

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ФАКЕЛ»**



На правах рукописи

МИТРОФАНОВА Ольга Александровна

**Влияние величины и топологии магнитного поля на интегральные
характеристики стационарных плазменных двигателей**

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

Диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
профессор Румянцев А.В.

Калининград – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Выходные и ресурсные характеристики стационарных плазменных двигателей и их зависимость от конструкции и параметров магнитных систем.....	12
1.1 Анализ требований к выходным и ресурсным характеристикам современных ЭРД....	12
1.2 Анализ зависимостей между выходными и ресурсными характеристиками СПД и параметрами магнитной системы двигателя	16
1.3 Схемы, конструкции и параметры магнитных систем СПД.....	24
1.4 Основные направления и задачи диссертационной работы.....	33
Глава 2. Отработка и верификация расчетных методик численного моделирования магнитного поля СПД.....	34
2.1 Анализ современных методик расчета магнитных систем СПД.....	34
2.2 Методика расчета магнитного поля СПД с применением ППП NISA	41
2.3 Верификация расчетных моделей.....	57
2.4 Анализ оптимальности массовоэнергетических характеристик магнитных систем.....	62
Глава 3. Зависимость ресурсных характеристик СПД от параметров и конфигурации магнитного поля. Исследования влияния магнитного поля на рабочие характеристики катода-компенсатора и двигателя в целом	70
3.1 Анализ результатов ресурсных испытаний и определение взаимосвязи между геометрическими характеристиками зон эрозии РК и величиной и топологией магнитного поля в УК СПД	71
3.2 Анализ влияния параметров магнитного поля на рабочие характеристики катода-компенсатора	79
3.3 Описание исследуемых лабораторных моделей двигателей	85
3.4 Исследование по оптимизации положения катода-компенсатора на периферии анодного блока СПД.....	89
3.4.1 Результаты исследования структуры ускоренного потока в зоне размещения катода-компенсатора	89

3.4.2	Результаты исследования скорости эрозии контрольных образцов в зоне размещения катода-компенсатора	91
3.4.3	Оценка конфигурации магнитного поля в месте размещения катода-компенсатора. Исследования влияния материала поджигного электрода на работу катода-компенсатора	92
3.4.4	Исследование влияния величины магнитного поля в месте размещения катода-компенсатора на эффективность его работы	100
3.4.5	Результаты ускоренных испытаний по оптимизации местоположения катода-компенсатора.....	106
3.5	Рекомендации по определению оптимального места размещения катода на периферии анодного блока СПД	114
Глава 4. Разработка экспериментальных лабораторных моделей СПД с повышенными выходными и ресурсными характеристиками.....		120
4.1	Разработка СПД с повышенными выходными и ресурсными характеристиками	120
4.2	Экспериментальное оборудование и методики испытаний.....	124
4.3	Результаты испытаний по определению тяговых параметров разрабатываемого СПД ...	129
4.4	Исследование расходимости струи разрабатываемого СПД	131
4.5	Исследование ресурсных характеристик разрабатываемого СПД.....	133
4.6	Рекомендации по проектированию магнитных систем СПД с требуемыми выходными и ресурсными характеристиками.....	136
Заключение		136

Введение

В настоящее время в составе космических летательных аппаратов (КА) широко используются 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.

Основная область их современного использования – коррекция орбиты КА. Планируется применение СПД и для межорбитальной транспортировки, поддержания длительной работоспособности КА на геостационарной орбите (ГСО) со сроками активного существования (САС) 12-15 лет, межпланетных перелетов и полетов в дальний космос. Расширение спектра задач, решаемых СПД, приводит к повышению требований к выходным и ресурсным характеристикам двигателей. Актуальной становится разработка новых двигателей с более высоким значением удельного импульса тяги (1000..3000 с и более) при обеспечении высокой эффективности работы, увеличенным огневым ресурсом (10000 часов и более) и пониженной расходимостью плазменной струи. Кроме того, для выполнения одной ЭРДУ с СПД нескольких задач требуется и обеспечение многорежимности работы двигателей по мощности, тяге и скорости истечения рабочего тела.

Разработка СПД на данный момент осуществляется на основе многолетнего опыта с использованием только общих представлений о физических процессах в двигателе в связи с их сложностью и недостаточной изученностью. Все существующие расчетные модели позволяющие выбрать оптимальные конструктивные параметры и режимы работы СПД, являются полуэмпирическими или содержат большое количество подгоночных коэффициентов [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7].

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.

Ускорение ионного потока в СПД осуществляется «омическим» электрическим полем, определяемым приложенной разностью потенциалов и сопротивлением плазмы, зависящим в основном от подвижности электронов поперек магнитного поля. Согласно результатам экспериментальных исследований, максимальное электрическое сопротивление плазмы и соответственно максимальное электрическое поле в ускорительном канале СПД реализуется в области максимальных значений магнитной индукции. При этом в соответствии с одной из

ключевых идей основоположника СПД А.И. Морозова в силу того, что электроны могут относительно свободно перемещаться вдоль силовых линий магнитного поля и в направлении дрейфа, в первом приближении, конфигурация эквипотенциалей электрического поля в разрядном канале близка к конфигурации силовых линий магнитного поля. Поэтому считается, что необходимая фокусировка ионного потока СПД может быть достигнута подбором оптимальной близкой к симметричной относительно срединной поверхности ускорительного канала «фокусирующей» конфигурации силовых линий с небольшим наклоном к оси двигателя. Таким образом, изменением величины и топологии магнитного поля в разрядном канале СПД можно оптимизировать положение, конфигурацию и протяженность СИУ.

Также, показано, что параметры и конфигурация магнитного поля в ускорительном канале двигателя влияют на эффективность ионизации рабочего тела и положение в канале ядра ионизации (зоны наиболее интенсивной ионизации).

При этом экспериментально установлено, что эрозия стенок разрядной камеры СПД, главным образом определяющая ресурсные характеристики двигателя, начинается именно в области интенсивной ионизации, которая располагается в начальной части СИУ. Поэтому принято считать, что для обеспечения требуемого ресурса двигателя необходима локализация СИУ вблизи выхода из разрядной камеры, так чтобы его основная часть по возможности располагалась за пределами выходной плоскости магнитных полюсов. Кроме того, следует отметить, что ресурсные характеристики СПД определяет и эрозия катодов-компенсаторов, входящих в его состав. Определено, что 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, исследования влияния величины и топологии магнитного поля на интегральные характеристики СПД и формулировка рекомендаций по определению оптимального магнитного поля двигателя представляют большой практический интерес, вследствие чего, тематика данной работы представляется актуальной.

С учетом изложенного выше целями работы являются:

- определение 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 перспективных СПД.

При создании первых моделей СПД определение параметров и топологии магнитного поля осуществлялось, в основном, с использованием экспериментальных методов в связи со

значительной трудоемкостью расчетов. Параметры поля, а именно величина индукции и ее распределение в ускорительном канале двигателя, определялись методом прямых измерений на лабораторных моделях, а конфигурация силовых линий – методом железных опилок. При этом исследования возможных схем магнитных систем и их характеристик проводились с использованием аналогового моделирования – методом электролитических ванн. С развитием вычислительной техники и появлением различных компьютерных программ появилась возможность определения параметров и топологии магнитного поля СПД с использованием математического моделирования, что позволило получать более полную информацию, снизить стоимость работ за счет уменьшения объема экспериментов и значительно сократить сроки их выполнения. Среди компьютерных программ отечественного и импортного производства для расчета магнитных полей в настоящее время наибольшее распространение получили программы, базирующиеся на методе конечных элементов, в частности общедоступная и простая в использовании программа FEMM. Основным недостатком данной программы является отсутствие возможности решения магнитной задачи в трехмерной постановке. Поэтому при проведении расчетов в ней используются упрощенные осесимметричные модели магнитных систем. Однако конструктивные схемы большинства магнитных систем сейчас не являются осесимметричными, т.к. имеют несколько наружных катушек намагничивания, квадратные наружные полюса и т.д.. Для них предпочтительным является всё же трехмерное моделирование, позволяющее определять азимутальное распределение и конфигурацию магнитного поля в ускорительном канале и в периферийной зоне двигателя и получать результаты, наиболее близкие к реальным. В связи с этим в данной работе для проведения исследований магнитного поля СПД в качестве метода исследования был выбран метод математического моделирования с применением более сложной в использовании программы NISA, также основанной на методе конечных элементов, но позволяющей делать трехмерные расчеты. Программа предусматривает создание пользователем геометрии исследуемого объекта, конечно-элементной сетки с выбором мелкости разбиения и типа элементов, задание свойств материалов и метода и точности расчета. Существуют англоязычные пособия с алгоритмами использования данной программы, однако инженеру, решающему конкретные задачи, в данном случае по проектированию МС СПД необходима не только информация теоретического характера, но также и рекомендации об особенностях применения программы на практике. Таким образом, с учетом специфики исследуемых объектов перед проведением исследований возникла необходимость в отработке методики моделирования магнитных систем СПД в NISA.

