

На правах рукописи



МЕРКУРЬЕВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ

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

Специальность 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2015

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

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Ким Владимир Павлович

Официальные оппоненты: **Кралькина Елена Александровна**
доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВПО
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», ведущий научный сотрудник
кафедры физической электроники

Бишаев Андрей Михайлович
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет информационных технологий,
радиотехники и электроники» (МИРЭА, МГУПИ),
доцент кафедры физики

Ведущая организация: АО «Научно-производственная корпорация
«Космические системы мониторинга, информационно
– управляющие и электромеханические комплексы»
имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация ВНИИЭМ»)

Защита состоится «23» ноября 2015г. в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», https://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=60426

Автореферат разослан «__» _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

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 (ЭРД) с улучшенными выходными параметрами, в том числе, двигатели с повышенными удельными импульсами тяги. 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 ЭРД с повышенным удельным импульсом тяги на основе СПД. Серийные отечественные СПД, разрабатываемые ОКБ «Факел», имеют удельный импульс тяги не более 17км/с (1700с), что значительно меньше оптимальных значений удельного импульса тяги, составляющих для решения задач коррекции орбит современных и перспективных геостационарных КА (25-30)км/с. В исследовательском центре имени М.В. Келдыша создан двигатель КМ-60 с удельным импульсом тяги 20км/с (2000с). В ОКБ «Факел» и в центре им. М.В. 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 представляется 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 двигателя. Как показывают проведенные ранее исследования, это приводит к нежелательным изменениям в протекании рабочих процессов и, в конечном счете, к снижению тягового коэффициента полезного действия (КПД) и увеличению скоростей износа стенок разрядной камеры. Кроме того, увеличение энергии ионов с увеличением разрядного напряжения может приводить к увеличению скорости износа элементов конструкции катода, 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 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, на различных режимах работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показано, что при работе СПД выбранной схемы с магнитным экраном внутри разрядной камеры, можно снизить величину разрядного тока при повышенных разрядных напряжениях обеспечением отрицательного смещения потенциала магнитного экрана относительно анода на (50-100)В и за счет этого реализовать режимы работы двигателя с более высокой тяговой эффективностью.

2. Показано, что причиной затрудненного зажигания основного разряда в двигателе с изолированным магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры, является низкий уровень потенциала этого экрана при работе катода в режиме поджига 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 (СИУ), выдвинутая в современных СПД за выходную плоскость разрядной камеры.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Показана перспективность схемы СПД с магнитным экраном внутри разрядной камеры и разработаны возможные схемы питания разряда в двигателе такой схемы, обеспечивающие возможность работы двигателя с мощностью до 5 кВт с тяговым КПД не ниже 50% 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, этап №1 базовой части государственного задания №648 Министерства образования и науки РФ на проведение научных исследований в МАИ.

Методы исследования: экспериментальные исследования и математическое моделирование отдельных процессов.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов, сделанных в работе, определяется тем, что они проверены на трех моделях СПД разных размеров, которые проходили испытания не только в НИИ ПМЭ МАИ, но и в ОКБ «Факел». При этом были получены сопоставимые результаты.

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

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 выдвигания слоя ионизации и ускорения за плоскость полюсов магнитной системы за счет соответствующего профилирования продольного распределения индукции магнитного поля.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в разработке, исследовании и оптимизации конструкции моделей СПД с магнитным экраном внутри разрядной камеры, осуществлял анализ и обобщение результатов исследований, 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.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на 12-й и 13-й международных конференциях «Авиация и космонавтика», 34-ой международной конференции по ЭРД (34th International Electric Propulsion Conference), V-й Российско-Германской конференции «Электрические ракетные двигатели. Новые вызовы» по электрическим ракетным двигателям и их применению, а также на научно-технических советах НИИ ПМЭ МАИ.

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 наименования. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Основное содержание работы

Во **Введении** дана общая характеристика работы, ее актуальности, практической ценности, научной новизны, сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе приводится анализ состояния исследований и разработки электроракетных двигателей (ЭРД), которые нашли применение в космической технике или могут в ближайшее время пройти летные испытания. В результате показано, что для повышения конкурентоспособности СПД целесообразна разработка двигателей этого типа с более высокими удельными импульсами тяги и выделены проблемы, которые для этого должны быть решены. Показано также, что решить названные проблемы можно за счет совершенствования конструктивной схемы двигателя и, в первую очередь, его магнитной системы. Кроме того, в СПД с повышенным разрядным напряжением возрастает риск возникновения пробоев между элементами, находящимися под анодным или близким к нему потенциалом и другими проводящими элементами двигателя. Поэтому необходимо также повышать электрическую прочность конструкции двигателя. Все это требует совершенствования конструктивной схемы двигателя. В результате анализа возможных конструктивных схем высоковольтных СПД

была выбрана предложенная в НИИ ПМЭ МАИ схема двигателя с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры (рисунок 1). В конструкции СПД-100П он изолирован от других металлических элементов двигателя керамическим корпусом, что уменьшает вероятность электрического пробоя с него на другие элементы конструкции.

