поджига. Названное затруднение можно устранить соединением магнитного экрана с анодом непосредственно или через достаточно большое омическое сопротивление, а также переходом на последовательную двухступенчатую схему питания разряда, когда на магнитный экран подается отрицательное смещение (50—100)В относительно анода.

4. Исследованы возможности и разработаны способы повышения тягового КПД двигателя с магнитным экраном внутри разрядной камеры на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги. Показано, что выдвижением максимума распределения магнитного поля при одновременном сужении выходной части ускорительного канала можно снизить негативное влияние уширения ускорительного канала из-за износа ограничивающих его стенок на тяговые характеристики двигателя и обеспечить при уширениях выходной части ускорительного канала до 45 градусов на сторону уровень названных характеристик, близкий к уровню тяговых характеристик при исходной цилиндрической геометрии ускорительного канала. Показано также, что наилучшие тяговые характеристики двигателя на режиме с высоким удельным импульсом тяги получаются при реализации двухступенчатой схемы питания разряда. Данная схема позволяет расширить диапазон рабочих режимов СПД по суммарному разрядному напряжению до 1400В и обеспечить возможность получения «анодного» удельного импульса тяги до 40км/с и «анодного» тягового КПД порядка 0,6 при мощностях разряда двигателя масштаба СПД-140 до 5 кВт.

На основе этих исследований разработаны лабораторные модели двигателей СПД-100ПМ и СПД-140ПМ, способные работать как в одноступенчатом, так и в двухступенчатом режимах с удельными импульсами тяги до 30км/с и 35км/с, соответственно, и тяговым КПД более 50%. Эти модели могут быть использованы в качестве прототипов при разработке опытных образцов СПД с высоким удельным импульсом тяги.

5. Проведено исследование плотности тока и энергетических характеристик ионов в радиальных потоках, движущихся в окрестности выходной плоскости СПД, а также возможностей защиты катодов от распыления названными ионами. Показано, что в этих потоках значительную долю составляют ионы со средней энергией (80-120)эВ, слабо изменяющейся при изменении режима работы двигателя, и что основным источником этих ионов является выходная часть СИУ, вынесенная в современных СПД за пределы ускорительного канала. Показано также, что при боковом расположении катода он может

быть защищен размещением его вне пределов прямой видимости из упомянутой выходной части СИУ или экраном из износостойкого материала, размещенным между катодом и анодным блоком двигателя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Архипов, А. С. Стационарные плазменные двигатели Морозова: монография/
 А. С. Архипов, В. П. Ким, Е. К. Сидоренко. - М.: Издательство «МАИ», 2012. - 292с.

2. Khrabrov, V. A. Development and Flight Tests of the First Electric Propulsion System in Space / V. A. Khrabrov // Paper IEPC-2007-109 presented at 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy. - 2007. - September 17-20.

Козубский, К. Н. СПД работают в космосе / К. Н. Козубский, В. М. Мурашко,
 Ю. П. Рылов и др. // Физика плазмы. – 2003. - Т.29, №3. - С.277-292.

4. Горшков, О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда. – М.: «Машиностроение», 2008. - 280с.

5. Delgado, J. J. Space Systems Loral Electric Propulsion Subsystem: 10 Years of On-Orbit Operation / J. J. Delgado, J. A. Baldwin, R. L. Corey // Paper IEPC-2015-04/ISTS-2015-b-04 presented at 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Kobe, Japan. – 2015. – July 6-10.

6. Экспресс – АМ6. [Электронный ресурс] // Материалы с официального сайта АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева. URL; <u>http://www.iss-reshetnev.ru/projects</u>, (дата обращения: 07.05.2015)

7. Semenkin, A. V. Operating Envelopes of Thrusters with Anode Layer / A. V. Semenkin, S. O. Tverdokhlebov, V. I. Garkusha et al.// Paper IEPC-2001-013 presented at the 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Pasadena, California, USA. – 2001. - October 15-19.

