

На правах рукописи

Митрофанова Ольга Александровна

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ (СПД)**

Специальность 05.07.05
«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калининград – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Опытное конструкторское бюро «Факел», г. Калининград

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, профессор Румянцев Альберт Владимирович

Официальные оппоненты:

Марахтанов Михаил Константинович – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой Э-8

Смирнов Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Курчатовский ядерно-технологический комплекс Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ведущий научный сотрудник отделение Токамаков

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)

Защита состоится "16" ноября 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ) www.mai.ru/events/defence/

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

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

Зуев Юрий Владимирович

Актуальность темы

В России успешно разрабатываются и широко применяются электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) на базе стационарных плазменных двигателей (СПД). СПД являются высокоэффективными и надежными изделиями космической техники и признаются в мире лучшими двигателями своего класса.

Основными требованиями к современным СПД являются высокие значения удельного импульса тяги (1000..3000 с и более) при обеспечении высокой эффективности работы, повышенный огневой ресурс (10000 часов и более), пониженное влияние плазменной струи на функционирование космического аппарата и обеспечение многорежимности работы по мощности, тяге и скорости истечения рабочего тела.

Известно, что уровень выходных и ресурсных характеристик СПД обусловлен эффективностью организации в нем основных рабочих процессов (ионизации и ускорения), в значительной степени, зависящей от параметров и топологии магнитного поля двигателя.

Предполагается, что процессы ионизации и ускорения в СПД происходят в едином слое ионизации и ускорения (СИУ). Принято считать, что проблема повышения основных характеристик двигателя может быть решена за счет уменьшения продольной протяженности СИУ и смещения его положения в сторону выхода из разрядного канала. Определено, что изменением величины и топологии магнитного поля в разрядном канале СПД возможно оптимизировать положение, конфигурацию и протяженность СИУ. При этом экспериментально установлено, что эрозия стенок разрядной камеры (РК) СПД, главным образом определяющая ресурсные характеристики двигателя, начинается в области интенсивной ионизации, которая располагается в начальной части СИУ. Поэтому большой практический интерес представляют исследования зависимости геометрических характеристик зон эрозии стенок РК от параметров магнитного поля в ускорительном канале (УК) двигателя. Ресурсные характеристики СПД определяет и эрозия катодов-компенсаторов (К-К), входящих в его состав. Ресурсные характеристики катода и эффективность его работы, в большей степени зависят от его положения относительно анодного блока СПД и конструктивных особенностей самого СПД. В свою очередь, одними из основных факторов, влияющих на выбор местоположения катода-компенсатора, также являются величина и конфигурация магнитного поля в этом месте.

Таким образом, тематика данной работы, посвященной исследованию влияния величины и топологии магнитного поля на интегральные характеристики работы СПД и формулировке рекомендаций по определению оптимального магнитного поля, позволяющего обеспечивать требуемый уровень выходных и ресурсных характеристик двигателя, представляется актуальной.

С учетом изложенного выше **целями работы** являются:

- выявление возможностей повышения выходных и ресурсных характеристик СПД путем оптимизации параметров и топологии магнитного поля как в разрядном канале, так и в периферийной зоне двигателя;

– разработка рекомендаций по проектированию магнитных систем (МС) перспективных СПД.

Исследование магнитного поля СПД в данной работе осуществлялось методом математического моделирования с применением компьютерной программы NISA, основанной на методе конечных элементов.

Для достижения сформулированных выше целей необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ достоинств и недостатков существующих в настоящее время конструкций и параметров МС СПД;
- отработать и верифицировать методики расчета двумерных и трехмерных расчетных моделей МС с учетом насыщения;
- выполнить анализ взаимосвязи геометрических характеристик зон эрозии стенок РК двигателей различных типоразмеров с величиной и топологией магнитного поля в разрядном канале этих двигателей и определить возможность прогноза геометрических характеристик зоны эрозии по результатам расчета параметров и топологии магнитного поля, разработать соответствующие рекомендации по использованию;
- провести экспериментальные исследования влияния магнитного поля в УК, а также в области расположения катода на выходные и ресурсные характеристики СПД;
- разработать рекомендации по проектированию МС и расположению катодов в перспективных СПД.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. определены и обоснованы возможные допущения при построении расчетных моделей МС СПД, позволяющие упростить моделирование и вычисления и минимизировать время расчета;
2. определена количественная взаимосвязь между величиной и конфигурацией магнитного поля, параметрами работы двигателя и протяженностью и положением СИУ в разрядном канале СПД, определяющих границы зон эрозии стенок РК, а именно:
 - установлено, что границы зон эрозии на наружной и внутренней стенках РК со стороны анода находятся на пересечении одной «граничной» силовой линии магнитного поля со стенками независимо от типоразмера двигателя, напряжения разряда, формы магнитной линзы, величины индукции и материала РК;
 - положение этой «граничной» силовой линии обуславливается величиной $k \times B_{r\max}$ по срединной линии УК, где $B_{r\max}$ - максимальная величина радиальной магнитной индукции, а коэффициент k может быть определен по полученной зависимости от удельного расхода рабочего тела в выходной зоне канала двигателя;
 - показано также, что в процессе длительной работы двигателя при постоянном удельном расходе границы зон эрозии остаются в первом приближении неизменными, и эрозии будет подвержена область стенок РК от среза до указанных границ;

3. установлено, что источник ускоренного потока ионов, вызывающего эрозию К-К локализован в области, примыкающей к наружному полюсу и наружной стенке РК, что может быть объяснено торообразной конфигурацией магнитных поверхностей и соответствующей конфигурацией эквипотенциалей электрического поля в названной области;
4. установлено наличие корреляции между индукцией магнитного поля в месте расположения катода и тяговыми характеристиками двигателя в случае периферийного размещения катода. Показано, что величина индукции магнитного поля в месте расположения выходных отверстий катодов не должна превышать 3 мТл;
5. показано, что повышение тяговой эффективности и снижение скорости эрозии стенок РК в новой модификации двигателя СПД-100 достигнуто за счет оптимизации параметров и топологии магнитного поля, приведшей к сокращению продольной протяженности зон эрозии, свидетельствующей о сокращении продольной протяженности СИУ и выдвигении его к выходу из ускорительного канала.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. отработана методика проведения двумерных и трехмерных расчетов величины и топологии магнитного поля СПД в ППП NISA, которая используется в настоящее время в ОКБ «Факел» на этапе проектирования перспективных СПД и при необходимости модернизации уже существующих моделей двигателей с целью улучшения их выходных и ресурсных характеристик;
2. разработана методика прогнозирования геометрических характеристик зон эрозии стенок РК СПД по результатам расчетов магнитного поля в нем и параметров его рабочего режима, которая используется при проектировании новых двигателей;
3. разработаны рекомендации по выбору схемы МС, параметров конструкции и токов в катушках намагничивания для различных двигателей ОКБ «Факел», позволяющие обеспечить их высокие тяговые и ресурсные характеристики;
4. разработаны рекомендации по выбору оптимального местоположения К-К на периферии анодного блока СПД по результатам магнитных расчетов, обеспечивающего одновременно как высокие выходные параметры двигателя, так и снижение скорости эрозии поджигного электрода катода до 10 раз.

Указанные методики и рекомендации внедрены в ОКБ «Факел» при разработке двигателей в рамках ОКР «Двигателей ТМ», «Двина ТМ», НИОКР из прибыли ОКБ «Факел» и др.

Основные положения, выносимые на защиту:

- положение о возможности определения геометрических характеристик зон эрозии стенок РК по результатам расчетов параметров и топологии магнитного поля в УК СПД;
- положение о возможности дальнейшего повышения тяговой эффективности, ресурса и снижения расходимости струи двигателя путем оптимизации параметров и топологии магнитного поля в УК СПД;

– положение о влиянии индукции и топологии магнитного поля в прикатодной области на тяговые характеристики двигателя и ресурс К-К при его размещении на периферии анодного блока двигателя.