Сформулированные выше цели предопределили решение следующих задач:

- проведение анализа достоинств и недостатков существующих в настоящее время конструкций и параметров магнитных систем СПД;
- отработка и верификация методики расчета двумерных и трехмерных расчетных моделей магнитных систем с учетом насыщения;
- проведение анализа взаимосвязи геометрических характеристик зон эрозии стенок разрядных камер двигателей различных типоразмеров с величиной и топологией магнитного поля в разрядном канале этих двигателей и определение возможности прогноза геометрических характеристик зоны эрозии по результатам расчета параметров и топологии магнитного поля, разработка соответствующих рекомендаций по использованию;
- проведение экспериментальных исследований влияния магнитного поля в ускорительном канале, а также в области расположения катода на выходные и ресурсные характеристики СПД;
- разработка рекомендаций по проектированию магнитных систем и расположению катода-компенсатора в перспективных СПД.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. определены и обоснованы возможные допущения при построении расчетных моделей магнитных систем 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 слоя ионизации и ускорения в разрядном канале СПД, определяющих границы зон эрозии стенок разрядной камеры, а именно:
 - установлено, что границы зон эрозии на наружной и внутренней стенках разрядной камеры 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 разрядной камеры;
 - 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 разрядной камеры от среза до указанных границ;
3. установлено, что источник ускоренного потока ионов, вызывающего эрозию катода-компенсатора локализован в области, примыкающей к наружному полюсу и наружной стенке

разрядной камеры, 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 разрядной камеры 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 слоя ионизации и ускорения 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 разрядной камеры 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 магнитной системы, 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 катода-компенсатора 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:

1. положение о возможности определения геометрических характеристик зон эрозии стенок разрядной камеры по результатам расчетов параметров и топологии магнитного поля в ускорительном канале СПД;
2. положение о возможности дальнейшего повышения тяговой эффективности, ресурса и снижения расходимости струи двигателя путем оптимизации параметров и топологии магнитного поля в ускорительном канале СПД;
3. положение о влиянии индукции и топологии магнитного поля в прикатодной области на тяговые характеристики двигателя и ресурс катода-компенсатора при его размещении на периферии анодного блока двигателя.

Апробация работы и научные публикации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры прикладной физики БФУ имени 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.

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, H05H 1/54, F03H 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.

Вклад автора заключался:

1. в отработке методики проведения двумерных и трехмерных расчетов параметров магнитного поля СПД при использовании ППП NISA;
2. в разработке расчетных моделей магнитных систем двигателей различных типоразмеров производства ОКБ «Факел» и проведении их верификации;
3. в проведении анализа зависимости ресурсных характеристик СПД от параметров и топологии магнитного поля в ускорительном канале и в области катода при его боковом расположении;
4. в показе возможности повышения эффективности работы двигателя при доработке конструктивной схемы его МС и оптимизации положения катода;
5. в анализе результатов экспериментов и формулировании выводов на их основе;
6. в 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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Изложены сведения об апробации и публикациях и структура диссертации.

В первой главе сформулированы основные направления развития современных СПД. Представлены результаты исследований взаимосвязи выходных и ресурсных характеристик СПД и параметров и топологии магнитного поля двигателя. Проведен анализ существующих в настоящее время конструкций и параметров магнитных систем СПД. Дано обоснование выбора цели диссертационной работы, сформулированы ее основные задачи и намечены общие подходы их решения.

Во второй главе выполнен обзор методов исследования параметров и конфигурации магнитного поля СПД. Проанализированы достоинства и недостатки указанных методов, описана отработанная автором методика моделирования магнитных систем и методика верификации, используемая в ФГУП ОКБ «Факел». Представлены результаты анализа массовоэнергетической эффективности магнитных систем существующих СПД, выполненного по результатам расчетов.

В третьей главе представлены результаты исследования взаимосвязи ресурсных характеристик СПД (геометрических характеристик эрозии стенок разрядной камеры и скорости эрозии катода-компенсатора под действием ионной бомбардировки) с параметрами и топологией магнитного поля как в ускорительном канале, так и на периферии двигателя. Также проанализировано влияние местоположения катода-компенсатора, материала его поджигающего электрода, а так же величины и топологии магнитного поля в прикатодной области на тяговые характеристики двигателя. Разработана методика прогнозирования геометрических характеристик зон эрозии разрядной камеры СПД по результатам расчетов параметров и топологии магнитного поля в ускорительном канале двигателя. Сформулированы рекомендации по оптимальному размещению катода-компенсатора для обеспечения требуемых тяговых и ресурсных характеристик СПД.

В четвертой главе проведен анализ влияния магнитного поля на выходные и ресурсные характеристики СПД путем разработки и экспериментальных исследований лабораторных моделей двигателя с повышенными рабочими характеристиками.

В заключении сформулированы основные выводы по работе и предложения по использованию ее результатов.

В конце диссертации приводится список цитируемой литературы.

Глава 1. Выходные и ресурсные характеристики стационарных плазменных двигателей и их зависимость от конструкции и параметров магнитных систем

В этой главе рассмотрены состояние разработки и направления развития СПД, проанализированы параметры магнитных систем СПД и их взаимосвязь с выходными и ресурсными характеристиками двигателей. Проведен обзор существующих в настоящее время конструкций магнитных систем и выделены возможные направления дальнейшего совершенствования конструкций СПД. Сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы.

1.1 Анализ требований к выходным и ресурсным характеристикам современных ЭРД

Значительная часть космических летательных аппаратов (КА) в настоящее время оснащена двигательными установками на базе электроракетных двигателей (ЭРД). ЭРД представляют собой класс устройств, в которых подводимая электрическая энергия преобразуется в кинетическую энергию струи вещества, истекающего из двигателя (рабочего тела (РТ)) [8]. Преимуществом этих ракетных двигателей над широко применяемыми жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) и другими типами двигателей, использующими газодинамический механизм ускорения, является разнесение источника энергии и ускоряемого вещества. Это позволяет обеспечить высокую скорость истечения РТ (удельный импульс тяги) при значительной экономии его требуемых запасов, что дает возможность увеличения срока активного существования (САС) КА и массы выводимой полезной нагрузки.

Активное развитие ЭРД началось в 60-е годы прошлого века и привело к созданию целого семейства двигателей, отличающихся как способом ускорения РТ, так и режимом работы (импульсный, непрерывный).

ЭРД позволяют решать довольно широкий спектр задач. Основная область современного использования ЭРД – коррекция орбиты и обеспечение ориентации и стабилизации положения КА. В США и Европе уже имеется и опыт применения ЭРД для довыведения на ГСО и выполнения транспортных операций. Например, КА Artemis (ЕКА) с начальной массой 3100 кг и бортовой мощностью 4 кВт, из-за аварии верхней ступени РН Ariane-5 оказавшийся на 5000 км ниже ГСО, за 18 месяцев был выведен на ГСО с помощью ионного двигателя RIT-10 мощностью 0,5 кВт и тягой 18 мН [9]. КА SMART-1 (ЕКА) массой 367 кг и бортовой мощностью 1,9 кВт, выведенный на геопереходную орбиту с перигеем 750 км, с помощью СПД PPS-1350 мощностью 1,5 кВт и тягой 88 мН за 1,5 года совершил перелет на Луну [10]. В сумме двигатель отработал 5000 ч. КА АЕНФ-1 (США) с начальной массой 6168 кг из-за отказа ЖРД был доведен на ГСО с помощью СПД ВРТ-4000 (мощность двигателя около 4,5 кВт и тяга 270 мН) в течение 14 месяцев [11].

К основным выходным характеристикам ЭРД относятся тяга F , удельный импульс тяги I_{yo} , тяговый КПД η , потребляемая мощность N и энергетическая цена тяги C_T [6]. Режимы работы двигателей характеризуются напряжением разряда U_p , током разряда I_p и секундным массовым расходом РТ \dot{m} .

Удельный импульс тяги I_{yo} - это отношение тяги F к весовому секунднему массовому секунднему расходу РТ $\dot{m}g$ в условиях земного тяготения (где g - ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$). I_{yo} измеряется в секундах.

Тяговый (полный) КПД двигателя равен

$$\eta = \frac{FI_{yo}}{2N} = \frac{F^2}{2\dot{m}N}.$$

При этом потребляемая мощность двигателя определяется мощностью разряда N_p , если для катода-компенсатора и магнитной системы не используются отдельные источники питания, в противном случае должны учитываться и затраты энергии на работу этих узлов.

Энергетической цены тяги C_T , определяется как отношение потребляемой двигателем мощности к тяге:

$$C_T = \frac{N}{F} = \frac{I_{yo}}{2\eta}.$$

В настоящее время распространены и такие понятия, как анодный удельный импульс тяги I_{yoa} и анодный КПД η_a , не учитывающие потери РТ в катоде, вычисляемые как:

$$I_{yoa} = \frac{F}{\dot{m}_a},$$

$$\eta_a = \frac{FI_{yoa}}{2N_p} = \frac{F^2}{2\dot{m}_a N_p},$$

где \dot{m}_a - секундный массовый расход РТ через анодный блок.

Важной характеристикой ЭРД является и его ресурс, определяемый как продолжительность работы в заданном режиме до появления дефекта, исключающего возможность дальнейшей эксплуатации двигателя [12].

Требования к выходным параметрам и ресурсу ЭРД существенно зависят от требований, связанных с выполнением возлагаемых на КА задач.

В настоящее время все существующие и разрабатываемые ЭРД условно делят на пять основных групп [13]:

– ЭРД малой мощности для малых КА (50...500 кг) для дистанционного зондирования Земли, метеорологии, картографии и т.д.,

- ЭРД мощностью 1...2 кВт для коммерческих, телекоммуникационных и навигационных спутниковых систем,
- ЭРД мощностью 4...6 кВт для тяжелых КА массой 4...6 т,
- ЭРД мощностью 20...30 кВт для транспортных околоземных и лунных операций,
- ЭРД мощностью 50...100 кВт для исследований дальнего космоса, транспортных операций и межпланетных перелетов.