8. Zakharenkov L. Development and Study of the Very High Specific Impulse Bismuth TAL / L. Zakharenkov, A. Semenkin, S Tverdokhlebov, A Sengupta, C Marrese-Reading // Paper IEPC-2007-128 presented at the 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy. – 2007. - September 17-20.

9. Lichtin, D. A. An Overview of Electric Propulsion Activities in US Industry – 2005 /
D. A. Lichtin // Paper AIAA 2005-3532 presented at the 41<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, Arizona, USA. – 2005. – July 10-13.

Spores, R. A. Overview of the USAF Electric Propulsion Program / R. A. Spores, G.
 G. Spanjers, M. Birkan, T. J. Lawrence // Paper AIAA 2001-3225 presented at 37<sup>th</sup> Joint
 Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, Utah, USA. – 2001. – July 8-11.

11. Hofer, R. R. Evaluation of a 4,5kW Commercial Hall Thruster System for NASA Science Missions / R. R. Hofer, T. M. Randolph, D. Y. Oh, J. S. Snyder, K. H. de Grys // Paper AIAA-2006-4469 presented at the 42<sup>sd</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, USA. – 2006. - July 9 -12.

12. Khayms, V. Status of Hall Integration Activities at Lockheed Martin Space System Company / V. Khayms, L. Werthman, K. Kannenberg, S. Hu, B. Emgushov, J. W. Meyer // Paper AIAA-2003-5261 presented at 39<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference

13. Casaregola, C. Electric Propulsion for Commercial Applications: In-Flight Experience and Perspective at Eutelsat / C. Casaregola// Paper IEPC-2013-332 presented at the  $33^{rd}$  International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, D.C., USA. – 2013. - October 6 – 10.

14. Koppel, C. R. The SMART-1 Hall Effect Thruster Around the Moon: In Flight Experience / C. R. Koppel, D. Estublier // Paper IEPC-2005-119 presented at the 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA. – 2005. - October 31-November 4.

15. Gonzalez, J. European Space Agency Activities in Electric Propulsion / J. Gonzalez // Paper IEPC-2013-037 presented at the  $33^{rd}$  International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, D.C., USA. – 2013. - October 6 – 10.

Manzella, D. Hall Thruster Technology for NASA Science Mission / D. Manzella,
D. Oh, R. Aadland // Paper AIAA-2005-3675 presented at the 41<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, USA. – 2005. - July 10-13.

 Gonzalez, J. ESA Electric Propulsion Activities / J. Gonzalez, G. Saccoccia // Paper IEPC-2011-329 presented at the 32<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. – 2011. - September 11-15.

18. Christensen, J. A. Boeing EDD Electric Propulsion Programs Overview / J. A. Christensen// Paper AIAA-2004-3967 presented at the 40<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Fort Launderdale, Florida, USA. – 2004. - July 11-14.

19. Saccoccia, G. Introduction to the European Activities in Electric Propulsion / G. Saccoccia // Paper IEPC-2003-341 presented at the 28<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France. – 2003. - March 17-21.

20. Kajiwara, K. ETS-VIII Ion Engine and its Operation on Orbit / K. Kajiwara, M. Ikeda, H. Kohata // Paper IEPC-2009-048 presented at the 31st International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA. – 2009. - September 20 – 24.

21. Goebel, D. M. Performance of XIPS Electric Propulsion in On-orbit Station Keeping of the Boeing 702 Spacecraft / D. M. Goebel, M. Martinez-Lavin, T. A. Bond et al.// Paper AIAA-2002-4348 presented at the 38<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana, USA. – 2002. - July 7-10.

Chien, K.-R. L-3 Communications ETI Electric Propulsion Overview / K.-R. Chien,
 S. L. Hart, W. G. Tighe // Paper IEPC-2005-315 presented at the 29<sup>th</sup> International Electric
 Propulsion Conference, Princeton University, USA. – 2005. - October 31- November 4.