Личный вклад автора заключался в следующем:

- отработке методики проведения двумерных и трехмерных расчетов параметров магнитного поля СПД при использовании ППП NISA;
- разработке расчетных моделей МС двигателей различных типоразмеров производства ОКБ «Факел» и проведении их верификации;
- проведении анализа зависимости ресурсных характеристик СПД от параметров и топологии магнитного поля в УК и в области катода при его боковом расположении;
- показе возможности повышения эффективности работы двигателя при доработке конструктивной схемы его МС и оптимизации положения катода;
- анализе результатов экспериментов и формулировании выводов на их основе;
- участии в работах по модернизации конструкций двигателей типа СПД-100, СПД-140Д и др., разрабатываемых в настоящее время в ОКБ «Факел».

Достоверность полученных результатов подтверждается путем сопоставления с результатами, полученными экспериментально и результатами других авторов.

Апробация работы и научные публикации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры физики Балтийского федерального университета им. И. Канта, на научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Будущее российской космонавтики в инновационных разработках молодых специалистов РКП», на 10-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011», 32-й и 33-й Международных конференциях по электроракетным двигателям, 4-й Российско-Германской конференции, научно-технических Советах ФГУП ОКБ «Факел».

Основное содержание и результаты работы изложены в 9 публикациях и одном патенте РФ.

Структура и объем диссертации

Работа представляет собой рукопись объемом 147 страниц печатного текста, включая 124 рисунка, 18 таблиц, а также список цитируемой литературы, насчитывающий 117 наименований.

Работа состоит из введения, 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; приводятся сведения об апробации и публикациях; излагается структура диссертации.

В **первой главе** диссертационной работы проведен подробный анализ существующих в настоящее время конструкций и параметров МС СПД; сформулированы возможные направления дальнейшего совершенствования СПД; дано обоснование целей работы; сформулированы основные задачи и намечены общие подходы по их реализации.

Во **второй главе** выполнен обзор используемых в настоящее время экспериментальных и расчетных методов исследования параметров магнитного поля. Проанализированы их достоинства и недостатки. По результатам проведенного анализа определено, что наиболее предпочтительным методом исследования величины и топологии магнитного поля СПД является численный метод конечных элементов. Отработана методика, в которой общий алгоритм решения магнитных задач с применением метода конечных элементов адаптирован для анализа характеристик магнитных систем СПД с учетом возможных упрощений и допущений. Для проведения численного моделирования выбран модуль EMAG пакета прикладных программ NISA Version 18 разработки EMRC Engineering Mechanics Research Corporation (США).

Отработанная методика включает:

- описание основных положений, принимаемых при разработке расчетных моделей;
- методику подготовки исходных данных для моделирования;
- обоснование допущений, способствующих реализации модели, но не выводящих результаты исследования за пределы допустимых погрешностей;
- оценку ошибок моделирования как следствие принятых упрощений;
- формулировку перечня основных рассчитываемых параметров;
- методику верификации результатов расчета путем их сопоставления с экспериментальными результатами.

Основные положения методики базируются на известных уравнениях Максвелла для магнитостатического поля:

1. закон полного тока:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}; (\nabla \times \vec{H} = \vec{J}), \quad (1)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля, $I = \int_{S_1} J ds$, J – плотность тока в сечении проводника S_1 ;

2. принцип непрерывности магнитного потока:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; (\nabla \cdot \vec{B} = 0), \quad (2)$$

где $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ (3) – индукция магнитного поля, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость среды.

Для приведения этой системы уравнений к виду более удобному для решения вводятся вспомогательные функции: векторного A и скалярного φ магнитных потенциалов.

При использовании векторного магнитного потенциала A , по (2) вектор магнитной индукции можно записать как

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}. \quad (4)$$

После подстановки формул (4) и (3) в (1), имеем:

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} = \vec{J}, \nu = \frac{1}{\mu}. \quad (5)$$

Подчинив \vec{A} условию $\text{div } \vec{A} = 0$, получим:

$$(\nabla \cdot \nu \nabla) \vec{A} = -\vec{J}. \quad (6)$$

В пакете прикладных программ NISA используется вариационная версия метода конечных элементов, поэтому решение определяется из условия минимума энергетического функционала, который в случае векторного анализа имеет вид:

$$F(\vec{A}) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \nu (\nabla \times \vec{A}) \cdot (\nabla \times \vec{A}) d\Omega - \int_{\Omega} \vec{A} \cdot \vec{J} d\Omega,$$

где Ω - область определения решения задачи.

После нахождения векторного потенциала, по формуле (4) вычисляется индукция магнитного поля. Магнитный поток Φ сквозь некоторую поверхность S вычисляется по формуле:

$$\Phi = \int_S B ds = \int_S \text{rot } A ds = \oint A dl. \quad (7)$$

Векторный магнитный потенциал может быть использован в расчетах как в случае вихревого, так и безвихревого (потенциального, т.е. $\nabla \times \vec{H} = 0$) поля.

Скалярным же потенциалом описывается только потенциальное поле:

$$H = -\text{grad } \varphi. \quad (8)$$

Взяв дивергенцию от правой и левой частей уравнения (1), можно получить основное уравнение для расчета магнитного поля при отсутствии источников:

$$\text{div } (\mu \mu_0 \text{grad } \varphi) = 0. \quad (9)$$

Решая уравнения относительно, можно по формуле (8) найти напряженность H , а затем по формуле (3) – индукцию B .

Для трехмерных полей уравнение с векторным потенциалом A превращается в систему из трех уравнений для проекций A на оси координат, поэтому с целью упрощения вихревые поля заменяются эквивалентными им полями, основную часть которых составляет безвихревое поле, определяемое одним уравнением для скалярного потенциала. Таким образом, в расчетной области Ω выделяют две подобласти: область Ω^p , содержащую токовые обмотки с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$, и область Ω^m , обладающую ферромагнитными свойствами. В области Ω^p при этом должно выполняться равенство $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$, где \vec{J} – плотность тока в возбуждающих магнитное поле обмотках, а в области Ω^m – $\nabla \times \vec{H} = 0$.

Напряженность магнитного поля \vec{H} в области Ω^p в этом случае определяется равенством

$$\vec{H} = \vec{H}^c + \vec{H}^p = \vec{H}^c + \text{grad}p, \quad (10)$$

где \vec{H}^c – напряженность магнитного поля, создаваемого токовыми обмотками; p – скалярная функция, называемая неполным потенциалом.

Напряженность магнитного поля \vec{H} в области Ω^ψ определяется равенством $\vec{H} = \vec{H}^\psi = -\text{grad}\psi$, где ψ – скалярная функция, называемая полным потенциалом.

Исходя из (2) неизвестную функцию p находят из уравнения:

$$\nabla \cdot (\mu\mu_0 \nabla p) = \nabla \cdot (\mu\mu_0 \vec{H}^c). \quad (11)$$

Энергетический функционал для скалярного потенциала Φ определяется как:

$$F(\Phi) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mu(\Phi)^2 d\Omega + \int_{\Omega} \Phi (\nabla \cdot \mu \vec{H}) d\Omega. \quad (12)$$

Граничные условия задачи основываются на известных свойствах векторов индукции и напряженности магнитного поля:

- 1) нормальная составляющая вектора магнитной индукции на границе раздела двух сред с разными магнитными свойствами непрерывна; нормальная составляющая вектора напряженности терпит разрыв (т.е. изменяется скачком), что необходимо учитывать при расчетах;
- 2) на границе двух сред тангенциальная составляющая вектора напряженности магнитного поля претерпевает скачок, равный плотности поверхностного тока, протекающего по границе раздела;
- 3) в случае векторного анализа тангенциальная составляющая векторного потенциала на границе раздела сред с разными магнитными свойствами непрерывна;
- 4) на внешних границах расчетной области должны быть заданы граничные условия: 1-го рода (Дирихле), когда задается значение потенциала, или 2-го рода (Неймана), когда задается изменение потенциала по нормали к границе или 3-го рода – смешанные.

В главе подробно описаны методики подготовки исходных данных и дискретизации области определения задачи: обоснование выбора размерности, размера области моделирования, мелкости разбиения на конечные элементы, типа конечных элементов (степени аппроксимирующей функции), анализ свойств используемых материалов.

Рассмотрены возможные допущения моделирования и их влияние на точность результатов расчета, а именно: построение половины или четверти МС (см. рис. 1а)), использование осесимметричного эквивалента МС (см. рис. 1б)) - обоснование выбора расчетной схемы в области наружного магнитопровода, анализ равномерности распределения магнитного поля в рабочем зазоре (влияние количества и формы катушек намагничивания, конструктивных особенностей МС, качества сборки изделия), замена фактических свойств материала линейной зависимостью индукции от напряженности.