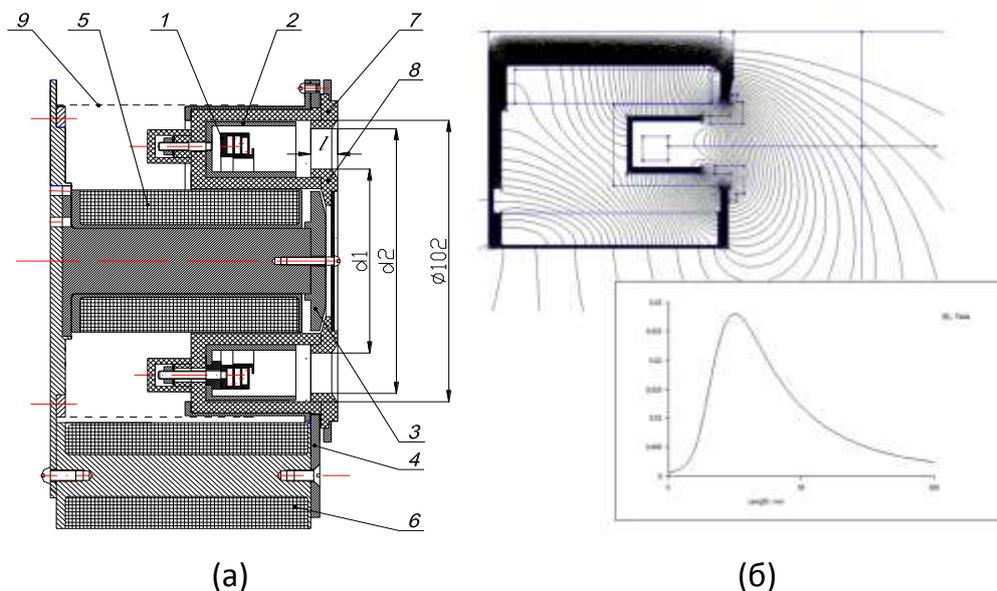


Рисунок 1 (а) – Конструктивная схема модели двигателя СПД-100П с магнитным экраном внутри разрядной камеры (1 –анод –газораспределитель; 2 – магнитный экран; 3,4 - магнитные полюса; 5,6 – катушки намагничивания; 7,8 - выходные кольца разрядной камеры; 9 – экранирующая сетка); (б) – Результаты моделирования магнитного поля в этой модели

Размещение магнитного экрана, выполненного из теплостойкого магнитомягкого материала (пермендюра), 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. Модели с магнитным экраном внутри разрядной камеры могут работать также как в одноступенчатом режиме, так и в двухступенчатом, если изолировать магнитный экран и снабдить его электрическим выводом. В случае двухступенчатого режима экран исполняет роль промежуточного электрода или катода в разряде первой ступени, который может способствовать более эффективной ионизации при низких расходах рабочего газа. Кроме того, при разных его потенциалах он может выполнять

функцию электрода, управляющего переносом электронов в прианодной зоне. И, наконец, его можно соединить с анодом и получить версию «двигателя с магнитным анодом». Таким образом, модели такой схемы обладают расширенными функциональными возможностями. С учетом всего изложенного представленная схема была выбрана в качестве базовой для исследования особенностей работы и характеристик двигателей такой схемы.

В первой главе 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 параметры ионов в радиальных потоках вблизи двигателя и их зависимость от режимов работы двигателя с тем, чтобы получить новые данные для анализа происхождения рассматриваемых ионов с достаточно большой энергией.

Во второй главе приведено 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. Эксперименты проводились на стенде У-2В-1 с вакуумной камерой диаметром 2м и рабочей длиной до 3м, откачиваемой 6 высоковакуумными криогенными насосами типа Velco 630Xe, турбомолекулярным насосом FT-6300WH и форвакуумным насосом iN1000 DOC Edwards, обеспечивавшими остаточное давление в вакуумной камере при длительной откачке ниже $1,5 \cdot 10^{-4}$ Па и рабочее давление в камере при работе моделей СПД-100П и СПД-140П с расходами ксенона через ускорительный канал до 5мг/с не выше $4 \cdot 10^{-3}$ Па.