23. Garner, Ch. E. The Dawn of Vesta Science / Ch. E Garner, M. D. Rayman, J. R Brophy, S. C. Mikes // Paper IEPC-2011-326 presented at the 32<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. – 2011. - September 11-15.

24. Patterson, M. J. NEXT: NASA's Evolutionary Xenon Thruster / M. J. Patterson, J.
E. Foster, T. W. Haag // Paper AIAA-2002-3832 presented 38<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana, USA. – 2002. - July 7-10.

25. Hoskins, W. A. 30 Years of Electric Propulsion Flight Experience Aerojet Rocketdyne / W. A. Hoskins, R. J. Cassady, O. Morgan, R. M. Myers, F. Wilson, D. Q. King, K. de Grys // Paper IEPC-2013-439 presented at the 33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, D.C., USA. – 2013. - October 6 – 10.

26. Killinger, R. RITA Ion Propulsion for ARTEMIS – Results Close to the Completion of the Life Test / R. Killinger, H. Bassner, H. Leiter, R. Kukies // Paper AIAA-2001-3490 presented at the 37<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, USA. – 2001. - July 8-11.

27. Kuninaka, H. Hayabusa Asteroid Explorer Powered by Ion Engines on the way to Earth / H. Kuninaka, K. Nishiyama, Yu. Shimizu // Paper IEPC-2009-267 presented at the 31st International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA. -2009. - September 20 – 24.

28. Koch, N. The HEMPT Concept - A Survey on Theoretical Considerations and Experimental Evidences / N. Koch, M. Schirra, S. Weis et al.// Paper IEPC-2011-236 presented at the 32<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. – 2011. - September 11-15.

29. Леб, Х. В. Крупногабаритные высокочастотные ионные двигатели [Электронный ресурс] / Х. В. Леб, Г. А. Попов, В. А. Обухов и др.// Электронный журнал

«Труды МАИ». – 2003. - №60. – Режим доступа: <u>https:</u> //www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35371, (дата обращения: 08.05.2015).

30. Gavryshin, V. M. Physical and Technical Bases of the SPT Development / V. M. Gavryshin, V. Kim, V. I. Kozlov et al.// Paper IEPC-1995-38 presented at the 24<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia. – 1995. - September.

31. Gnedenko, V. G. Prospects for Using Metals as Propellant in Stationary Plasma Engines of Hall-Type / V. G. Gnedenko, V. A. Petrosov, A. V. Trofimov // Paper IEPC-1995-54 presented at the 24<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia. – 1995. - September.

32. Kim, V. Investigation of SPT performance and particularities of its operation with Kr and Kr/Xe mixtures / V. Kim, G. Popov, V. Kozlov // Paper IEPC-2001-065 presented at the 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Pasadena, California, USA. – 2001. - October 15-19.

33. Manzella, D. High Voltage SPT Performance / D. Manzella, D. T. Jacobson, R. S. Jancovsky // Paper AIAA-2001-3774 presented at the 37<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, USA. – 2001. - July 8-11.

34. Novikov, I. K. Main Directions of Electric Propulsion Development in Russia / I. K. Novikov // Paper IEPC-2011-331 presented at the 32<sup>nd</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. – 2011. - September 11-15.

35. Bouchoule, A. Investigation of the Operation under High Discharge Voltages / A. Bouchoule, A. Lazurenko, V. Vial et al // Paper IEPC-2003-211 presented at the 28<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France. – 2003. - March 17-21.

36. Ганкин, В.И. Создание Холловского Двигателя КМ-88 с Высоким Удельным Импульсом / В. И. Ганкин, О. А. Горшков, О. В. Гришанов и др. // Вестник Московского Авиационного Института. – 2010. - Том 17, №4. - С. 137-143.