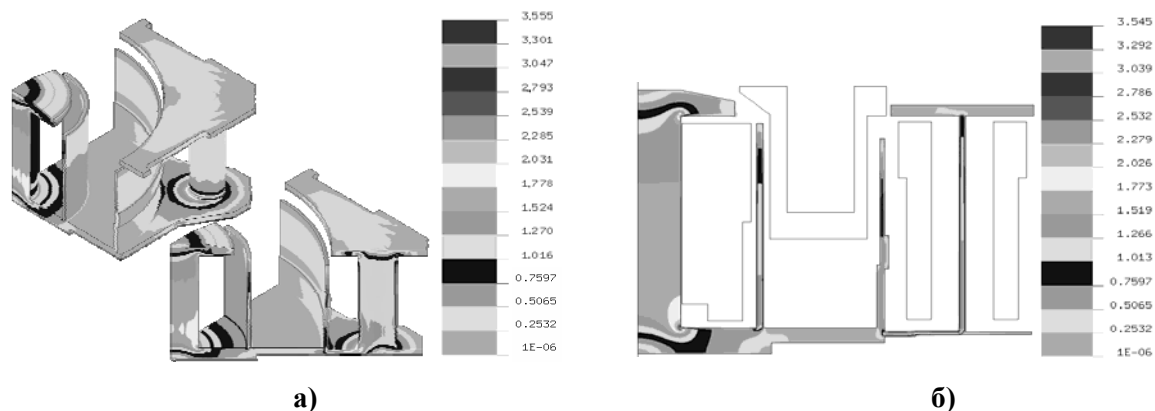


Рис. 1 Распределение индукции в элементах МС СПД типа СПД-100 а) трехмерный линейный расчет; б) двумерный осесимметричный линейный расчет

Сформулирован перечень основных рассчитываемых параметров, в который входят распределение индукции в элементах МС и в УК (по средней линии и по стенкам разрядной камеры), конфигурация силовых линий, градиент индукции по средней линии РК, положения максимальных значений радиальной составляющей посередине канала и т.д.

Приведена методика верификации результатов расчетов разработанных моделей МС, осуществляемой путем сравнения с топологией силовых линий магнитного поля в рабочей зоне двигателя, полученной с помощью метода железных опилок, и распределением радиальной и осевой составляющих индукции в разрядном канале по результатам прямых измерений на двигателе. Показано, что погрешность расчетов составляет 3..6 %.

С помощью указанной методики проведен анализ массовоэнергетической эффективности МС существующих СПД.

В **третьей главе** приведены результаты анализа зависимости ресурсных характеристик СПД от параметров магнитного поля в УК и на периферии двигателя. Ресурсные характеристики СПД определялись на основе анализа степени эрозии выходной части канала РК и элементов К-К под воздействием ионной бомбардировки, результатом которой являются те или иные изменения конфигурации этих элементов и узлов вплоть до полного их разрушения, которые, в свою очередь, могут быть причиной как нестабильности параметров двигателя во время его длительной работы, так и причиной полной потери его работоспособности.

Для анализа взаимосвязи между геометрическими характеристиками зон эрозии стенок РК, а именно глубиной и формой (профилями) эрозии, и параметрами и топологией магнитного поля в УК двигателя использовались результаты испытаний двигателей типа СПД-50, СПД-70, СПД-100 и СПД-140 и их модификаций. Параметры режимов работы двигателей приведены в таблице 1.

Измерения глубины зон эрозии на внутренних и наружных стенках РК проводились после примерно одинаковой продолжительности работы всех двигателей, достаточной для четкого определения границ зон эрозии. Профили эрозии были получены в процессе длительных испытаний двигателей в ОКБ «Факел».

Рабочие параметры двигателей в течение проводимых испытаний поддерживались постоянными. Все двигатели работали при оптимальных значениях токов в катушках МС (оптимизация по минимуму тока разряда).

Следует отметить, что анализ был проведен только для двигателей, УК которых ограничен с внешней стороны цилиндрическими стенками.

Изоляторы РК исследуемых изделий были изготовлены из керамик БПП-10, АХ-05 и БПП-Д.

Параметры магнитного поля всех исследуемых СПД, а именно топология и распределение радиальной индукции по срединной линии канала РК, были найдены по результатам серии расчетов с использованием приведенной в главе 2 методики.

При проведении анализа определялись силовые линии магнитного поля,

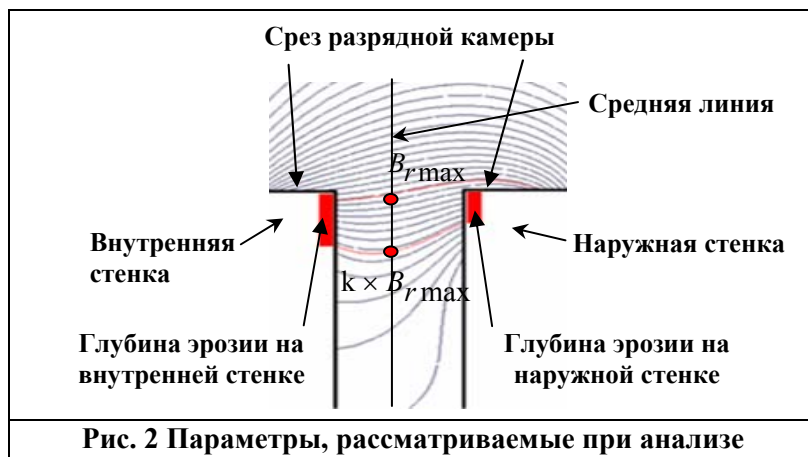
пересекающие стенки РК в месте расположения границ зон эрозии, найденных по результатам измерений. Затем на пересечениях срединной линии канала и найденных силовых линий по кривой распределения радиальной индукции находилась ее величина и значение коэффициента k . Схема анализа с указанием параметров, использованных при анализе для сопоставления, показана на рисунке 2. Полученные характерные результаты анализа взаимосвязи параметров МС и глубины зон эрозии в виде схем представлены в таблице 2.

По результатам проведенного анализа определено, что для всех исследуемых двигателей границы зон эрозии на внутренней и наружной стенках РК со стороны анода находятся на пересечении со стенками канала одной «граничной» силовой линии магнитного поля, проходящей через величину $k \times B_{r\max}$ по срединной линии УК, где значения коэффициента k для каждого случая различны и зависят от удельного расхода рабочего тела.

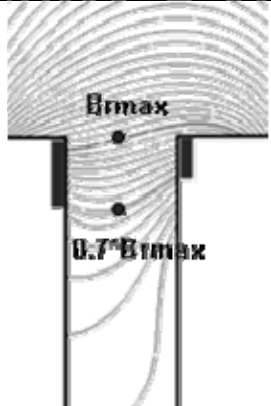
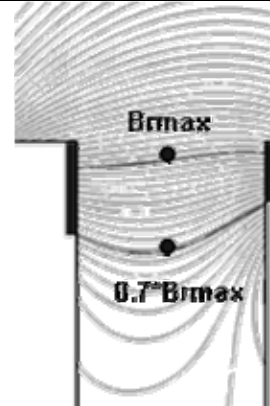
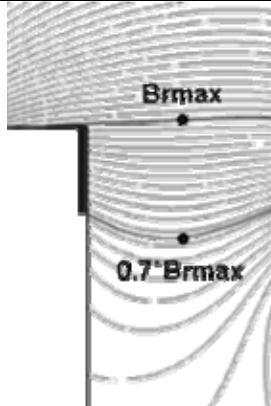
При этом были дополнительно проведены и эксперименты с изменением величины удельного расхода для рассматриваемых моделей. Полученные результаты для всех подвергавшихся анализу СПД (независимо от величины индукции в канале,

Таблица 1
Режимы работы исследуемых двигателей

Модель	Типоразмер	Ширина канала, мм	Напряжение разряда, В	Ток разряда, А
1	СПД-50	10	200	1,2
2		10	200	1,2
3	СПД-70	14	300	2,17
4	СПД-100	15,5	300	4,5
5		15,5	800	2,6
6	СПД-140	20	300	15
7		20	300	15
8		20	800	6
9		20	300	15



формы магнитной линзы, напряжения разряда, материала РК и прочих факторов) обобщены в графике, представленном на рисунке 3.