Стенд оборудован источниками питания для работы СПД с одним или двумя катодами с рабочими напряжениями до 1500В, источниками для питания цепей накала катодов и катушек намагничивания испытываемых двигателей, средствами измерения тяги, развиваемой двигателями масштаба СПД-100 и СПД-140, с точностью не хуже 4%, приборами для измерения токов и напряжений

питания класса 0,5, средствами измерения расхода ксенона через ускорительный канал и катод с погрешностью не более 3%, а также приборами для измерения среднеквадратичной амплитуды колебаний разрядного тока и разрядного напряжения, системой измерения параметров ускоренного потока ионов в струе СПД на основе электростатических зондов и электростатического энергоанализатора, позволяющей оценивать расходимость струи и определять энергетические характеристики ионов, истекающих из двигателя по разным направлениям. Все это позволяло осуществлять достаточно полную оценку характеристик двигателя.

С учетом относительно больших ошибок измерений основных параметров двигателей в работе использовался метод сравнительных испытаний, который позволял выявлять лучшие варианты схем питания двигателя и режимов его работы, поскольку при измерениях параметров одними и теми же средствами на сопоставимых режимах работы систематические ошибки можно считать одинаковыми.

Предварительная оптимизация магнитного поля в ускорительном канале путем подбора положения магнитного экрана и его размеров при питании разряда по одноступенчатой схеме и по двухступенчатой схеме питания разряда показали, что эта модель обеспечивает уровень тяговых характеристик, близкий к уровню лучших моделей двигателя традиционной схемы. Они показали также, что при переходе к низким расходам рабочего газа, когда с увеличением напряжения выше определенного значения происходит возрастание разрядного тока без соответствующего возрастания тяги, можно за счет перехода к двухступенчатой схеме питания разряда получить небольшое повышение тягового КПД двигателя, по крайней мере, при ускоряющих напряжениях (700-1000) В.

Эксперименты показали также, что положительный эффект достигается уже при смещениях магнитного экрана от -50В до -100В. При этом ток в цепи магнитного экрана оказывается незначительным. Объяснить полученный эффект можно тем, что при пониженных потенциалах магнитного экрана уменьшается взаимодействие потока электронов с поверхностью экрана и, следовательно,

уменьшаются потери энергии электронов, пристеночная проводимость и, соответственно, электронная составляющая разрядного тока. Важно также то, что полученный эффект позволяет при одной и той же суммарной мощности выйти на более высокие разрядные напряжения и за счет этого получить более высокий удельный импульс.

Для оценки возможности обеспечения достаточно большого ресурса двигателя выбранной схемы были проведены эрозионные испытания оптимизированной модели СПД-100П на режиме работы с анодным расходом рабочего газа (ксенона) $m_a=2,2\text{мг/с}$, напряжении на первой ступени – 50В, напряжении на второй ступени 750В и мощности разряда порядка 2кВт. Оценка была проведена с использованием разработанной в НИИ ПМЭ МАИ поэтапной методики ожидаемого времени износа выходных элементов разрядной камеры до выхода ионного потока на магнитные полюса. При реализации этой методики на первом этапе были проведены эрозионные испытания для определения распыляющей способности ионного потока. Затем было осуществлено расчетное определение профилей стенок до момента времени, когда средний угол их разворота из-за износа составил около 30 градусов, механическое уширение ускорительного канала до расчетного с последующей приработкой профилей стенок и определен новый профиль стенок. С использованием полученных профилей стенок после первого этапа эрозионных испытаний и после приработки был осуществлен прогноз дальнейшего износа стенок. Полученные результаты показали, что в силу замедления износа по мере разворота профилей стенок и уменьшения плотности потока ионов на них выход поверхностей износа на полюса магнитной системы должен произойти не ранее, чем через (5-10) тысяч часов наработки двигателя. Таким образом, было получено, что проведенной оптимизацией магнитной системы созданы предпосылки для получения достаточно большого ресурса двигателя на выбранном режиме работы.

В ходе эрозионных испытаний также осуществлялся контроль стабильности работы двигателя при суммарной наработке около 50 часов. Результаты испытаний показали, что при уширении ускорительного канала снизились на (5-

7)% значения удельного импульса тяги и значения тягового КПД примерно на 10%. Этот результат совпадает с полученными и другими авторами и для других моделей СПД. Он объясняется уменьшением плотности потока рабочего вещества при уширении ускорительного канала, а также загрязнением стенок распыленным с выходных участков стенок материалом.

Помимо этого следует отметить, что в модели СПД-100П изменился характер загрязнения стенок, а именно: во время работы двигателя на поверхности магнитного экрана осаждается распыленный с выходных участков стенок разрядной камеры материал, который приводит к образованию слоев порошка на указанной поверхности. Образование слоев упомянутого порошка разной толщины в различных частях разрядной камеры со временем приводит к периодическим выбросам раскаленных частиц, сопровождающихся бросками разрядного тока, а также к образованию длительно существующих разогретых образований, приводящих к увеличению разрядного тока. Это можно объяснить тем, что дрейфующие электроны взаимодействуют с наиболее высокими из названных образований и разогревают их, что приводит к увеличению продольной составляющей электронного тока в силу эффекта пристеночной проводимости, увеличению «сквозного» электронного оттока и снижению тягового КПД. Методические эксперименты показали также, что удаление порошка приводит к восстановлению тяговых характеристик двигателя.