37. Albarede, L. Characteristics of PPS-1350 type thrusters under increased discharge voltages and comparison with hybrid codes simulation results / L. Albarede, A. Bouchoule, A. Lazurenko et al // Paper IEPC-2005-136 presented at the 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA. – 2005. - October 31- November 4.

38. Duchemin, O. Development and Testing of a High-Power Hall Thruster / O. Duchemin, P. Dumazert, S. D. Clark et al. // Paper IEPC-2003-032 presented at the 28<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France. – 2003. - March 17-21.

39. Duchemin, O. Stretching the Operational Envelope of the PPS-X000 Plasma Thruster / O. Duchemin, P Dumazert, N Cornu et al.// Paper AIAA-2004-3605 presented at the 40<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Fort Launderdale, Florida, USA. – 2004. - July 11-14.

40. Szabo, J. J. Characterization of a High Specific Impulse Xenon Hall Effect Thruster /
J. J. Szabo, Ya. Azziz // Paper IEPC-2005-324 presented at the 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA. – 2005. - October 31- November 4.

41. Kamhawi, H. In-space Propulsion High Voltage Hall Accelerator Development Project Overview / H. Kamhawi, D. Manzella, L. Pinero et al. // Paper AIAA-2009-5282 presented at the 45<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Denver, Colorado, USA. – 2009. -August 2-5.

42. Hofer, R. R. Development and Characterization of High-Efficiency, High-Specific Impulse Xenon Hall Thrusters // Ph. D. Thesis, the University of Michigan. – 2004. - 358p.

43. Mikellides, I. G. Magnetic Shielding of the Acceleration Channel Walls in a Long-Life Hall Thruster / I. G. Mikellides, I. Katz, R. R. Hofer, D. M. Goebel, K. de Grys, A. Mathers // Paper AIAA 2010-6942 presented at the 46<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, USA. – 2010. – July 25-28.

44. Mikellides, I. G. Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase I: Numerical Simulations / I. G. Mikellides, I. Katz, R. R. Hofer // Paper AIAA 2011-5809 presented at the 47<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, California, USA, - 2011. – July 31 – August 03.

45. Hofer, R. R. Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase II: Experiments / R. R. Hofer, D. M. Goebel, I. G. Mikellides, I. Katz // Paper AIAA 2012-3788 presented at the 48<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Atlanta, Georgia, USA, - 2012. – July 30 – August 01.

46. Mikellides, I. G. Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase III: Comparison of Theory with Experiment / I. G. Mikellides, I. Katz, R. R. Hofer, D. M. Goebel // Paper AIAA 2012-3789 presented at the 48<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Atlanta, Georgia, USA, - 2012. – July 30 – August 01.

47. Takegahara, H. Overview of Electric Propulsion Research Activities in Japan / H. Takegahara, H. Kuninaka, I. Funaki, A. Ando, K. Komurasaki et al. // Paper IEPC-2015-01/ISTS-2015-b-01 presented at 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Kobe, Japan. – 2015. – July 6-10.

48. S. Cho. Particle Simulation of High Specific Impulse Operation of Low-Erosion Magnetic Layer Type Hall Thruster / S. Cho, H. Watanabe, K. Kubota, S. Iihara, K. Fuchigami, K. Uematsu, I. Funaki // Paper IEPC-2015-251/ISTS-2015-b-251 presented at 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Kobe, Japan. – 2015. – July 6-10.

49. Mikellides, I. G. Hall2De Simulations of a 12.5-kW Magnetically Shielded Hall Thruster for the NASA Solar Electric Propulsion Technology Demonstration Mission / I. G. Mikellides, A. L. Ortega, R. R. Hofer, J. E. Polk, H. Kamhawi, J. Yim, J. Myers. // Paper IEPC-2015-254/ISTS-2015-b-254 presented at 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Kobe, Japan. – 2015. – July 6-10.