Таблица 2		
Взаимное расположение границ зон эрозии и параметров магнитного поля исследуемых СПД (характерные результаты)		
		
Модель 2 (типа СПД-50 – 200 В / 1,2 А)	Модель 3 (типа СПД-70 – 300 В / 2,17 А)	Модель 4 (СПД-100 – 300 В / 4,5 А)

Как можно видеть, полученная зависимость «граничных» значений индукции магнитного поля от удельного расхода рабочего тела удовлетворительно описывается единой кривой. При этом с уменьшением удельного расхода

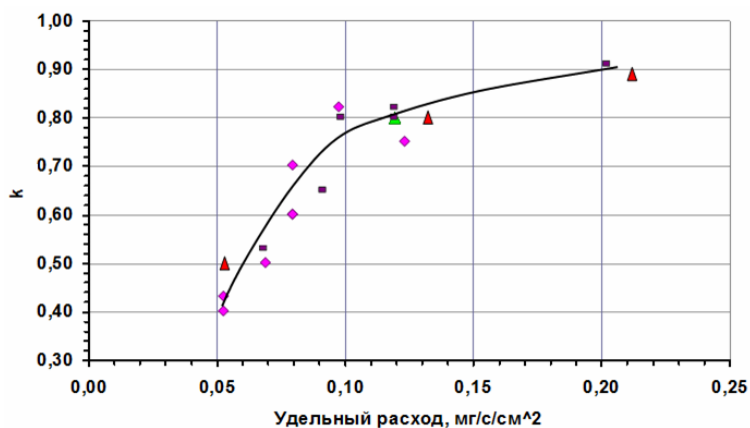


Рис.3 Зависимость коэффициента k от удельного расхода для исследуемых двигателей (\blacktriangle - СПД типоразмера СПД-50, \blacklozenge - СПД типоразмера СПД-70, \blacksquare - СПД типоразмера СПД-100, \blacktriangle - СПД типоразмера СПД-140)

происходит и уменьшение численных значений коэффициента k , то есть границы зон эрозии стенок со стороны анода уходят в глубину канала РК.

Положение границы зоны эрозии в канале РК непосредственно связано с положением и протяженностью СИУ (L_c). Поэтому физический смысл полученной зависимости может быть объяснен с использованием известной формулы А.В.Жаринова, написанной им применительно к двигателю с анодным слоем:

$$L_c \approx \sqrt{\frac{mU v_e}{eB^2 v_u}},$$

где m , e – масса и заряд электрона, U – падение напряжения в слое, B – индукция магнитного поля, $v_e = \langle \sigma_{ea} v_e \rangle n_a$ – частота столкновений электронов с атомами, приводящих к изменению их импульса и определяющих подвижность электронов поперек магнитного поля, где n_a – среднее значение концентрации атомов в слое,

$\nu_u = \langle \sigma_u \nu_e \rangle n_a$ – частота ионизационных столкновений, где $\langle \sigma_u \nu_e \rangle$ – усредненный по функции распределения электронов коэффициент скорости ионизации.

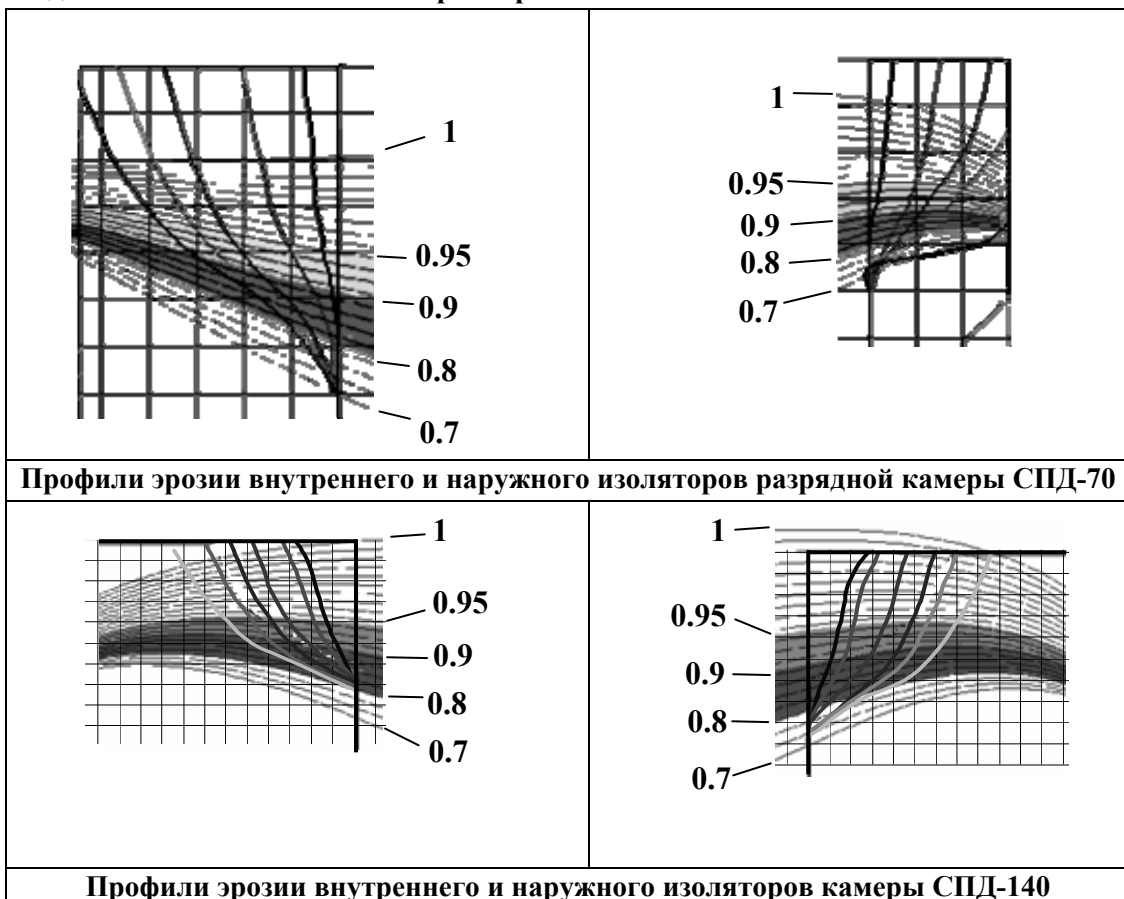
При этом среднее значение концентрации атомов в слое можно считать пропорциональным плотности расхода рабочего тела через УК, т.е. $n_a \approx k_n \frac{\dot{m}_a}{\nu_a S}$, где \dot{m}_a – анодный расход, ν_a – скорость атомов, S – площадь поперечного сечения канала.

Применительно к СПД приведенное выше выражение для эффективной частоты столкновений электронов можно записать в виде: $\nu_e = \nu_{ea} + \nu_{ew} + \tilde{\nu}_e$, где $\nu_{ea} = \langle \sigma_{ea} \nu_e \rangle n_a$, а $\nu_{ew}, \tilde{\nu}_e$ – соответственно, частота столкновений электронов со стенками и эффективная частота, отражающая влияние колебаний на подвижность электронов поперек магнитного поля. Как известно, зависимость результирующей подвижности электронов поперек магнитного поля является сложной и недостаточно изученной до настоящего времени. Но в данном случае важно то, что протяженность СИУ зависит от концентрации нейтральных атомов в УК и, соответственно, от плотности расхода рабочего газа через него.

Характерные результаты анализа взаимосвязи конфигурации профилей эрозии и параметров магнитного поля СПД представлены в таблице 3, где показаны измеренные профили эрозии, конфигурация силовых линий магнитного поля, а так же отмечены соответствующие значения коэффициента k по средней линии УК.