Тенденции в развитии КА, к которым относятся расширение номенклатуры КА по массе, включая как маломассовогогабаритные аппараты, так и тяжелые спутниковые платформы (сейчас активно создаются как малые КА нового поколения массой менее 1 т и спутниковые системы на их основе, так и тяжелые КА), увеличение САС, появление новых задач для бортовой ДУ (межорбитальная транспортировка; межпланетные перелеты и полеты в дальний космос), включая выполнение одной ЭРДУ нескольких задач, оптимизация массы полезной нагрузки, энерговооруженности и тяговооруженности, повышение надежности, определяют и направления совершенствования ЭРД.

Двигатели нового поколения должны отличаться, прежде всего, более высокими значениями удельного импульса тяги. Для большинства практически интересных современных задач требуемый удельный импульс тяги находится в диапазоне 1000...3000 с, для ДУ межпланетных аппаратов достигает 5000 с и более [6].

Кроме того современные ЭРД должны обладать повышенным ресурсом непрерывной работы (в некоторых задачах до 10000...15000 ч) и пониженным влиянием плазменной струи на функционирование систем КА.

Для выполнения одной ЭРДУ нескольких задач двигатели должны быть многорежимным и допускать регулировку в широких диапазонах мощности, тяги и удельного импульса тяги в процессе полета КА. При этом должна быть обеспечена наибольшая эффективность выполнения каждой из задач.

В России наибольшие успехи достигнуты в разработке и применении ЭРДУ на базе СПД. СПД, известный в литературе так же как «плазменный электромагнитный двигатель с ускорением в магнитном слое» (ДМС), «ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения» (УЗДП), «стационарный плазменный двигатель Морозова»[14], «линейный холловский двигатель» (ЛХД), а за рубежом просто как «холловский» двигатель», был разработан под руководством А.И. Морозова в СССР в Институте Атомной энергии им. М.В. Курчатова (ИАЭ) [5]. Первые летные испытания СПД состоялись в 1972 г.[15], а штатная эксплуатация начата с 1982 г. Начиная с середины 1990-х, успешное сотрудничество российских и иностранных организаций привело к широкому распространению СПД и в

зарубежной космической технике. К настоящему времени созданы модели СПД с мощностями от 100 Вт до ~70 кВт с использованием как традиционных, так и новых конструктивных схем. Основные параметры работы некоторых из них представлены в таблице 1.

Около половины всех работающих или работавших в космосе ЭРД являются двигателями ФГУП ОКБ «Факел» - основного разработчика и производителя СПД в России. Также в последние годы в России разработку летных образцов СПД ведет Исследовательский центр имени М.В. Келдыша. За рубежом созданием и исследованием СПД занимаются компании Aerojet, Busek, фирмы Snecma, Alta S.p.A., TRW, Pratt&Whitney и др.

С учетом перечисленных выше тенденций в развития КА перспективными направлениями развития СПД являются разработка СПД малой мощности для малых КА и СПД, работающих при повышенном разрядном напряжении, обеспечивающем повышенный удельный импульс тяги для межорбитальной транспортировки КА, поддержания длительной работоспособности КА на ГСО, межпланетных перелетов и полетов в дальний космос. При этом, соответственно, актуальной является задача обеспечения повышенного ресурса непрерывной работы двигателей, многорежимности для выполнения нескольких задач и пониженного влияния плазменной струи на функционирование КА.

Таблица 1

Основные параметры работы некоторых СПД

Разработчик	Двигатель	Мощность разряда N_p , Вт	Напряжение разряда U_p , В	Ток разряда I_p , А	Тяга F , мН	Удельный импульс $I_{уд}$, с	Анодный КПД, %
ФГУП ОКБ "Факел" (Россия)	СПД-25	100	90..200		7	800..1000	20
	СПД-50	220	180	1,20	14,0	860	26
	СПД-50PlaS	225	180	1,25	15,3	940	34
	ПлаС-40	225	180	1,25	17,0	1010	37
	СПД-70	660	300	2,2	40	1470	
	СПД-100	1350	300	4,5	83	1600	45
	SPT-1	3100	1250	2,49	87	3105	41
	СПД-100Д	2100	800	2,6	83	2660	52
	СПД-140	4500	300	15	290	1770	50
	СПД-140Д	4800	800	6	180	2750	55
	СПД-290	5000... 30000			≤ 1500	~ 3300	≤ 65
ФГУП ОКБ "Факел" (Россия), Snecma (Франция)	PPS1350	1500	350	4,28	89	1740	51
Snecma (Франция)	PPS-X000	≤ 6000	585		232	2480	55,6

Продолжение таблицы 1							
Научно-исследовательский центр им. Джона Х. Гленна (GRC) агентства NASA (США)	HiVHAC	≤ 3600	200-800		20-150	900-2700	>55
	NASA-173Mv1	8500	900	9,4	327	3030	56
	NASA-457M	50000	500	100	2330	2747	63
Массачусетский институт (США)	DCHT	102...538			13,4	1641	
	MHT-9	203	300		7,1	1676	
Принстонский университет (США)	СНТ	90...185				1100...1650	
Технион (Израиль)	CAMILA	150..250	250-300		9,65-17,8	1405-1870	~ 45
Busek Company (США)	BHT-200	200	250	0,82	12,4	1300	42
	BHT-8000	≤ 8000	300		512	1900	60
	BHT-HD-1000	≤ 2500	950		84,5	2873	42
Aerojet (США)	BPT-4000	≤ 4500	800		184	2620	52
Исследовательский центр имени М.В. Келдыша	КМ-45	450			28	1800	45
	КМ-60	372	500		36	1716	
	КМ-5	≤ 2500					
	КМ-7	≤ 4500	300	15	290	1793	57

1.2 Анализ зависимостей между выходными и ресурсными характеристиками СПД и параметрами магнитной системы двигателя

СПД представляет собой источник ускоренного потока плазмы, которая образуется и ускоряется в разряде на РТ, горящем в скрещенных электрическом и магнитном полях [5; 6].

Схема СПД представлена на рисунке 1.

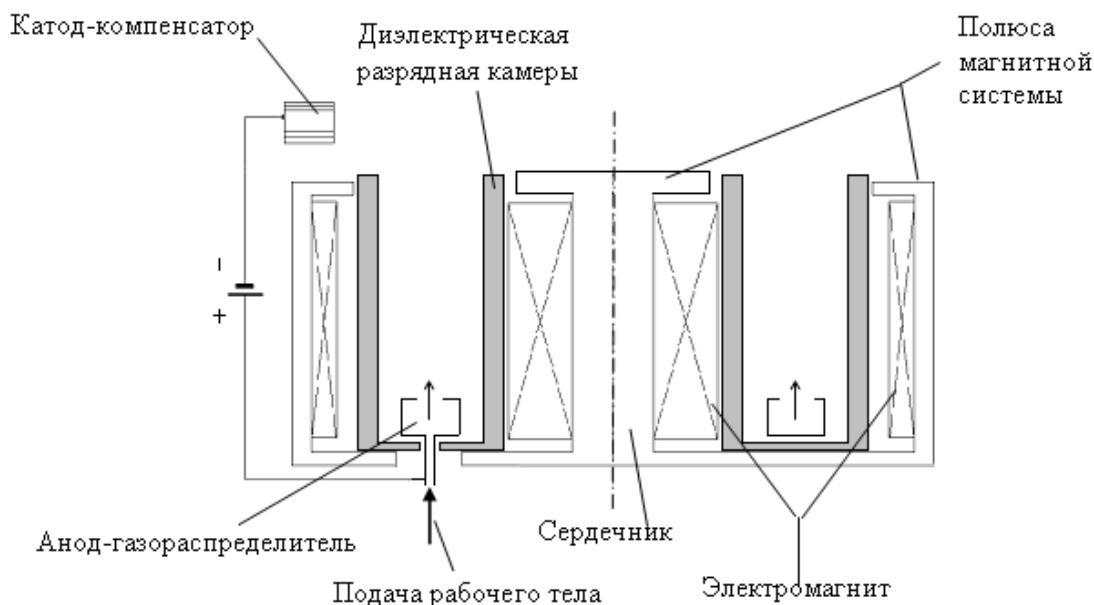


Рис. 1 Схема СПД

Конструктивно СПД состоит из двух основных узлов – анодного блока и катода-компенсатора.

Анодный блок в традиционном исполнении состоит из магнитной системы (МС), разрядной камеры (РК) и анода-газораспределителя, через который обычно подается РТ, хотя возможно использование и отдельного газораспределителя. В качестве РТ могут использоваться инертные и активные газы, щелочные металлы и др. Наиболее широкое распространение получил ксенон.

Катод-компенсатор (К-К) является отрицательным электродом в плазменном разряде и служит источником электронов, часть которых направляется в ускорительный канал (УК) и участвует в процессе получения и ускорения плазмы, а остальные - уходят с истекающей из двигателя струей, компенсируя её объемный заряд ионов. Катод размещают, как правило, около двигателя.

После подготовки к работе К-К и подачи в анод РТ между анодом и катодом зажигается разряд, и приложенным между ними напряжением создается разность потенциалов между различными частями плазмы разряда, где рождаются ионы, и плазмой на выходе из двигателя, в которой ускоряются ионы. Часть электронов с катода, попавших в УК под действием электрического поля, дрейфуют по азимуту в скрещенных осевом электрическом и радиальном магнитном полях, ионизируют атомы ксенона и, в конечном счете, попадают на анод. Напряженность магнитного поля подбирается такой, чтобы ларморовский радиус электронов был существенно меньше длины УК, а ларморовский радиус ионов – намного больше. Образовавшиеся ионы, ускоряясь в электрическом поле вдоль РК, образуют направленный поток ионов (струю плазмы), создающий реактивную тягу. При этом предполагается, что основные процессы ионизации и ускорения в СПД происходят в едином слое ионизации и ускорения (СИУ).