50. Hofer, R. R. Wear test of a magnetically shielded Hall thruster at 3000 seconds specific impulse / R. R. Hofer, B. A. Jorns, J. E. Polk, I. G. Mikellides, J. S. Snyder // Paper IEPC-2013-033 presented at the  $33^{rd}$  International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, D.C., USA. – 2013. - October 6 – 10.

51. Popov, G. Investigation of the Possibility to Create the Stationary Plasma Thrusters (SPT) with High Specific Impulse / G. Popov, V Kim, V. Kozlov et al. // Paper IAC-11.C4.4.7 in proceedings of the 62<sup>nd</sup> International Astronautical Federation Congress, Capetown, South Africa Republic. – 2011. - October 3-7.

52. Kim, V. Development of a Software for Numerical Simulation of the Discharge Chamber Wall Erosion by the Accelerated Ions" / V. Kim, V. Abgaryan, P Dumazert et al. // Paper at the 3<sup>rd</sup> International Spacecraft Propulsion, Chia Laguna, Italy. - 2004

53. Arkhipov, B. SPT-100 Module Lifetime Test Results / B. Arkhipov, R. Gnizdor, K. Kozubsky et al. / B. Arkhipov, R. Gnizdor, K. Kozubsky et al. // Paper AIAA-1994-2859 presented at the 30<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, Indianapolis, Indiana, USA. - 1994.

54. Архипов Б. А., Бишаев А. М., Гаврюшин В. М. и др. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2030134С1 Н05Н 1/54, 02.11.1992, Дата публикации 27.02.1995.

55. Хартов С. А., Жакулов А. Б., Горшков О. А., Ризаханов Р. Н. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2139646 Н05Н 1/54, 07.04.1998, Дата публикации 10.10.1999.

56. Сорокин И. Б., Гопанчук В. В. Ускоритель с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2045134 Н05Н 1/54, 15.03.1993, дата публикации 27.09.1995.

57. Potapenko, M. Yu. Characteristic Relationship between Dimensions and Parameters of a Hybrid Plasma Thruster / M. Yu Potapenko, V. V. Gopanchuk // Paper IEPC-2011-042 presented at the 32<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. – 2011. - September 11-15.

58. Грдличко Д. П., Ким В., Козлов В. И. и др. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2414107 Н05Н 1/54, 18.03.2010, Бюл. №7, 10.03.2011.

59. Асхабов, С. Н. Исследование Струи Стационарного Плазменного Ускорителя с Замкнутым Дрейфом Электронов (УЗДП) / С. Н. Асхабов, М. П. Бургасов, А. Н. Веселовзоров и др. // Физика Плазмы. - 1981. - Том 7, Вып.1. – С. 225-230.

60. Absalamov, S. K. Measurement of Plasma Parameters in the Stationary Plasma Thruster (SPT-100) Plume and its Effect on Spacecraft Components / S. K. Absalamov, V. B. Andreev, T. Colbert et al. // Paper AIAA-1992-3156 presented at the 28<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, TN, USA. – 1992. - July 6-8.

61. Manzella, D. H. Hall Thruster Ion Beam Characterization / D. H. Manzella, J. M. Sankovic // Paper AIAA-1995-2927 presented at the 31<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, CA, USA. – 1995. - July 10-12.

Kim, V. Plasma Parameter Distribution Determination in SPT-70 Plume / V. Kim,
 V. Kozlov, G. Popov, A. Skrylnikov // Paper IEPC-2003-107 presented at the 28<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France. – 2003. - March 17-21.

63. Manzella, D. H. Stationary Plasma Thruster Ion Velocity Distribution / D. H. Manzella // Paper AIAA-1994-3141 presented at the 30<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, Indianapolis, IN, USA. – 1994. - June 17-19.

64. King, L. B. Ion-Energy Diagnostics in the Plasma Exhaust Plume of a Hall Thruster /
L. B. King, A. D. Gallimore // Journal of Propulsion and Power, September – October 2000, Vol. 16, No. 5. – pp. 916 – 922.