Таблица 3

Характерные результаты проведенного анализа взаимосвязи профилей эрозии РК СПД в процессе длительного испытаний и параметров и топологии магнитного поля



Из таблицы 3 видно, что характер изменения профилей эрозии от времени определенно коррелирует с формой магнитных силовых линий. Так, для исследуемых двигателей в зоне магнитной линзы, заключенной между силовыми линиями, проходящими через начало зоны эрозии и приблизительно $0,9 \times B_{r\max}$, профили эрозии «раскрываются» по форме магнитной линзы. Таким образом, предельные профили эрозии будут близки к силовым линиям, и, следовательно, можно предположить, что в процессе длительных испытаний при постоянном удельном расходе эрозии будет подвержена область РК от среза до «граничной» силовой линии, проходящей через точку $k \times B_{r\max}$ по срединной линии УК.

Необходимо заметить также, что для исследуемых двигателей по мере увеличения времени работы наблюдается смещение зоны эрозии к аноду, что возможно так же объясняется уширением разрядного канала и снижением удельного расхода в выходной зоне камеры.

Полученные выводы позволяют прогнозировать положение зон эрозии по результатам магнитных расчетов еще на этапе проектирования СПД и анализировать влияние различных конструктивных изменений МС и РК на эрозионные характеристики двигателя.

При исследовании взаимосвязи между параметрами магнитного поля на периферии СПД и ресурсными характеристиками двигателя, определяемыми эрозией К-К, был выполнен анализ существующих публикаций о влиянии выходной зоны (зоны рассеяния) магнитного поля на скорость эрозии катода при разных его положениях относительно МС двигателя, а также на тяговые характеристики СПД. Учитывая отсутствие конкретных критериев выбора оптимального местоположения катода на периферии анодного блока, при котором обеспечивались как высокая эффективность работы, так и высокие ресурсные характеристики катода, были проведены расчетно-экспериментальные исследования:

- механизма распыления элементов катода;
- структуры ускоренного ионного потока в зоне размещения катода;
- влияния параметров магнитного поля (индукции и конфигурации силовых линий) в зоне размещения катода на выходные параметры работы двигателя;
- влияния материала поджигного электрода катода на параметры работы двигателя;
- параметров магнитного поля периферийной зоны СПД и определяющих их факторов.

В качестве объекта исследования рассматривался двигатель СПД-100, ресурс катодов которого из-за эрозии поджигных электродов К-К ограничен временем 10000 часов. На основании результатов проведенных исследований было установлено, что источник ускоренного потока плазмы, вызывающего эрозию катода, локализован в области, примыкающей к наружному полюсу и наружной стенке РК, что может быть объяснено торообразной конфигурацией магнитных поверхностей и соответствующей конфигурацией эквипотенциалей электрического поля в названной области (см. рис.4).

Поэтому с точки зрения обеспечения высоких ресурсных характеристик К-К необходимо устанавливать под таким углом и в той зоне, где он будет менее подвержен действию этого потока. Выявлено, что снижение эрозионного разрушения наблюдается при приближении к наружному магнитному полюсу и удалении от продольной оси двигателя. При этом ось катода не должна проходить через ось двигателя, т.е. катоды должны устанавливаться параллельно.

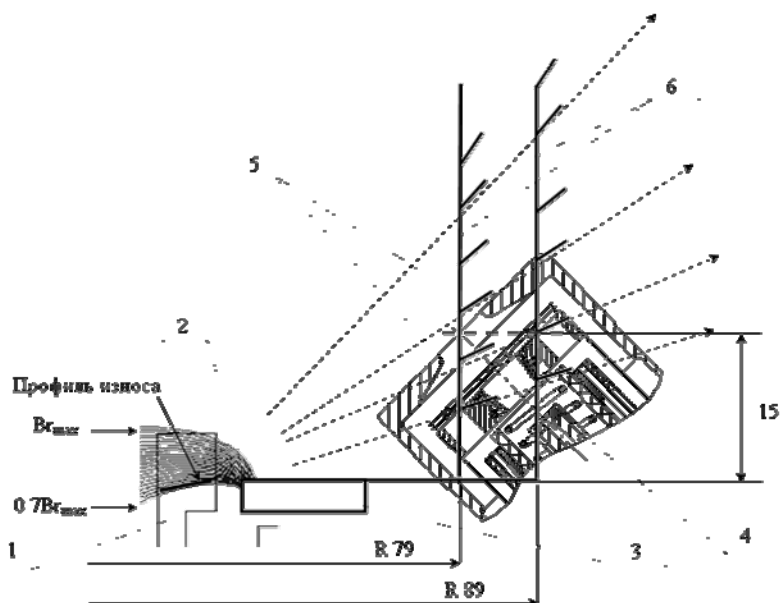


Рис. 4 Структура плазменного потока на периферии анодного блока М100

1 – наружная стенка разрядной камеры; 2 – магнитные силовые линии; 3 – наружный полюс; 4 – катод-компенсатор, 5 – траектории ионов; 6 – контрольные образцы

С точки зрения обеспечения эффективности работы двигателя катод должен располагаться в рабочей зоне магнитного поля, где магнитные силовые линии замыкаются между магнитными полюсами (см. рис. 5), или, по меньшей мере, на границе раздела замыкания силовых линий рабочей и периферийной зон поля.



Рис. 5 Конфигурация силовых линий рабочей зоны магнитного поля

Установлено, что индукция в зоне его размещения не должна превышать 3 мТл. При этом эффективность определялась по результатам огневых испытаний СПД-100, при проведении которых измерялись основные параметры двигателя и параметр $U_{кз}$ - напряжение «катод-земля», представляющий собой разность потенциалов между собственно катодом и «землей» (при проведении наземных испытаний СПД – корпусом вакуумной камеры):

$$U_{кз} = \phi_c - \phi_g,$$

где ϕ_c , ϕ_g – потенциалы катода и «земли».

Таким образом, оптимального положения можно добиться либо выбором местоположения катода, зная фактическое распределение поля, либо изменением параметров поля для некоторого уже выбранного положения катода. При этом можно изменять как параметры поля непосредственно в области формирования потока

плазмы, вызывающего эрозию К-К, меняя тем самым траектории движения частиц, так и параметры поля в зоне размещения самого К-К.

Основным фактором, влияющим на конфигурацию силовых линий в области формирования ускоренного ионного потока и вызывающим эрозию катодов, является форма наружного магнитного полюса.

Форма периферийной зоны поля определяется формой наружного магнитного полюса, формой основания магнитопровода, а так же соотношением ампервитков основных и дополнительных катушек намагничивания. Перечисленные способы влияния на конфигурацию периферийной зоны магнитного поля не оказывают значительного воздействия на топологию поля в УК двигателя, и поэтому позволяют оптимизировать работу катода, как минимум, без снижения выходных характеристик СПД. Однако в случае МС со значительно вынесенной над магнитными полюсами магнитной линзой необходимо всё же проведение поверочного расчета.

Определено также, что при необходимости размещения катода в периферийной зоне вблизи наружного полюса МС для обеспечения не только его высоких ресурсных характеристик, но и эффективности работы рекомендуется использовать катоды с магнитным поджигным электродом, так как при этом конфигурация поля становится более способствующей транспортировке электронов в струю плазмы, а индукция магнитного поля в зоне отверстия поджигного электрода близкой к нулевой.

Результаты оптимизации положения К-К в СПД-100 показали, что скорость распыления поджигных электродов катода может быть снижена на порядок.

В четвертой главе представлен анализ влияния магнитного поля на интегральные характеристики СПД путем разработки и экспериментальных исследований лабораторных моделей двигателя с повышенными удельными характеристиками. В качестве основы для разработки взят двигатель СПД-100, который при напряжении разряда 300 В и мощности разряда 1,35 кВт развивает тягу около 83 мН при удельном импульсе тяги около 1600 с. Расходимость его струи – полуугол, в который выпадает 90% ионного тока – составляет 45°. Ресурсные характеристики двигателя СПД-100 подтверждены на нескольких образцах двигателей. Наибольшая наработка составляет 9066 часов.

Были проведены расчетно-экспериментальные работы по оптимизации МС СПД-100 с учетом современных представлений об оптимальности параметров и конфигурации магнитного поля, а также с учетом рекомендаций, полученных в результате анализа массовоэнергетической оптимальности МС и анализа взаимосвязи между параметрами магнитного поля и ресурсными характеристиками СПД.