Необходимо отметить, что для данной конфигурации РК двигателя электрическое поле в плазме, ускоряющее ионы в осевом направлении, может существовать только при наличии радиального магнитного поля, замагничивающего электроны, и азимутального дрейфа электронов. Вклад в тягу электронов, поступающих в плазменную струю из К-К и уходящих из двигателя вместе с ионами, незначителен из-за малости массы электронов по сравнению с массой ионов. На выходе РК остальные электроны компенсируют ионный поток и пространственный заряд так, что автоматически выполняется условие равенства нулю полного тока плазменной реактивной струи, истекающей из двигателя. Такое условие позволяет автоматически поддерживать потенциал КА, лишь немногим отличающимся от потенциала окружающего космического пространства.

Таким образом, магнитное поле играет существенную роль в организации рабочих

процессов в СПД, в значительной степени, определяя уровень его основных характеристик.

При этом в общем случае при работе двигателя оно представляет собой суперпозицию магнитного поля от МС – внешнее или наложенное магнитное поле – и от токов заряженных частиц в УК – наведенное токами поле. Как показывают оценки [16], магнитное поле, создаваемое заряженными частицами, будет мало. Магнитное же поле от замкнутого азимутального холловского тока (тока электронов), существующего из-за наличия скрещенного электрического и магнитного полей, может составлять ~10 % от общего магнитного поля на номинальных режимах. При увеличении же расхода РТ или при увеличении разрядного напряжения холловский ток увеличивается, но при этом обычно также увеличивают и токи в катушках намагничивания, вследствие чего увеличивается и значение внешнего магнитного поля. Поэтому наведенными токами в разряде обычно и пренебрегают.

Известно, что изменением параметров (распределения и конфигурации) магнитного поля двигателя можно управлять параметрами электрического поля в УК. Определено, что электрическое поле в УК достигает значительной величины в области с максимальными значениями индукции магнитного поля, где реализуется основное падение потенциала. Поэтому считается, что параметры слоя ионизации и ускорения (СИУ), а именно его положение и протяженность, в УК СПД зависят не только от режима работы двигателя, но и, главным образом, от распределения величины магнитного поля в УК. Вопрос о точном расположении СИУ остается нерешенным, но экспериментально установлено, что верхняя граница слоя соответствует положению максимального значения радиальной индукции $B_{r \max}$ по срединной линии УК, а нижняя – положению некоторой величины $kx B_{r \max}$, где k – некоторый численный коэффициент, известные значения которого находятся в диапазоне 0,6..0,9 [17; 18; 19; 20]. Кроме того конфигурация эквипотенциалов электрического поля в УК может быть близка к конфигурации силовых линий магнитного поля [1], так как электроны могут свободно перемещаться вдоль силовых линий. Принято считать, что для обеспечения необходимой фокусировки ионного потока магнитные силовые линии в УК СПД должны иметь выпуклую форму и формировать «магнитную линзу». Согласно формуле «термализованного потенциала», который является инвариантом вдоль силовой линии:

$$\Phi^*(\gamma) = \varphi(x) - T_e \ln\left(\frac{n_e}{n_0}\right),$$

(где $\Phi^*(\gamma)$ - «термализованный» потенциал, постоянный вдоль силовой линии; γ - номер силовой линии; T_e - температура электронов, эВ; n_e - концентрация электронов; n_0 - характерное, например, максимальное значение концентрации плазмы на данной линии), отклонение эквипотенциалов от силовых линий определяется температурой электронов. Для ее снижения РК СПД изготавливается из керамики с высокой вторичной эмиссией электронов.

Тем не менее, согласно измерениям температура электронов в канале всё же достаточно высока, а их распределение существенно неравномерно. Поэтому возможности фокусировки ионного потока пока еще ограничены. Однако, оптимизация конфигурации магнитного поля в УК позволяет несколько улучшать фокусировку ионов, повышая тяговую эффективность двигателя и снижая расходимость струи. Экспериментально определено, что оптимальной можно считать конфигурацию магнитного поля, близкую к симметричной относительно срединной поверхности УК, но с небольшим наклоном силовых линий к оси двигателя [5].

В работе [21] показано, что вольтамперные характеристики и колебания плазмы в системе зависят от закона изменения радиальной индукции вдоль РК. Согласно экспериментальным результатам наименьший ток разряда и соответственно наибольший КПД достигается при таком пространственном распределении индукции магнитного поля, когда ее радиальная составляющая $B_r(z)$ увеличивается по мере удаления от анода и достигает максимального значения вблизи выхода из РК (градиент поля $\nabla_z B_r(z) > 0$). При этом для определенной конструкции МС и РК двигателя при постоянном ускоряющем напряжении и расходе существует оптимальное максимальное значение радиального магнитного поля $B_{r \max}$ в выходной части канала, которое определяется, как правило, экспериментально. В первом приближении считается, что оно пропорционально разрядному напряжению $B_{r \max} \sim \sqrt{U_p}$, а при одинаковом разрядном напряжении уменьшается с увеличением ширины УК [5].

В работе [22] отмечается, что сама величина продольного, положительного градиента магнитного поля оказывает существенное влияние на эффективность работы СПД. В СПД с более высоким продольным градиентом, действительно, удастся существенно улучшить организацию электростатической фокусировки, так как при этом увеличивается электрическое поле в фокусирующей области, происходит сужение СИУ в канале двигателя, и снижение потерь ионов на стенках канала. Наибольший положительный продольный градиент магнитного поля достигается в случае, когда магнитная индукция вблизи анода близка к нулю. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что для достижения более высоких выходных характеристик СПД величина индукции у анода должна быть даже меньше нуля [23]. Для количественной оценки был предложен магнитный параметр $K_b = 1 - \frac{(B_r)_a}{(B_r)_{\max}}$ (где $(B_r)_{\max}$ - максимальное значение магнитной индукции по срединной линии УК СПД, $(B_r)_a$ - значение магнитной индукции в зоне расположения анода, взятое так же посередине канала), численное значение которого для оптимальной работы МС должно находиться в диапазоне 1..1,15 в зависимости от режима работы двигателя (см. рис. 2).

Также предполагается, что для обеспечения минимальных потерь ионов на стенках

максимум градиента магнитного поля должен располагаться вблизи средней линии РК, так как экспериментально определено, что наиболее интенсивная ионизация нейтрального газа происходит в области, осевое положение которой совпадает с положением максимального градиента магнитного поля [6; 24].

Кроме того, показано, что изменяя параметры магнитного поля можно не только организовать удовлетворительную фокусировку ионного потока в двигателе, но и обеспечить эффективную ионизацию РТ [6]. Для этого необходимо, чтобы в УК двигателя индукция вблизи средней линии УК была минимальна и возрастала по мере приближения к стенкам РК, формируя так называемую «магнитную бутылку», что предотвратило бы столкновения некоторой группы электронов со стенками РК и позволило удержать их в зоне ионизации (см. рис. 3).

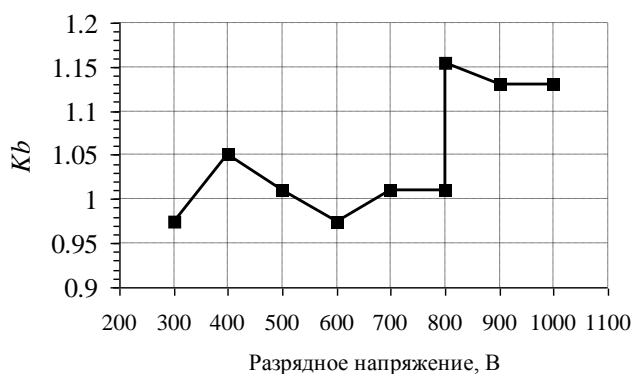


Рис. 2 Зависимость величины параметра K_b от разрядного напряжения

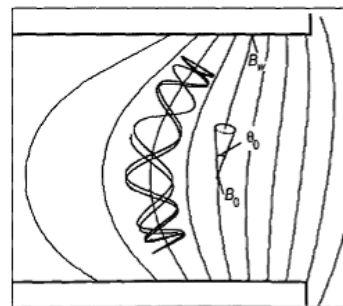


Рис. 3 Конфигурация магнитного поля в УК СПД, эффект «магнитной бутылки»

Для определения эффективности удержания предлагается использовать функцию:

$$\Omega(z, r) = \begin{cases} \sqrt{1 - \frac{B(z, r)}{B_w(z, r)}}; & B(z, r) \leq B_w(z, r) \\ 0; & B(z, r) > B_w(z, r) \end{cases}$$

(где B_w - значение индукции магнитного поля в точке пересечения силовой линии со стенкой, а если точнее в точке, которая будет соответствовать моменту касания стенки и ларморовской окружности электрона), более высокое значение которой в области ионизации должно соответствовать более высокой эффективности удержания электронов. Предлагается и ряд количественных критериев более сложных для расчета.

Учитывая существующую взаимосвязь между положением и протяженностью СИУ и параметрами магнитного поля в УК, необходимо подчеркнуть влияние магнитного поля и на ресурсные характеристики СПД. Известно, что требуемое время огневой работы СПД достигает весьма больших значений (5..10 тысяч часов и более). В таблице 2 приведены ресурсные характеристики некоторых разработанных на настоящий момент СПД [25].