Совокупность полученных данных позволила сделать вывод о том, что выбранная схема является перспективной для создания на ее основе СПД с высоким удельным импульсом. Однако необходимо разработать меры для уменьшения влияния уширения канала и загрязнения стенок разрядной камеры на параметры двигателя.

Дальнейшие исследования особенностей работы моделей СПД выбранной схемы были проведены в процессе разработки модели СПД-85П с наружным диаметром ускорительного канала, который можно было изменять в пределах (82-85) мм. Уменьшение масштаба модели позволяло сузить распределение индукции магнитного поля и увеличить плотность потока РТ через ускорительный канал на

(20-25)% с целью уменьшения протяженности слоя ионизации и ускорения. В результате при разрядных напряжениях (700-900)В и сопоставимых мощностях разряда удалось повысить на 500м/с удельный импульс тяги при сохранении значений тягового КПД, близкими к полученным для СПД-100П и меньшую протяженность зон эрозии. Таким образом, модель СПД-85П представлялась достаточно перспективной. Кроме того, в результате исследований модели СПД-85П были получены следующие результаты:

- выявлена новая особенность работы на режимах с повышенным разрядным напряжением – меньшая устойчивость рабочего режима двигателя во времени и показано, что она может быть повышена за счет повышения азимутальной равномерности распределения индукции магнитного поля и подачи рабочего газа в ускорительный канал;

- была показана возможность устранения образования порошкообразных осадков на стенках разрядной камеры защитными экранами, изготовленными из той же керамики, что и выходные кольца, на которых осаждающийся распыленный материал образует достаточно прочную пленку, как и у серийных современных СПД;

- на начальном этапе работы СПД с исходными цилиндрическими стенками выходных участков разрядной камеры модель обеспечивала получение достаточно высокого уровня тягового КПД и удельного импульса тяги, но по мере увеличения наработки двигателя, как и в модели СПД-100П, а также других моделях стандартной схемы, работающих при повышенных разрядных напряжениях, происходило постепенное снижение названных параметров из-за уширения разрядной камеры и загрязнения ее стенок продуктами распыления ее выходных участков.

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить ряд новых особенностей работы СПД выбранной схемы на режимах работы с повышенными разрядными напряжениями, которые должны учитываться при разработке высокоимпульсных двигателей.

В главе 3 изложены результаты разработки способов предотвращения

негативных эффектов, обнаруженных при исследованиях моделей СПД-100П и СПД-85П. При этом на основе анализа факторов, определяющих продольную протяженность слоя ионизации и ускорения (СИУ) и полученных ранее для СПД-100П и СПД-85П данных предполагалось, что увеличение плотности потока через ускорительный канал позволит уменьшить толщину СИУ и протяженность зон эрозии стенок разрядной камеры, а также снизить влияние упомянутого уширения на работу и характеристики двигателя за счет создания запаса по плотности потока, обеспечивающего приемлемый его уровень даже при уширении ускорительного канала и уменьшения общего потока распыленного материала внутрь разрядной камеры за счет сокращения протяженности зон эрозии и общего количества распыленного материала. С учетом изложенного в процессе исследования решались задачи максимального сужения и выдвигания СИУ за плоскость полюсов магнитной системы за счет дальнейшей оптимизации магнитного поля в ускорительном канале и повышения плотности потока рабочего газа в ускорительном канале двигателя.

Известным решением задачи выдвигания СИУ в продольном направлении является соответствующее выдвигание максимума распределения индукции магнитного поля, реализованное уже при разработке двигателя СПД-100. В данном случае в результате моделирования магнитного поля было найдено такое соотношение размеров элементов магнитной системы, при котором максимум магнитной индукции на срединной поверхности ускорительного канала, к которому обычно привязывается срез ускорительного канала, оказался вынесенным за плоскость наружного полюса на 7-8 мм. При этом конфигурация силовых линий магнитного поля обеспечивает возможность и так называемой магнитной защиты стенок разрядной камеры, прорабатываемую в настоящее время в США. Кроме того, найденное соотношение размеров элементов магнитной системы позволило сузить выходную часть ускорительного канала до 11мм. Это позволяло реализовать на (35-40)% более высокие плотности потока рабочего газа по сравнению с реализуемыми при том же расходе и традиционной ширине ускорительного канала порядка 15 мм для моделей масштаба СПД-100.