Основными целями являлись:

- обеспечение уровня магнитного поля в УК двигателя, соответствующего базовой модели при формировании дополнительно резерва по индукции с целью обеспечения возможности функционирования двигателя в широком диапазоне регулирования;
- создание более фокусирующей конфигурации магнитной линзы с большим градиентом магнитного поля при близкой к нулю индукции в зоне размещения анода;

- обеспечение выноса магнитной линзы, расположенной между силовыми линиями, проходящими через точки $B_{r\max}$ и $k \times B_{r\max}$ посередине УК к срезу РК, где $k = 0,6..0,8$ для повышения ресурсных характеристик,
- оптимизация положения К-К относительно анодного блока модернизированной МС с использованием приведенных в главе 3 рекомендаций.

По результатам проведенных работ был выбран вариант МС усовершенствованного двигателя (СПД-100М), удовлетворяющий определенным в целях модернизации требованиям.

Величина максимальной магнитной индукции в УК СПД-100М сопоставима с величиной для базового варианта. Распределение нормированных к максимальным расчетным значениям радиальной индукции посередине разрядного канала для СПД-100 и СПД-100М представлено на рисунке 6. За «ноль» отсчета на графике принят срез РК. Конфигурации силовых линий магнитного поля в УК СПД-100 и СПД-100М показаны на рисунке 7, где красным цветом выделены силовые линии, проходящие через значения $B_{r\max}$ - $0,7 \times B_{r\max}$ посередине УК.

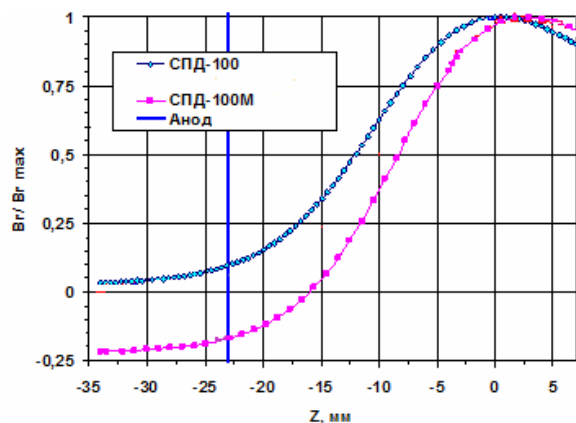


Рис. 6 Распределение нормированной к максимальным значениям величины радиальной составляющей магнитного поля

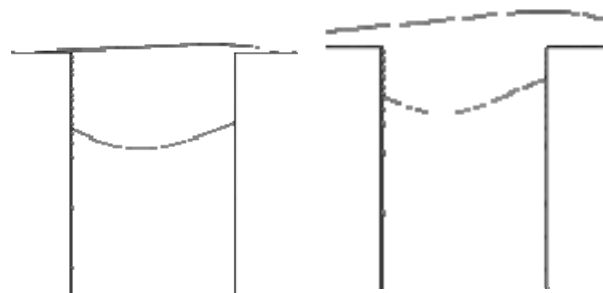


Рис. 7 Конфигурация силовых линий в канале двигателя а) – СПД-100; б) – СПД-100М

Из рисунков видно, что по сравнению с СПД-100 у СПД-100М магнитная линза сместилась к выходу из РК, при этом уменьшилась протяженность линзы. Положение максимума радиальной составляющей поля сместилось примерно на 1 мм к выходу из канала, а положение $(0,6..0,8) \times B_{r\max}$ - примерно на 2..3 мм. Таким образом, величина градиента поля увеличилась примерно на 20%. Индукция у анода уменьшилась примерно в 3 раза и стала принимать отрицательные значения. Следует отметить, что в модернизированной конструкции увеличена индукция у наружной стенки разрядной камеры, при этом на глубине от 5..7 мм до 11 мм от среза наблюдается равенство радиальной индукции по внутренней и наружной стенкам камеры, что формирует в этой зоне так называемую «магнитную бутылку» и, как предполагается, позволит обеспечить более высокую степень ионизации рабочего тела. Распределение осевой составляющей поля стало более симметричным относительно середины УК, уменьшилась разница между величиной по середине и стенкам разрядного канала.

Для определения эффективности проведенной модернизации СПД-100 были разработаны и изготовлены опытные образцы СПД-100М. Испытания опытных образцов проводились на стендах ОКБ «Факел» и включали испытания по определению тяговых и ресурсных параметров, а также параметров струи.

Испытания по определению тяговых параметров СПД-100М включали работу двигателей в широком диапазоне токов и напряжений разряда. В качестве контрольных точек использовались параметры опытных моделей, полученные при работе в номинальном режиме двигателя СПД-100 с мощностью разряда 1350 Вт (ток разряда 4,5 А при напряжении разряда 300 В) и режиме, близком к номинальному рабочему режиму двигателя PPS-1350, с мощностью разряда 1500 Вт (ток разряда 4,25 А при напряжении разряда 350 В). Результаты испытаний двигателей СПД-100М с параметрами контрольных точек приведены в таблице 4. Для удобства сравнения в таблице приведены также параметры номинальных режимов двигателей СПД-100 и PPS-1350. Приведенные в таблицах значения удельного импульса тяги учитывают суммарный расход в двигатель.

Таблица 4

Параметры СПД-100М в контрольных точках

Режим работы		Двигатель	Выходные параметры	
Ток разряда (I_p), А	Напряжение разряда (U_p), В		Тяга (F), мН	Удельный импульс (I_{y0}), с
4,5	300	СПД-100М	90,2	1734
		СПД-100	83	1600
4,25	350	СПД-100М	93,3	1865
4,28		PPS-1350	88	1720

Сравнительный анализ параметров СПД-100 и PPS-1350 с параметрами СПД-100М в контрольных точках показывает, что значения тяги и удельного импульса после модернизации возросли на 6...8 %.

Также было проведено и исследование вольтамперных характеристик усовершенствованного двигателя СПД-100М с измерением ионного тока I_i и оптимизацией токов в катушках намагничивания по минимуму тока разряда при 5 уровнях анодного расхода до мощности 2,2 кВт. Полученные результаты измерений вольтамперных характеристик приведены на рисунке 8. Проведенные исследования показали, что с увеличением разрядного напряжения ток разряда и ионный ток монотонно возрастают, а электронный ток, рассчитанный по формуле $I_e = I_p - I_i$, снижается.

На рисунке 9 показано отношение электронного тока к ионному току в зависимости от напряжения разряда и анодного расхода. Из графика видно, что кривые практически совпадают до напряжения 600 В.

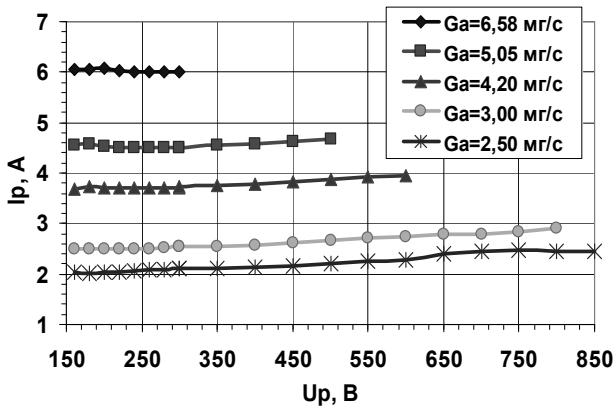


Рис. 8 Вольтамперные характеристики

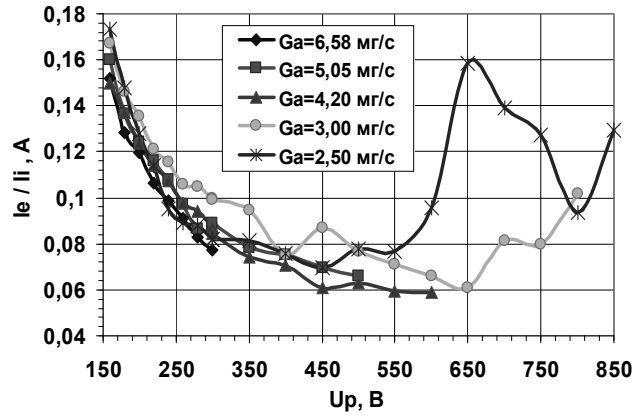


Рис. 9 Соотношение электронного и ионного токов

На рисунках 10-13 представлены, соответственно, графики зависимости тяги, анодного удельного импульса, энергетической цены тяги, анодного КПД двигателя от величины напряжения разряда и анодного расхода.