В процессе работы двигателя элементы и узлы его конструкции, находящиеся в зоне воздействия истекающей плазмы, подвергаются эрозии. Вследствие чего происходят изменения

их конфигурации, которые, в свою очередь, могут быть причиной как нестабильности параметров работы двигателя, так и причиной полной потери его работоспособности [26; 27]. Кроме того распыляемый материал переносится на стенки разрядного канала в его прианодной области, что может привести к изменениям их электрофизических свойств (проводимость, вторичная электронная эмиссия и другие), оказывающих влияние на работу двигателя, а также осаждается и на функциональные поверхности КА, например, на элементы оптики, солнечные батареи, терморегулирующие покрытия, ухудшая их технические характеристики [2; 28].

Таблица 2
Ресурсные характеристики некоторых разработанных на настоящий момент СПД

Двигатель	Предсказываемый ресурс, ч	Подтвержденное время работы, ч	Начало эрозии магнитных полюсов, ч	Разрядная мощность, кВт	Максимальная скорость износа, мкм/ч	Материал РК
СПД-50	≥ 2500	825		0,20		БГП-10
СПД-70	≥ 3000	3100		0,66	3,6	БГП-10
СПД-100	>9000	7515	<7000	1,35	10,1	БГП-10
SPT-140	> 6300	>1000		4,5	13,2	BN
PPS®1350-G	>10530	10530	>10530	1,5	10,4; 6	
BPT-4000	> 2000-40000	10,400	20000-40000	4,5 (1-4,5)		BN
NASA-103M.XL	>15000	5000	>15000	3,1; 3,5		BN
NASA-120M		200		1,65	9,0	HP BN
BHT-600	≥ 932	932		0,615	≈ 3,6	HVC BN
KM-45	3500-4000	1020	3500-4000	0,31		БГП-10
KM-32	3000	500	2000-3000	0,20	5,2	HP BN
BHT-200	>1700	>1700	1287-1519	0,20	≈ 3,8	HVC BN
HT-100	1500	445	300	0,175	9	
MIT DCFT	>1220	204	1220	0,165	1,9	HP BN

Прогноз ресурсных характеристик СПД, как правило, строится на основе анализа степени эрозии выходной части канала РК, а также степени эрозии К-К (см. рис. 4). При длительной работе двигателя эрозия стенок РК происходит вплоть до полного их разрушения, при котором ионной бомбардировке начинают подвергаться и элементы МС, а именно магнитные полюса, обладающие низкой стойкостью к распылению (см. рис. 5). Ресурс двигателя принято считать исчерпанным к моменту начала распыления магнитных полюсов, но иногда его определяют и как период времени, в течение которого выходные характеристики

двигателя остаются в пределах требуемых для решения некоторой баллистической задачи значений [27].

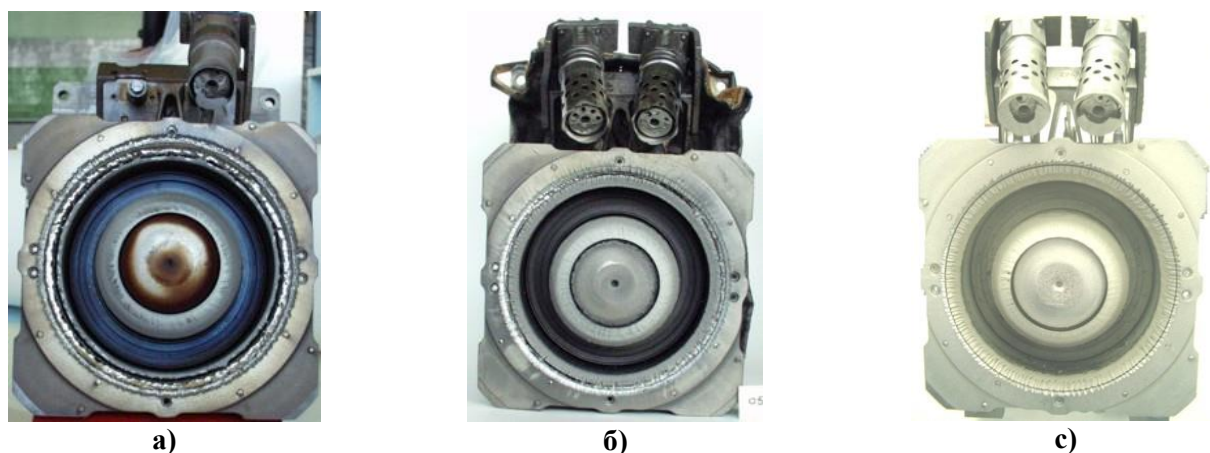


Рис. 4 Внешний вид SPT-100 после наработки: 9066 ч для #03 (а); 7424 ч для #05 (б); 6900 ч для #49 (в)

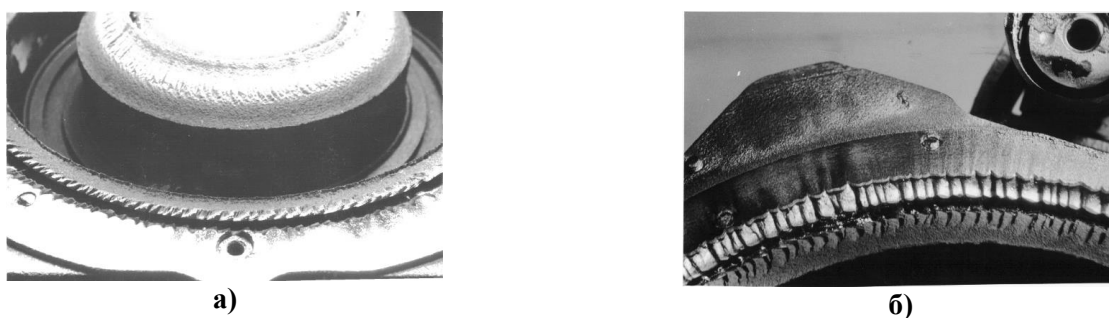


Рис. 5 Состояние основных элементов СПД-100 №05 после 7008 ч: а) наружной и внутренней стенок изолятора РК; б) наружного изолятора и наружного магнитного полюса

Известно, что положение границы зоны эрозии в канале РК непосредственно связано с положением СИУ. Считается, что эрозия начинается в области интенсивной ионизации [3; 5]. Поэтому для обеспечения требуемого ресурса РК в современных СПД создается такое распределение магнитной индукции, чтобы СИУ был локализован вблизи выхода из РК, и чтобы, по возможности, его основная часть располагалась за пределами выходной плоскости полюсов МС, то есть двигатель проектируется таким образом, чтобы на стенки РК попадало минимальное количество ускоренных ионов. Такая схема двигателя называется схемой с вынесенной зоной ускорения и в большей или меньшей степени она реализована в двигателях типа СПД-100 и СПД-140 [27], двигателе ВРТ- 4000 [29] и других. При этом удается обеспечить достаточно высокий уровень тяговой эффективности при увеличенных запасах на эрозию стенок РК. Обеспечение названного выноса в большинстве современных двигателей реализуется с помощью магнитных экранов.

В некоторых работах отмечается и взаимосвязь положения зон эрозии с конфигурацией магнитного поля в УК [24; 29; 30]. Появилось предположение, что при достаточно большой эрозии стенок РК их геометрия приблизится к силовым линиям магнитного поля [29]. При этом

ождается, что скорость эрозии стенок существенно снизится. Тенденции такого рода были обнаружены уже при ресурсных испытаниях двигателей СПД-100, а затем и PPS-1350 [27]. Проявились они и при ресурсных испытаниях двигателя ВРТ-4000. Таким образом, возможности совершенствования двигателя с целью повышения его ресурса на настоящее время не исчерпаны, и проведение исследования взаимосвязи между процессами эрозии стенок РК и параметрами и топологией магнитного поля СПД представляется актуальным.

Не менее важной также является проблема обеспечения ресурса катода-компенсатора СПД, так как эффективность работы двигателя, его надежность и ресурсные характеристики в значительной степени определяются и условиями функционирования и надежностью К-К, входящего в его состав. А это в первую очередь зависит от положения катода и конструктивных особенностей самого двигателя [31; 32].

На рисунке 6 показано состояние К-К СПД после проведения ресурсных испытаний.

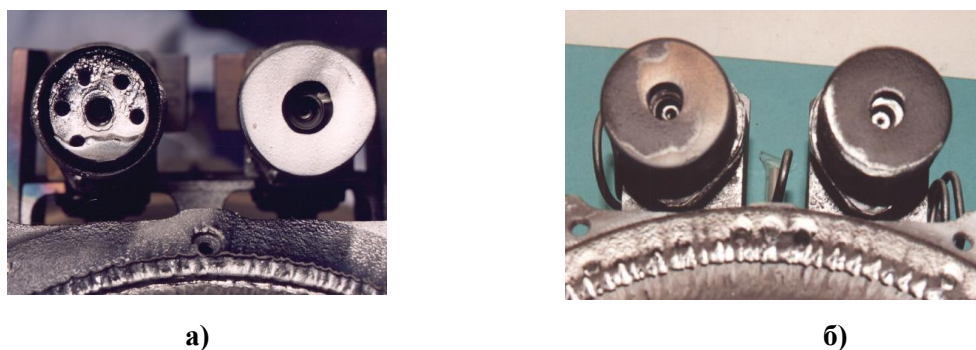


Рис. 6 Состояние К-К СПД после проведения ресурсных испытаний: а) катоды SPT-100 #03 после ~5000 ч испытаний в JPL; б) катоды PPS1350 после 5400 ч

Обычно местоположение К-К относительно анодного блока двигателя выбирают по результатам прямых огневых испытаний. Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на его выбор с точки зрения эффективности работы К-К, являются величина и конфигурация магнитного поля в месте его размещения. Как правило, К-К выдвигают в зону среза РК, где магнитные силовые линии замыкаются между магнитными полюсами [33]. При этом элементы и узлы К-К оказываются под воздействием истекающего потока плазмы и подвергаются распылению, что недопустимо [34]. Поэтому актуальной представляется и задача по определению оптимального месторасположения катода, обеспечивающего, с одной стороны, высокие энергетические параметры СПД и, с другой стороны, необходимый срок безотказной работы катода.