С учетом полученных результатов была разработана, изготовлена и испытана модернизированная модель двигателя типа СПД-100ПМ (см. рисунок 2(а)), в которой кроме уже описанных особенностей была предусмотрена защита поверхности магнитного экрана козырьками из керамики. Определение характеристик модели СПД-100ПМ с исходной цилиндрической геометрией ускорительного канала и с уширенной на 45 градусов выходной частью каждой стенки в зонах эрозии, определенных после двадцатичасовых испытаний на стабильность параметров с исходной геометрией выходных стенок. Результаты ее испытаний показали, что, как и планировалось, протяженность зон эрозии на наружной стенке оказалась равной 5-6 мм, а на внутренней - около 7 мм, т.е. значительно меньше, чем в модели СПД-100П. Таким образом, заложенными при модернизации модели СПД-100ПМ решениями удалось сузить и сдвинуть СИУ в выходном направлении на достаточную для обеспечения большого ресурса величину.

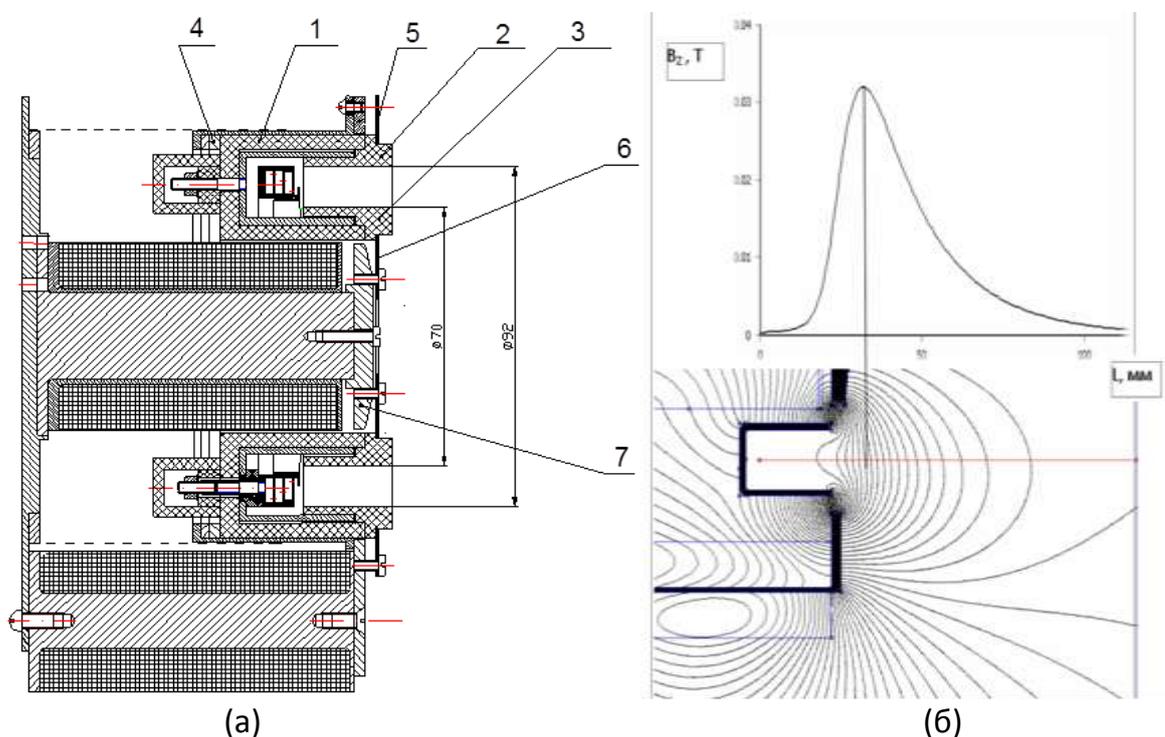


Рисунок 2 (а) – Модернизированная модель двигателя типа СПД-100ПМ; (б) - Картина силовых линий магнитного поля и распределение радиальной компоненты индукции магнитного поля вдоль срединной поверхности ускорительного канала

Результаты проведенных испытаний (рисунок 3) показали, что модель СПД-100ПМ при исходной геометрии ускорительного канала обеспечивает

практически такой же уровень тяговых характеристик, что и модель СПД-100П, а уширение канала в зонах эрозии на угол 45 градусов на сторону приводит к уменьшению удельного импульса тяги не более чем на 3% от начального его уровня, т.е. это уменьшение значительно меньше, чем было у моделей СПД-100П и СПД-85П (рисунок 3(а)). Результаты проведенных испытаний (рисунок 3) показали также, что в модели СПД-100ПМ по мере приработки профилей стенок, заданных механической обработкой, происходит некоторое повышение тягового КПД и удельного импульса тяги, и их значения выходят на уровень, близкий к исходному (см. рисунок 3(б)).