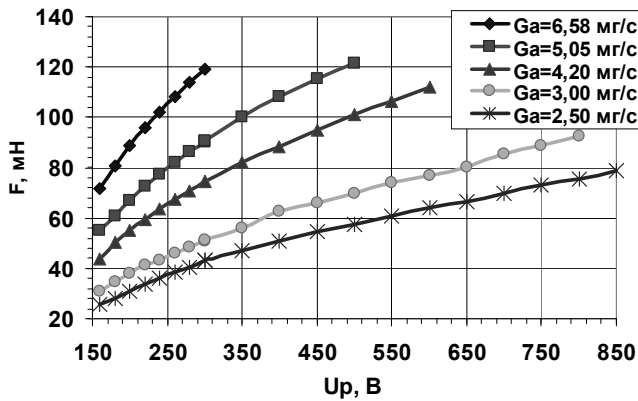


Рис. 10 Тяга двигателя

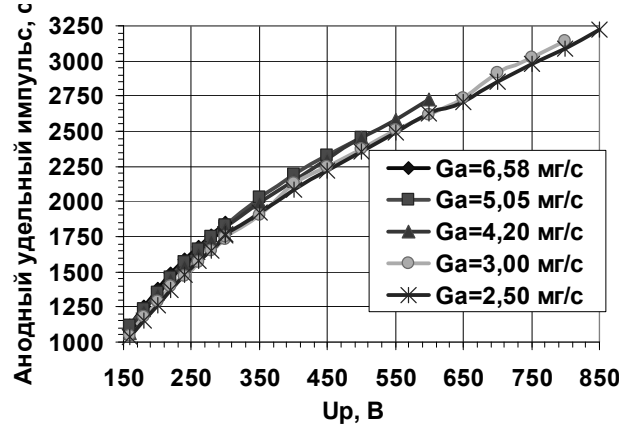


Рис. 11 Анодный удельный импульс тяги

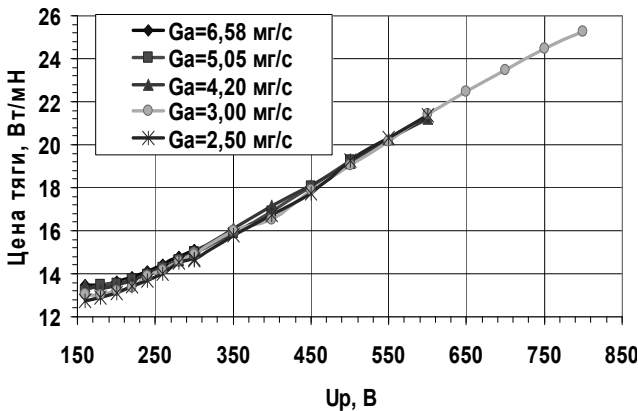


Рис. 12 Энергетическая цена тяги

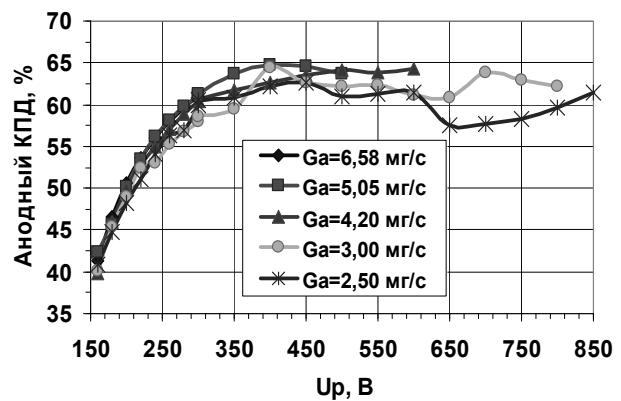


Рис. 13 Анодный КПД

Из рисунка 10 видно, что тяга двигателя монотонно возрастает с увеличением разрядного напряжения. Аналогичный вид имеет и зависимость анодного удельного импульса тяги (см. рис. 11). Энергетическая цена тяги достигает минимума при напряжении разряда около 150 В, а затем возрастает с увеличением напряжения разряда, что следует из рисунка 12. Тяговый анодный КПД на высоковольтных режимах превышает 60 % (см. рис. 13). В целом можно отметить, что при напряжении разряда менее 600 В практически все функции стабильны, а их изменение носит

регулярный, монотонный характер. При малых расходах и напряжении разряда свыше 600 В наблюдается аномальная работа двигателя, которая проявляется в уменьшении ионного тока, увеличении электронного тока и доли его составляющей (см. рис. 9) и снижении тягового КПД (см. рис. 13). Отмеченные аномалии в работе могут быть связаны с недостаточным для эффективной работы уровнем удельного расхода в УК СПД.

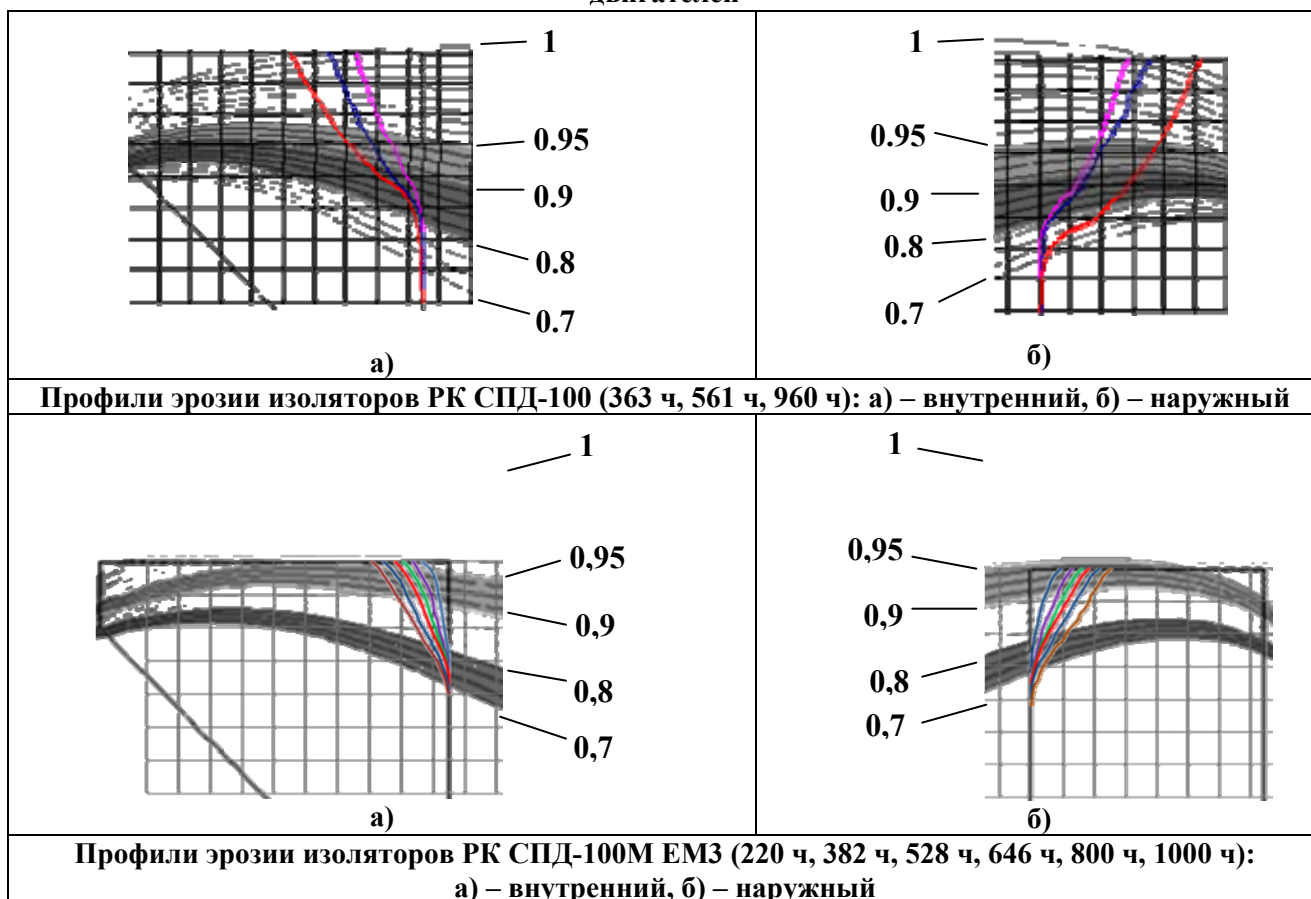
Исследования параметров струи СПД-100М в рабочем режиме СПД-100 с током разряда 4,5 А при напряжении разряда 300 В показали, что полуугол расходимости струи (90 % ионного тока) составляет 30°.