На основании выше изложенного можно сделать следующие выводы:

- магнитное поле является одним из наиболее существенных факторов, определяющих протекание рабочих процессов в СПД;
- изменения параметров и конфигурации магнитного поля приводят к значительным изменениям выходных и ресурсных характеристик СПД.

Поэтому, учитывая тот факт, что магнитное поле двигателя формируется МС, особое

внимание следует уделить анализу ее различных конструктивных схем с целью определения путей дальнейшего совершенствования для создания современных высокоэффективных двигателей.

1.3 Схемы, конструкции и параметры магнитных систем СПД

Существующие СПД содержат разнообразные МС. В данном разделе рассмотрены их основные разновидности и сделана попытка их классификации (см. рис. 7).

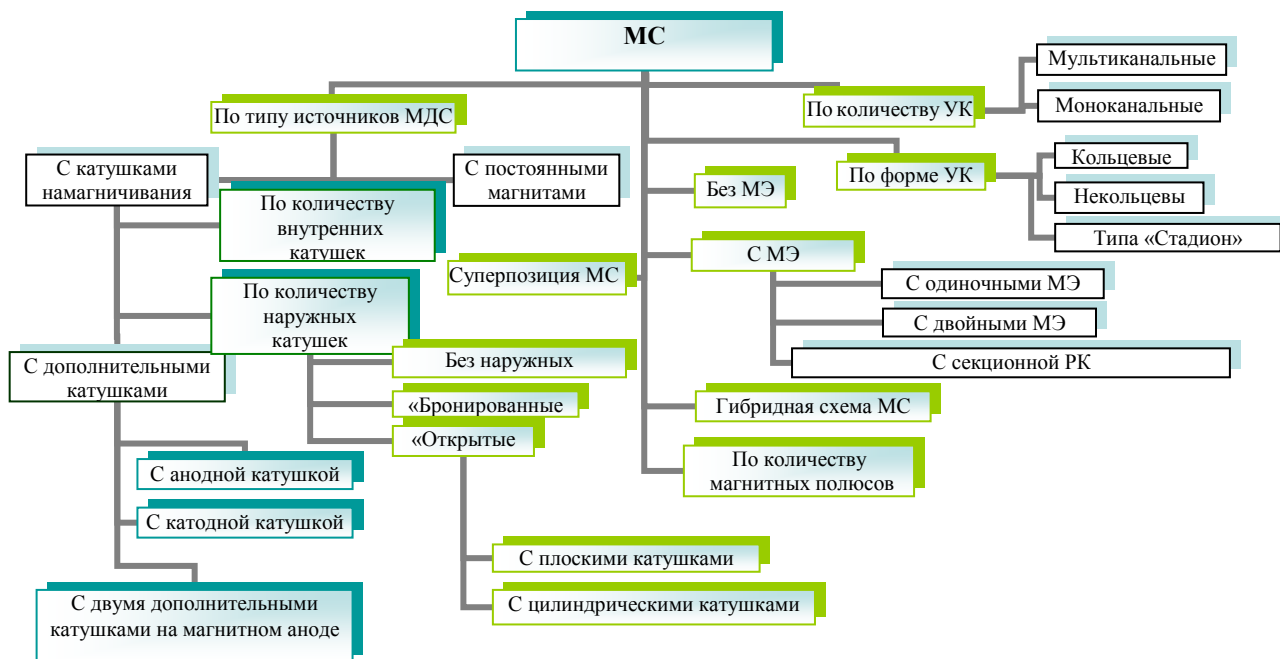
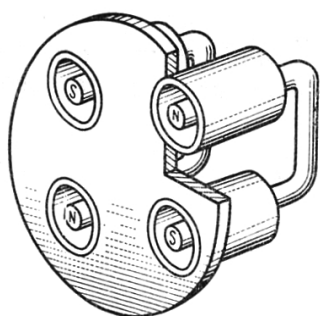


Рис. 7 Классификация МС существующих СПД

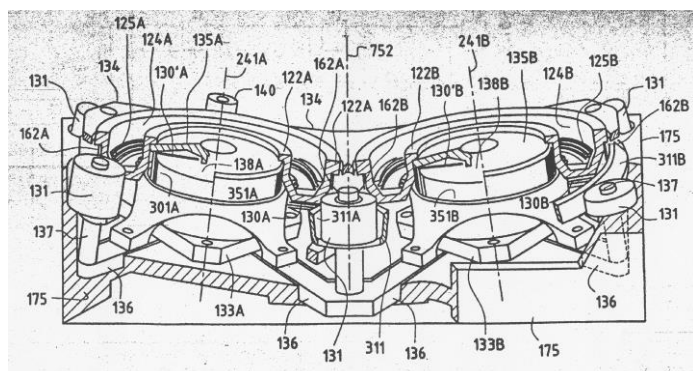
Как правило, МС состоит из магнитопровода с полюсами, формирующими в УК требуемое магнитное поле, и источников магнитодвижущей силы (МДС). Источники МДС могут быть выполнены в виде катушек намагничивания или постоянных магнитов. Поэтому для начала все МС СПД естественно разделить по типу источников МДС на две группы: МС с катушками намагничивания и МС с постоянными магнитами. Использование МС с постоянными магнитами способствует значительному снижению массы, размеров, мощности двигателя, а так же температуры вследствие отсутствия эффекта Джоуля, и кроме того способствует повышению надежности в связи с уменьшением длины высокотемпературных кабелей в комплексе с питанием постоянным током. К недостаткам таких МС относится тот факт, что магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, меняется с течением времени и при воздействии внешних условий. Кроме того в конструкциях с использованием только постоянных магнитов при проведении огневых испытаний отсутствует возможность регулирования величины МДС с целью оптимизации параметров двигателя, поэтому в таких схемах рекомендуется применять и дополнительные (корректирующие) катушки

намагничивания. Как правило, постоянные магниты используются в МС двигателей малой мощности. С применением постоянных магнитов разработаны двигатели НТ-100 [35; 36] НТ-400 [37], ДСНТ [25; 32; 38], МНТ-9 [39], ТСНТ-3В [40], ТСНТ-4 [41], СНТ [42; 43; 44] и др.

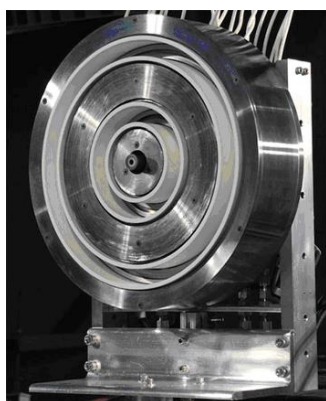
Далее, рассматривая конструктивные особенности двигателей, можно выделить еще несколько типов МС. Во-первых, если в качестве классификационного признака использовать количество УК, существуют мультиканальные [45; 46; 47; 48; 49] и моноканальные МС. Использование двигателей с мультиканальными МС (см. рис. 8), то есть МС, формирующими магнитное поле сразу в нескольких рабочих (межполюсных) зазорах (УК), позволяет получать расширенный диапазон рабочих характеристик. Если сравнивать их со связками двигателей, рассчитанных на ту же мощность, они обладают преимуществом, так как имеют не только единую МС, но и объединенную систему подачи РТ. А это позволяет снизить массу и за счет резервирования УК существенно повысить суммарную надежность и ресурс. Так же мультиканальные МС позволяют регулировать направление вектора тяги путем выключения или изменения режима работы одного или нескольких двигателей, или с помощью конструктивных особенностей самой МС.



а) Схема мультиканального двигателя



б) Схема, предложенная в [46]



в) СПД с двумя коаксиальными ускорительными каналами [47; 48; 49]

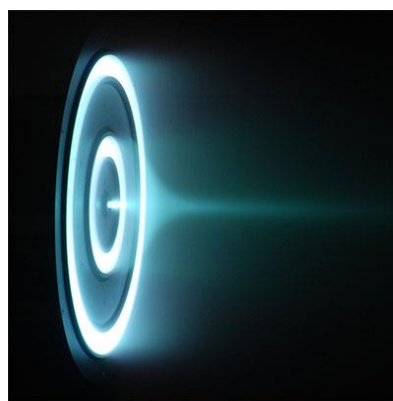
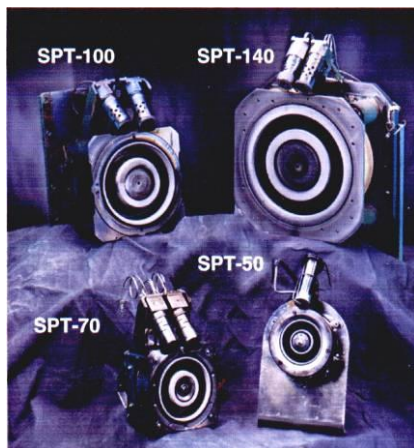


Рис. 8 СПД с мультиканальными магнитными системами

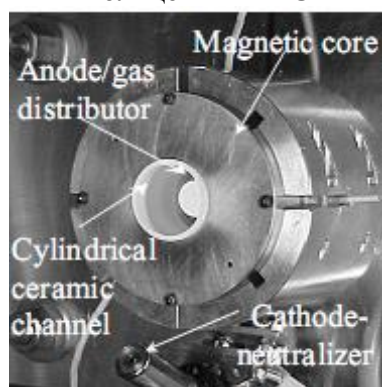
По форме рабочего зазора все МС можно разделить еще на несколько типов: кольцевые (рис. 9, а)), МС типа «стадион» (рис. 9, б)) и некольцевые МС (цилиндрические МС (рис. 9, в)), конусообразные МС (рис. 9, г)) и др.