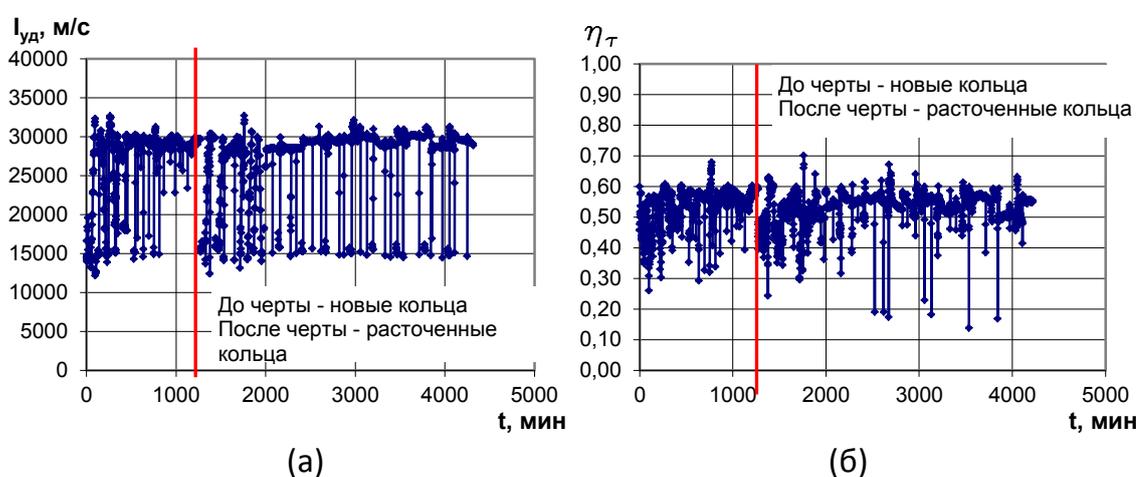


Рисунок 3 (а) – Изменение «анодного» удельного импульса тяги за время контрольной наработки модели СПД-100ПМ; (б) – Изменение «анодного» тягового КПД за время контрольной наработки модели СПД-100ПМ

Таким образом, заложенные при разработке модели СПД100ПМ решения позволили сохранить достаточно высокий уровень тягового КПД и удельного импульса тяги при значительном уширении ускорительного канала.

С учетом результатов, полученных для модели СПД-100ПМ, была также разработана, изготовлена и исследована модернизированная модель двигателя типа СПД-140ПМ, в которой были реализованы те же решения по улучшению организации процессов в двигателе, что и в модели СПД-100ПМ.

Поскольку выдвижение СИУ и сокращение его продольной протяженности в модели СПД-100ПМ позволило уменьшить продольные размеры зон эрозии и снизить энерговыделение на стенках разрядной камеры, можно было предполагать, что с моделью СПД-140ПМ удастся продвинуться по разрядному

напряжению и удельному импульсу тяги до более высоких значений. Кроме того, при исследовании модели СПД-140ПМ представлялось целесообразным более полно изучить влияние возможных схем питания разряда на работу и характеристики двигателя выбранной схемы на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги.

С учетом изложенного при исследовании модели СПД-140ПМ определялись вольтамперные и тяговые характеристики модели в расширенном диапазоне разрядных напряжений и удельных импульсов тяги при различных схемах питания разряда и мощности разряда до 5кВт, приемлемой для обеспечения достаточно большого ресурса двигателя масштаба СПД-140.

Полученные данные свидетельствуют о следующем:

- модернизированная модель СПД-140ПМ может стационарно работать при разрядных напряжениях до (1400-1500)В (рисунок 4) тогда, как стандартная модель - до разрядных напряжений до (1000-1100)В;

- во всем диапазоне разрядных напряжений (300-1400)В наилучшие характеристики получаются при работе модели по двухступенчатой схеме и смещении потенциала магнитного экрана -70В относительно анода, при этом удается получить значения «анодного» (рассчитанного без учета расхода в катод) удельного импульса тяги до 40км/с и полного удельного импульса тяги до 35км/с.