65. King, L. B. Transport-Property Measurements in the Plume of an SPT-100 Hall Thruster / L. B. King, A. D. Gallimore, C. M. Marrese // Journal of Propulsion and Power, May – June 1998. – Vol. 14, No. 3. – pp. 327-335.

66. Ohler, S. Microwave Plume Measurements of a Closed Drift Hall Thruster / S. Ohler, B. E. Gilchrist, A. Gallimore // Journal of Propulsion and Power, November – December 1998. – Vol. 14, No. 6. – pp. 1016 – 1021.

67. King, L. B. Mass Spectral Measurements in the Plume of an SPT-100 Hall Thruster // Journal of Propulsion and Power, November – December 2000. – Vol. 16, No 6. – pp. 1086 – 1092.

68. King, L. B. Transport-Property and Mass Spectral Measurements in the Plasma Exhaust Plume of a Hall-Effect Space Propulsion System // Ph. D. Thesis. – 1998. - 238p.

69. Katz, I. A Hall Effect Thruster Plume Model Including Large-Angle Elastic Scattering / I. Katz, G. Jongeward, V. Davis et al. // Paper AIAA-2001-3355 presented at the 37<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, USA. – 2001. - July 8-11.

70. Pollard, J. E. Ion Flux, Energy, and Charge-State Measurements for the BPT-4000 Hall Thruster / J. E. Pollard, K. D. Diamant, V. Khayms et al. // Paper AIAA-2001-3351

presented at the 37<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, USA. – 2001. - July 8-11.

71. Sullivan, R. M. Investigation of High-Energy Ions with High-Angle Trajectories in Hall Thruster Plumes / P. M. Sullivan, P. A. Torrey, L. K. Johnson // Paper IEPC-2007-031 presented at 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy. – 2007. - September 17-20.

72. Azziz, Ya. Experimental and Theoretical Characterization of a Hall Thruster Plume// Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. – 2007. - 230p.

73. Kim, V. High Voltage SPT Studies / V. Kim, V. Kozlov, G. Popov et al. // Paper SP2008-127 in proceedings of the 5<sup>th</sup> International Spacecraft Propulsion Conference, Heraclion, Greece. – 2008. - May 5-9.

74. Архипов, А. С. Исследование характеристик струй стационарных плазменных двигателей (СПД) при повышенных разрядных напряжениях: дисс... канд. техн. наук:
 05.07.05 / Архипов Алексей Сергеевич. – М., 2010. – 152 с.

75. Manzella, D. Hall Thruster Plume Measurements On-board the Russian Express Satellites / D. Manzella, R. Jankovsky, F. Elliot et al. // Paper IEPC-2001-044 presented at the 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Pasadena, California, USA. – 2001. - October 15-19.

76. Sommerville, J. D. Effect of Cathode Position on Hall-Effect Thruster Performance and Cathode Coupling Voltage / J. D. Sommerville, L. B. King // Paper IEPC-2007-078 presented at 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy. – 2007. - September 17-20.

77. Исследования в обеспечение создания отраслевого методического задела по условиям минимизации механического и эрозионного взаимодействия струй СПД на элементы конструкции КА, этап 1 «Разработка методических рекомендаций и предложений по разделу «Руководства для конструкторов» в части экспериментального определения параметров плазменной струи ЭРД». Шифр НИР: «Норма-РКТ-ПМЭ», НТО №1-03-11-2003: отчет о НИР / Ким В., Козлов В.И., Скрыльников А.И. и др. – М.: НИИ ПМЭ МАИ, 2003.

78. Козлов, О.В. Электрический зонд в плазме. / О. В. Козлов. – М.: Энергоатомиздат, 1960. – 291 с.

79. King, L. B. A.D. Propellant lionization and Mass Spectral Measurements in the Plume of an SPT-100 / L. B. King, A. D. Gallimore // Paper AIAA-1998-3657 presented at the 34th Joint Propulsion Conference, Cleveland, USA. – 1998. - July 12-15.