а) СПД-50, СПД-70, СПД-100, СПД-140 с кольцевыми МС



б) СПД с МС типа «стадион»



в) СПД СНТ с цилиндрической МС



г) СПД ДСНТ с конусообразной МС

Рис. 9 СПД с моноканальными МС

К МС типа «стадион» относятся системы, рабочий зазор (УК) которых имеет протяженный прямолинейный участок, к некольцевым – МС с некольцевой (цилиндрической, конусообразной) формой УК. К двигателям с некольцевыми МС относятся двигатели СНТ [50; 51; 52; 53], ДСНТ, ТСНТ-3В, ДСНЕТ [54] и др. В таких СПД используются цилиндрические или конусообразные РК. Предполагается, что при такой форме УК удастся преодолеть некоторые физические и технологические ограничения, которые обычно возникают при масштабировании СПД в сторону уменьшения их геометрических размеров. В частности, отсутствие внутренней стенки РК уменьшает отношение площади поверхности РК к ее объему, что должно приводить к снижению суммарного потока частиц на стенки камеры и, следовательно, снижению эрозии стенок и нагрева элементов двигателя.

Кольцевые МС - это МС с кольцевым рабочим зазором. В настоящее время большинство СПД имеет именно кольцевой тип МС.

Все МС можно так же подразделить и **по количеству содержащихся в них катушек намагничивания.**

Во-первых, **по количеству наружных катушек** МС бывают «открытые», «бронированные» и вообще не содержащие наружных катушек. «Открытые» МС – это МС, имеющие более одной наружной катушки намагничивания. При использовании «открытых» МС:

- облегчается радиационный сброс тепла с элементов МС в силу «открытости» ее боковой поверхности (через проемы между наружными катушками), обеспечивая надежное функционирование двигателя в условиях действия высоких температур;
- снижается энергопотребление наружной системы катушек намагничивания в силу уменьшения общей длины проводов в этой системе, по сравнению с МС, имеющими одну наружную катушку;
- существует возможность электромагнитного управления вектором тяги.

Но учитывая тот факт, что МС составляет основу силовой схемы двигателя, необходимо подчеркнуть, что такая конструкция является недостаточно прочной, так как базируется на нескольких цилиндрических стрержнях относительно малых диаметров. Кроме того использование стрержневых наружных катушек приводит к неравномерному азимутальному распределению магнитного потока в элементах конструкции, оказывая влияние на азимутальную равномерность распределения магнитного поля в УК, а следовательно и на выходные характеристики двигателя. Однако, с увеличением количества наружных катушек намагничивания данные недостатки практически исчезают.

«Бронированный» вариант МС достигается путем замены нескольких наружных катушек намагничивания одной цилиндрической. Данный вариант не имеет преимуществ «открытой» МС и предпочтителен в случаях, когда имеются жесткие ограничения по уровню внешних магнитных полей, создаваемых при работе двигателя.

Применение «бронированного» варианта позволяет:

- уменьшить собственный магнитный момент двигателя;
- уменьшить возможное влияние рассеянных магнитных полей на аппаратуру КА;
- сделать конструкцию более прочной;
- добиться высокой азимутальной равномерности распределения магнитного поля в УК.

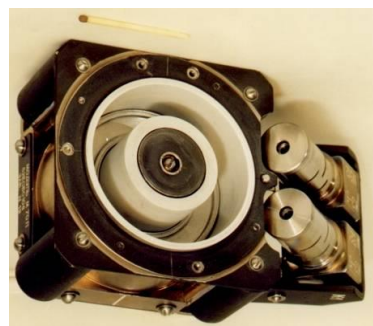
В последнее время при разработке двигателей предпринята попытка создания МС, сочетающих в себе обеспечение высокой азимутальной однородности магнитного поля при низкой теплonaпряженности конструкции и повышенной механической прочности за счет применения наружных катушек плоской формы, которые по периферии магнитного контура большим своим размером размещаются тангенциально относительно межполюсного зазора. В

отличие от МС с наружными катушками цилиндрической формы, МС с плоскими катушками более механически устойчивы из-за более протяженной опорной базы каждого сердечника [55].

Иногда применяются МС и без наружных катушек намагничивания, как правило, в двигателях малой мощности (СПД-20, СПД-25 [56; 57] и др.). Это упрощает испытания и приводит к снижению веса конструкции и энергопотребления.



а) СПД М-50 с «бронированной» МС



б) СПД М-70 с «открытой» МС



в) Прототип Плас-40 с МС, содержащей три наружные катушки плоской формы

Рис. 10 Примеры СПД с различными по количеству наружных катушек намагничивания МС

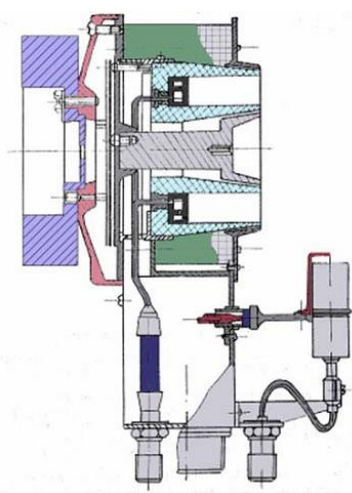
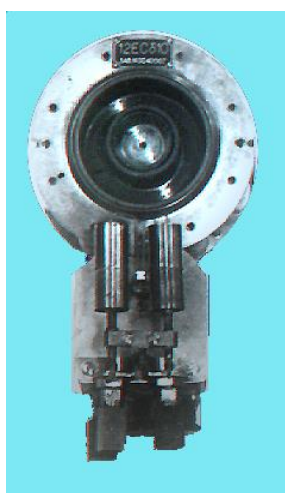


Рис. 11 Модель СПД Р-60 с МС, не содержащей внутреннюю катушку намагничивания

Во-вторых, по количеству внутренних катушек МС делятся на системы с отсутствием внутренней катушки, с одной и несколькими катушками намагничивания. Так первая корректирующая двигательная установка «Эол-1» содержала СПД Р-60 (см. рис. 11) с кольцевой МС только с 8-ю наружными катушками намагничивания [58]. При

дальнейшем совершенствовании СПД МС стала проектироваться и с внутренней, и с наружными магнитными катушками, что позволило легко управлять параметрами и

конфигурацией магнитного поля в канале и выбирать оптимальное поле, гарантирующее высокий уровень тяговой эффективности двигателя. В настоящее время большинство СПД имеют такой тип МС. Разрабатываются и более мощные СПД с двумя и более внутренними катушками (СПД-290 и др.).

Кроме основных катушек намагничивания МС могут содержать и **дополнительные катушки**, которые используются для расширения возможностей управления магнитным полем. Дополнительная кольцевая наружная катушка позволяет изменять параметры периферийной зоны магнитного поля. Путем подбора величин МДС основных и дополнительной магнитных катушек, можно регулировать расположение границы раздела силовых линий, замыкающихся между полюсами, то есть рабочей зоны, и силовых линий на периферии анодного блока, а так же влиять на форму силовых линий. Дополнительная наружная катушка может быть расположена на наружном магнитном экране или на наружных (одной или нескольких) катушках намагничивания (см. рис. 12).

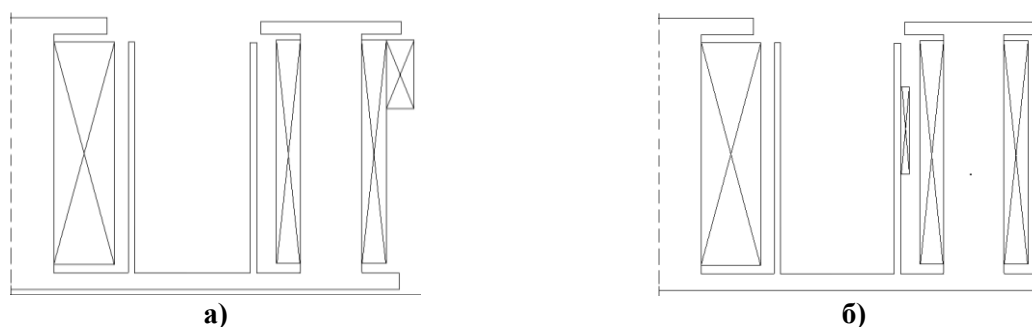


Рис. 12 Схема МС с дополнительной наружной катушкой, расположенной а) - на наружной (одной или нескольких) катушках намагничивания; б) - на наружном магнитном экране

Дополнительная кольцевая внутренняя (анодная) катушка, установленная за анодной частью УК между магнитными экранами, оказывает влияние на магнитное поле внутри УК. В зависимости от направления тока в анодной катушке можно либо уменьшать (направлении тока как в основных катушках), либо увеличивать (встречное направление тока) градиент магнитного поля на оси двигателя в области его нарастания от анода к срезу РК. В случае встречного тока индукция у анода снижается, достигается наибольший градиент индукции, и может быть реализована инверсия магнитного поля, то есть смена его направления, с образованием «нуля» поля. В этом случае анодная катушка позволяет улучшить фокусировку ионов в направлении выхода из двигателя, сузить СИУ, что приводит к снижению потерь ионов на стенках РК и повышению выходных и ресурсных характеристик СПД. Так, например, в модели двигателя PPS-1350, разработанной ОКБ «Факел» в сотрудничестве с фирмой SNECMA, в результате внедрения дополнительной анодной катушки со встречным направлением тока удалось оптимизировать рабочий процесс в прианодной области СПД и повысить его тяговые характеристики [27]. Опыт использования такой катушки

свидетельствует о том, что МДС этой катушки должна быть значительно ниже МДС основных катушек намагничивания. Поэтому, ее введение незначительно увеличивает массу МС и двигателя в целом. Кроме того на этапе отработки конструкции двигателя она может быть исключена. В работе [23] отмечена важность использования анодной катушки при разработке высокоимпульсных двигателей, так как при работе на повышенных напряжениях разряда, как показали испытания, ее влияние на выходные характеристики более значительно.