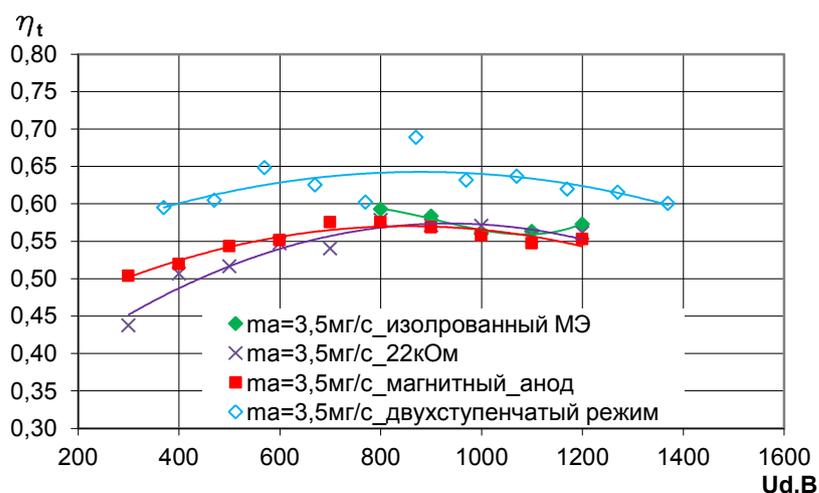


Рисунок 4 – Зависимость тягового КПД модели СПД-140ПМ от режима работы и схемы питания разряда при расходе через ускорительный канал 3 мг/с

Приведенные данные свидетельствуют о том, что управление потенциалом магнитного экрана позволяет в определенных пределах контролировать характеристики двигателя и наилучшие характеристики получаются при достаточно большом отрицательном смещении потенциала магнитного экрана относительно анода. При этом очевидно, уменьшается взаимодействие электронов с поверхностью магнитного экрана, что и приводит к уменьшению электронной составляющей разрядного тока и заметному повышению тяговой эффективности двигателя на режимах работы с малыми расходами, представляющими интерес для высокоимпульсных двигателей.

В главе 1 отмечалось, что при изолированном магнитном экране возникают определенные трудности зажигания основного разряда при низких расходах рабочего тела. Проведенный анализ и специально поставленные эксперименты показали, что основной причиной является низкий потенциал изолированного магнитного экрана при работающем в режиме поджига катоде, не превышающий (25-30)В относительно катода. Поэтому разность потенциалов между катодом и пространством внутри разрядной камеры оказывается незначительной, что в совокупности с уменьшением интенсивности взаимодействия электронов со стенками затрудняет попадание необходимого потока электронов в это пространство и зажигание разряда. Было установлено также, что названные трудности устраняются при соединении магнитного экрана с анодом непосредственно или через сопротивление порядка 20кОм, повышающем потенциал магнитного экрана в период зажигания разряда в двигателе, а также при двухступенчатой схеме питания разряда.

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

В результате анализа, приведенного в главе 1, было показано, что значительную часть потока ионов в радиальных потоках составляют ионы перезарядки. Но их энергия не может быть больше (15-20)эВ, что подтверждается и рядом измерений. Это означает, что распыление элементов катода

осуществляется ионами с достаточно большой энергии иного происхождения.

Для выявления возможных источников появления ионов повышенной энергии в радиальных потоках ионов было проведено экспериментальное исследование параметров плазмы и ионов в потоках, движущихся в окрестности выходной плоскости модели СПД-85П в непосредственной близости от двигателя с использованием системы плоских зондов Лэнгмюра и многосеточного зонда – энергоанализатора. Дело в том, что в проведенных ранее экспериментах измерения проводились на расстояниях от двигателя не менее 0,5м, а на этих расстояниях измеряемые сигналы малы. Больше того, с увеличением расстояния от двигателя в радиальном направлении все большую роль в измеряемом сигнале начинают играть ионы перезарядки, попадающие в измерительный датчик из все большей части струи. Поэтому все сложнее становится выделять ионы повышенной энергии, и авторы измерений, выполненных на расстоянии (0,5-1)м, не могли выделить ионы с повышенными энергиями.

Для проведения исследования этого была разработана методика и изготовлен специальный экспериментальный узел (рисунок 5). Исследование было проведено в диапазоне разрядных напряжений (300-800)В и расходов ксенона через ускорительный канал 2,1 и 2,5мг/с. В результате было установлено, что в радиальных ионных потоках присутствуют ионы с энергиями в диапазоне (50-200)эВ и средней энергией в диапазоне (80-120)эВ. При этом средняя энергия этих ионов и плотность тока оказались слабо зависящими от разрядного напряжения.

В результате анализа возможных процессов, способных привести к образованию ионов средней энергии в радиальных потоках ионов в качестве основного было выбрано образование и ускорение ионов в выходной части ускоряющего слоя разряда в двигателе, вынесенного в современных двигателях за пределы ускорительного канала.

В прикладном плане важно то, что с повышением разрядного напряжения проблема эрозии элементов катода в соответствии с полученными 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 исследование влияния положения катода на характеристики двигателя, работающего при повышенном разрядном напряжении. Для этого на первом этапе было проведено исследование характеристик модели СПД-85П с различными боковыми положениями катода относительно анодного блока, при которых ионы из радиальных потоков не должны попадать на поверхности катода. В результате было получено, что и при таких положениях катода тяговые параметры двигателя сохраняются неизменными в пределах точности измерений, несмотря на заметное изменение разности потенциалов между катодом и корпусом вакуумной камеры («землей»), свидетельствующем о возможном уменьшении эффективной разности потенциалов, ускоряющей ионы и повышении электронной температуры.