80. Гаврюшин, В. М. О влиянии характеристик магнитного поля на параметры ионного потока на выходе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) / В. М. Гаврюшин, В Ким. // Журнал технической физики. - 1981. - Том 51, №4. - С. 850-852.

81. Ким, В. Анализ закономерностей износа изолятора, ограничивающего ускорительный канал УЗДП / В. Ким // Источники и ускорители плазмы, Харьков: ХАИ. – 1982. - Вып. 6. – С. 7-17.

82. Ким В. Разработка физико-технических основ проектирования стационарных плазменных двигателей : дис. ... д-ра. техн. наук:05.07.05 / Ким Владимир – М., 1984.

83. Бугрова, А. И. Современное состояние физических исследований в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения / А. И. Бугрова, В. П. Ким // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М.: «Наука», 1984. С. 107-129.

84. Shagayda, A. A. The Effect of Wall Erosion on the Performance of Hall Thrusters /
 A. A. Shagayda, O. A. Gorshkov, D. A. Tomilin // Paper IEPC-2011-025 presented at the 32<sup>th</sup>
 International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. – 2011. - September 11-15.

85. Ресурсные испытания лабораторной модели блока коррекции на базе высокоимпульсного двигателя, включая параметрические испытания Шифр НИР: «СПД-85П.301.2013.202ОТЧ»: отчет о НИР / Грихин Г. С., Гниздор Р. Ю., Ким В. и др. – Калининград: Опытное конструкторское бюро «Факел», 2013. – 46 с.

86. Семенкин, А. В. Разработка и экспериментальные исследования высокоресурсной схемы электроракетного двигателя с анодным слоем // Сб. нач. тр. – Королев: ЦНИИмаш, 2006. С. 93 – 109.

87. Проведение 300-часовых испытаний образца двигателя типа СПД-100Д (п. 2.3, 3, 6 ТЗ): отчет по этапу 1 НИР «Ресурс – НИИ ПМЭ» / Ким В., Козлов В. И., Сидоренко Е. К. и др. – М.: НИИ ПМЭ МАИ, 2009.

Белан, Н. В. Стационарные плазменные двигатели: учеб. пособие / Н. В. Белан,
 В. П. Ким, А. И. Оранский, В. Б. Тихонов. – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1989. – 314с.

89. De Grys, K. Demonstration of 10400 Hours of Operation on a 4.5kW Qualification Model Hall Thruster / K. de Grys, A. Mathers, B. Welander, V. Khayms // Paper AIAA-2010-6698 presented at the 46<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, TN, USA. – 2010. - July 25-28.

90. Ortega, A. L. Hall2De numerical simulations for the assessment of pole erosion in a magnetically shielded Hall thruster / A. L. Ortega, I. G. Mikellides, I. Katz // Paper IEPC-2015-

249/ISTS-2015-b-249 presented at 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Kobe, Japan. – 2015. – July 6-10.

91. Conversano, R. W. Magnetically Shielded Miniature Hall Thruster: Design Improvement and Performance Analysis / R. W. Conversano, D. M. Goebel, R. R. Hofer, I. G. Mikellides, I. Katz, R. E. Wirz // Paper IEPC-2015-100/ISTS-2015-b-100 presented at 34<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Kobe, Japan. – 2015. – July 6-10.

92. Ким, В. П. Исследование параметров плазмы и радиальных потоков ионов вблизи выходной плоскости СПД / В. П. Ким, Д. В. Меркурьев, Е. К. Сидоренко // Вестник Московского Авиационного Института, - 2014. - Т.21, №1. - С. 95-103.

93. Райзер, Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов / Ю. П. Райзер // М.: «Наука», 1980. – 585 с.

94. Хастед Дж. Физика атомных столкновений / Дж. Хастед // М.: «Мир», 1965. – 710 с.