Ресурсные характеристики СПД-100М оценивались по результатам работы двигателя длительностью 1000 часов также в номинальном режиме работы СПД-100, при этом выходные параметры двигателя оставались достаточно стабильными. Стоит отметить, что для изготовления РК СПД-100М был использован материал, эрозионная стойкость которого, по меньшей мере, в 1,3 раза выше, чем у БП-10, используемого в настоящее время в СПД-100.

Результаты измерений, представленные для наглядности в таблице 5, показали, что средняя глубина и ширина поясков эрозии модернизированного двигателя после 1000 часов работы оказались практически в 2 раза меньше, чем наблюдались в СПД-100 после 960 часов. Начальная скорость эрозии изоляторов РК усовершенствованного двигателя примерно в 2 раза ниже, чем у серийного СПД-100.

Таблица 5

Профили эрозии РК СПД-100 и СПД-100М и параметры и топология магнитного поля двигателей



Учитывая также, что, как было показано, оптимизация положения К-К на периферии анодного блока СПД-100 позволяет снизить скорость эрозии поджигных электродов катодов на порядок, можно утверждать, что СПД-100М будет иметь существенно более высокие ресурсные характеристики, чем СПД-100.

В выводах к четвертой главе определены параметры МС СПД, способствующие достижению требуемых выходных характеристик двигателей.

В **заключении** диссертации сформулированы основные выводы и результаты работы:

1. Проведен анализ конструкций существующих МС СПД и предложен вариант их классификации.

2. Определены и обоснованы возможные допущения при построении расчетных моделей МС СПД. Оработана методика расчета магнитного поля двумерных и трехмерных расчетных моделей МС СПД. Показано, что результаты расчетов согласуются с результатами прямых измерений индукции и определения конфигурации силовых линий магнитного поля, при этом погрешность расчетов не превышает 10 %.

3. Проведен анализ взаимосвязи величины и топологии магнитного поля и границ зон эрозии стенок РК двигателей различных типоразмеров ОКБ «Факел» и установлено, что границы зон эрозии на наружной и внутренней стенках со стороны анода находятся на пересечении одной «граничной» силовой линии магнитного поля со стенками независимо от типоразмера двигателя, напряжения разряда, формы магнитной линзы, величины индукции и материала РК. Положение этой «граничной» силовой линии может быть определено положением величины индукции $k \times B_{r\max}$ на срединной линии УК, где коэффициент k зависит от удельного расхода РТ в выходной зоне канала двигателя. При этом названная зависимость удовлетворительно описывается единой для всех исследованных двигателей кривой. Показано также, что в процессе длительной работы СПД при постоянном удельном расходе положение границ зон эрозии стенок РК остается в первом приближении постоянным, таким образом, эрозии будет подвержена вся область РК от среза до соответствующей «граничной» силовой линии.

4. Проведено исследование различных факторов, влияющих на выбор местоположения катода на периферии анодного блока СПД, и установлено следующее:

- источник ускоренного потока плазмы, вызывающего эрозию поджигных электродов катодов, локализован в области, примыкающей к наружному полюсу и наружной стенке РК;
- допустимая для обеспечения высоких тяговых характеристик двигателя индукция магнитного поля в зоне размещения катода не должна превышать 3 мТл.

Сформулированы основные рекомендации по определению оптимального периферийного местоположения катода, при котором была бы уменьшена эрозия его элементов и обеспечена высокая тяговая эффективность работы двигателя, и способы реализации. Оптимизация положения катодов в СПД-100 позволила снизить скорость

распыления поджигных электродов катода на порядок при сохранении эффективности работы двигателя.

5. Проведен расчет магнитных полей в ряде моделей СПД, разрабатываемых в ОКБ «Факел» и разработаны рекомендации по проектированию их МС. Показано, что повышение тяговых и ресурсных характеристик и уменьшение расходимости струи СПД может быть достигнуто оптимизацией параметров и топологии магнитного поля двигателя. Так в новой модификации СПД-100 благодаря оптимизации конструкции магнитной системы в номинальном режиме работы (при мощности разряда 1350 Вт и разрядном напряжении 300 В) обеспечено повышение интегральных параметров двигателя на 8 % при уменьшении полуугла расходимости струи до 30° за счет уменьшения протяженности зон эрозии, свидетельствующем о сокращении продольной протяженности СИУ и выдвигении его к выходу из УК в сравнении с серийным двигателем.

Разработанные на основе полученных результатов методики и рекомендации внедрены при разработке перспективных двигателей в рамках ОКР «Двигателей ТМ», «Двина ТМ», НИОКР из прибыли ОКБ «Факел» и др. и могут быть использованы при создании СПД нового поколения с повышенными ресурсными и выходными характеристиками.

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в следующих **публикациях**:

1*. Гниздор Р.Ю., Козубский К.Н., Митрофанова О.А. Компьютерное моделирование магнитных систем стационарных плазменных двигателей// Вестник Российского государственного университета им. И. Канта, 2010. Выпуск 10. С. 137-144.

2. Гниздор Р.Ю., Митрофанова О.А., Нестеренко А.Н. Разработка и применение математических моделей магнитных систем стационарных плазменных двигателей// Сборник материалов по итогам научно-практической конференции «Будущее российской космонавтики в инновационных разработках молодых специалистов» 5-7 апреля 2010 года и научно-технического семинара 20-22 декабря 2010 года молодых ученых и специалистов предприятий ракетно-космической промышленности, Королев Московской области, 2011. С.59-61.

3. Mitrofanova O. A., Gnizdor R. Yu., Murashko V. M., Koryakin A. I., Nesterenko A. N. New generation of SPT-100. IEPC-2011-041// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.

4*. Гниздор Р.Ю., Митрофанова О.А., Гопанчук В.В., Козубский К.Н., Мурашко В.М. Способ размещения катода-компенсатора в плазменном двигателе и устройство для его осуществления// Патент РФ № 2426913, Н05Н 1/54, F03Н 1/00, 06.04.2010, Бюл. №23, 20.08.2011.

5. Гниздор Р.Ю., Митрофанова О.А., Нестеренко А.Н. Исследование влияния параметров и топологии магнитного поля периферийной зоны стационарного плазменного двигателя на эффективность работы катода-компенсатора //10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2011», 8-10 ноября, 2011. Москва. Тезисы докладов. СПб.: Мастерская печати, 2011. С. 167.

- 6*. Гниздор Р.Ю., Митрофанова О.А., Румянцев А.В. Исследование влияния магнитного поля СПД на разность потенциалов между катодом и «землей»// Вестник Московского авиационного института, 2012. Том 19, выпуск 2. С. 47-52.
- 7*. Гопанчук В.В., Митрофанова О.А., Потапенко М.Ю. Исследование конфигурации сердечника источника намагничивания магнитных систем электрореактивных двигателей// Труды МАИ, 2012. Выпуск 50. www.mai.ru/science/trudy/
- 8*. Гниздор Р.Ю., Нестеренко А.Н., Митрофанова О.А. Форсирование СПД-100 по тяге// Труды МАИ, 2012. Выпуск 60. www.mai.ru/science/trudy/
- 9*. Митрофанова О.А., Румянцев А.В. Исследование влияния параметров и топологии магнитного поля периферийной зоны стационарного плазменного двигателя на эффективность работы катода-компенсатора // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта, 2012. Выпуск 4. С. 44-51.
10. Mitrofanova O. A., Gnizdor R. Yu. Influence of SPT magnetic field on life time characteristics of the thruster. IEPC-2013-51// Proc. of 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D.C, USA, October 6 – 10, 2013.

* отмечены российские журналы из списка ВАК и патенты РФ.