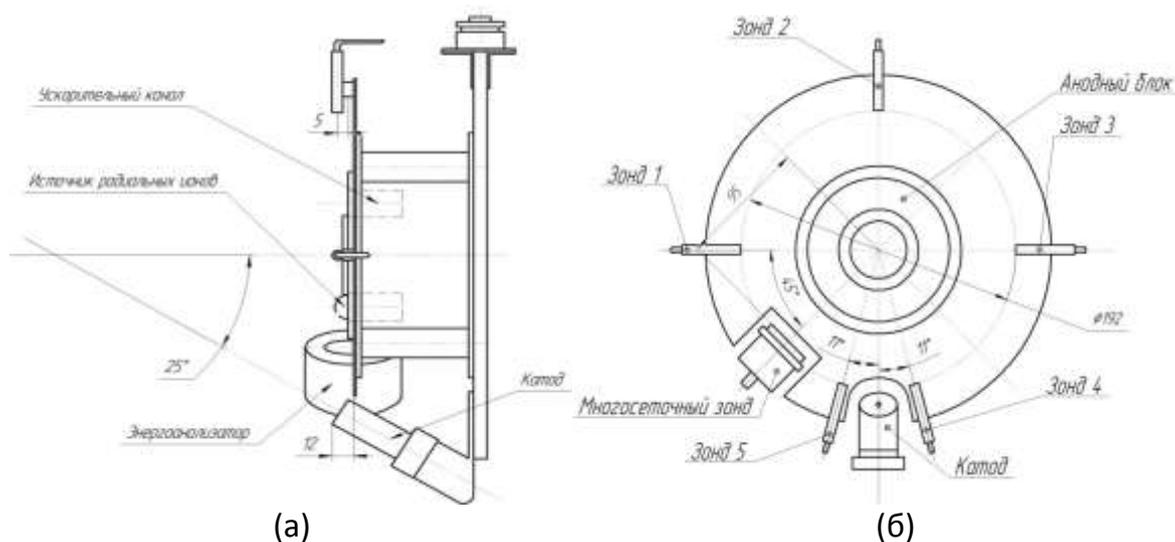


Рисунок 5 – Схема расположения плоских зондов и энергоанализатора относительно модели, (а) – Вид сбоку; (б) – Вид спереди

Одним из возможных объяснений полученного результата является предположение о том, что при удалении катода поток ксенона из него создает меньшую азимутальную неравномерность распределения концентрации нейтрального газа на выходе из двигателя и, соответственно, оказывается

меньшее негативное влияние этой неравномерности на рабочие процессы в двигателе, что компенсирует увеличение разности потенциалов «катод-земля». Для проверки этой гипотезы был проведен эксперимент, в котором на катод дистанционно надвигался экран с вырезом, уменьшавший проходное сечение для выхода электронов и нейтральных атомов из прикатодной области в пространство на выходе из двигателя.

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. Таким образом, во-первых, было показано, что рассмотренная азимутальная неравномерность несущественно влияет на работу двигателя. Во-вторых, из полученного результата следует, что при необходимости можно защищать катод от радиальных потоков ионов дополнительными экранами, выполненными из износостойкого материала, поскольку возможно значительное перекрытие пространства между катодом и анодным блоком двигателя без существенного изменения работы и характеристик двигателя.

В Заключении сформулированы следующие выводы по работе:

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 камеры является перспективной для двигателей, работающих с высокими разрядными напряжениями и удельными импульсами тяги.

3. Проведено исследование лабораторных моделей СПД с магнитным экраном внутри разрядной камеры типа СПД-100П, СПД-85П, разработаны и исследованы усовершенствованные модели СПД-100ПМ и СПД-140ПМ, 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 выдвигением

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 слоя ионизации и ускорения, 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 слоя ионизации и ускорения или экраном из износостойкого материала, размещенным между катодом и анодным блоком

двигателя.

Публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

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

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

Публикации в других изданиях и сборниках докладов:

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. // Тезисы докладов 12-ой международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2013», Москва, МАИ, ноябрь 12-15, 2013, с. 348 – 350.

4. 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. // Тезисы докладов 13-ой международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2014», Москва, МАИ, ноябрь 17-21, 2014, с. 265 – 267.

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

6. Kim V., Arkhipov A. S., Bishaev A. M., Merkurev D. V., Pogorelov A. A., Popov G. A. Investigation of the “back” and “radial” ion flows in the vicinity of the stationary plasma thruster exit plane // paper IEPC-2015-247, 30th International Symposium on

Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th
Nano-satellite Symposium, July 5-10,2015, Hyogo-Kobe, Japan.