Эквивалентом МС с анодной катушкой намагничивания является МС с кольцевым разрывом (магнитной «дыркой») в основании магнитопровода, причем величина данного разрыва (зазора) определяется необходимой для оптимальной работы двигателя величиной МДС анодной катушки. Использование МС с кольцевым разрывом в основании магнитопровода позволяет снизить массу конструкции при сохранении высоких выходных характеристик двигателя. Такое конструкторское решение реализовано, например, в СПД АТОН нового поколения типа « α » [59].

Так же возможно использование двух дополнительных кольцевых катушек со встречным направлением тока, расположенных на коаксиальном магнитном аноде, образуемом двумя металлическими цилиндрами (см. рис. 13). Такая схема реализована в СПД малой мощности САМЦА-НТ-55 (50-300 Вт) [60; 61 ;62]. Ионизации РТ в нем осуществляется в основном в области анода, где формируется осевое магнитное поле, не допускающее столкновений ионов со стенками РК, что, как предполагается, обеспечит более высокие рабочие характеристики двигателя.

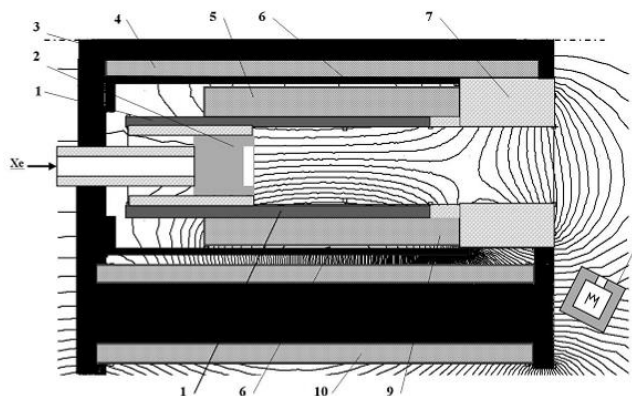


Рис. 13 Схема МС с использованием двух дополнительных кольцевых катушек и коаксиального магнитного анода (СПД САМЦА-НТ-55: 1- анод, 2 – газораспределитель, 3 – магнитопровод, 4 – внутренняя магнитная катушка, 5 – внутренняя анодная катушка, 6 – магнитные экраны, 7 – РК, 8 – К-К, 9 – наружная анодная катушка, 10 – наружные магнитные катушки)

При дальнейшей анализе конструктивных особенностей СПД МС также можно подразделить на МС без магнитных экранов (МЭ), с магнитными экранами, гибридные МС.

МС без МЭ используются в основном в двигателях малой мощности (КМ-20М и т.д). Такие МС имеют существенный недостаток - небольшое время безотказной работы, ограниченное распылением керамических стенок выходной части РК, которые должны иметь минимальную толщину ~ 2 мм для обеспечения необходимого для максимальной тяговой эффективности соотношения ширины магнитного зазора и ширины УК.

Проблема обеспечения высокого уровня эффективности двигателя и достаточно большого времени его работоспособности была решена при применении МС с магнитными экранами. Магнитные экраны за счет перепуска части магнитного потока, минуя РК, обеспечили требуемую для высокой эффективности работы СПД конфигурацию магнитного поля и вынос области с максимальными значениями магнитной индукции к выходу из РК за плоскость полюсов при уширенном межполюсном зазоре, что, в свою очередь, привело к выносу СИУ и дало возможность увеличения толщины керамических стенок РК в выходной части (в зоне интенсивного распыления), что в совокупности и привело к повышению времени безотказной работы двигателя. Однако при этом, естественно, возросли затраты на создание магнитного поля, и усложнилась конструкция и вес двигательного модуля. МС такого типа использована, например, в СПД-100, который продемонстрировал возможность получения гарантированного времени безотказной работы свыше 9 тысяч часов и стал основным двигателем, эксплуатирующимся в настоящее время на отечественных геостационарных КА.

К СПД гибридной схемы относятся конструкции с МС без МЭ с секционированной РК, большая часть которой выполнена металлической, а выходная часть - в виде диэлектрических колец. Проведенные исследования продемонстрировали перспективность применения МС данного типа для двигателей с различным уровнем мощности. Металлическая стенка РК может находиться как под плавающим потенциалом, например, в двигателях Центра Келдыша, так и под анодным потенциалом, как в двигателях ОКБ «Факел» (SPT-1, ПлаС-40 и др.) и компании Busek, называемых так же двигателями с магнитным анодом [63; 64; 65; 66; 67]. Необходимо отметить, что такой тип МС позволяет создавать в РК магнитное поле с более высоким градиентом радиальной составляющей магнитной индукции и выносом магнитной линзы при меньших энергозатратах. Гибридные МС обладают меньшей массой и компактнее по сравнению с МС с магнитными экранами.

Существуют так же МС с двойными магнитными экранами, например, КМ-64-4К (см. рисунок 14) [6]. В МС при использовании дополнительной пары магнитных экранов появляется возможность изменять не только величину градиента

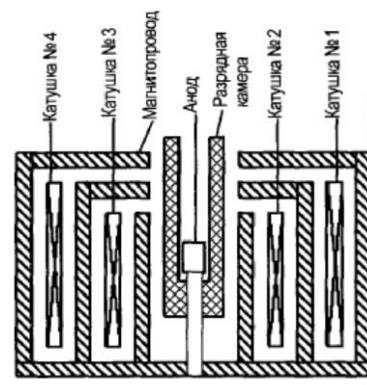


Рис. 14 Схема МС лабораторной модели ХД КМ-64-4К

магнитной индукции и положение максимума на срединной линии УК, но так же и форму силовых линий при фиксированном положении максимума индукции.

МС так же можно классифицировать **по форме и количеству магнитных полюсов**. Как правило, в традиционной кольцевой схеме СПД имеется два магнитных полюса: N-S. Однако в случае использования нетрадиционной схемы (с цилиндрическим или конусообразным магнитным зазором) количество магнитных полюсов может варьироваться. Например, в двигателе СНТ с цилиндрическим УК, исследованном в Принстонском университете, их три (см. рисунок 15, а).

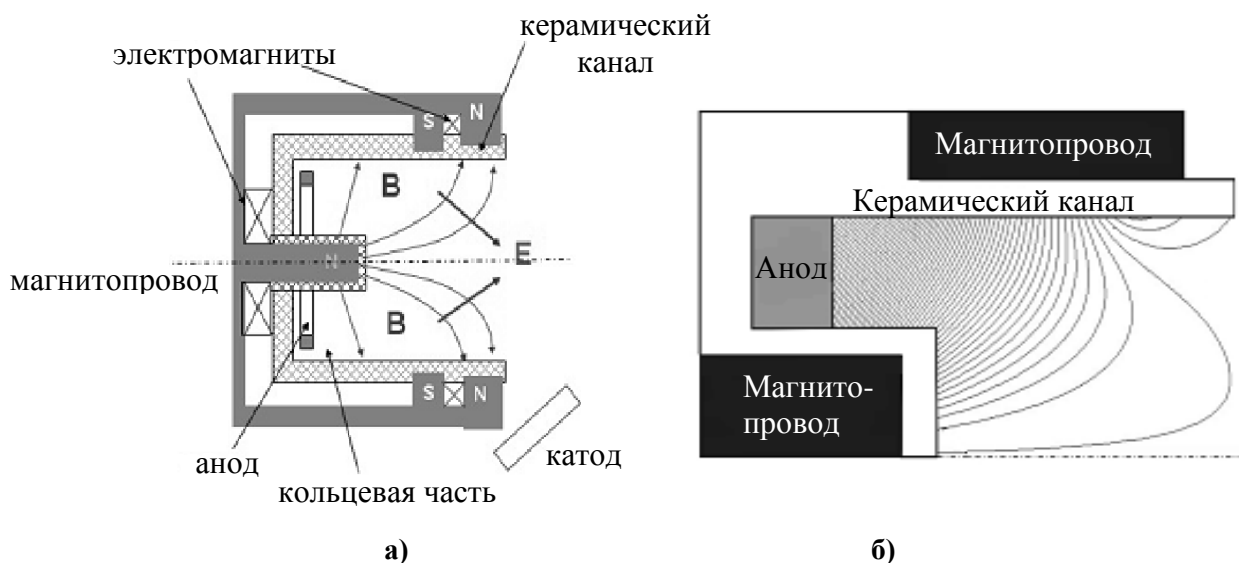


Рис. 15 Схема двигателя СНТ (а) и конфигурация магнитного поля (б)

В двигателе DCNT с конусообразным УК, созданном по аналогии с СНТ в Массачусетском институте, четыре (см. рисунок 16а)). В подобных двигателях с многополюсной МС в УК формируется касповая конфигурация магнитного поля (см. рисунки 15б) и 16б)), которая как предполагается, благодаря эффекту «магнитного зеркала» уменьшает поток электронов на стенки РК и анод.

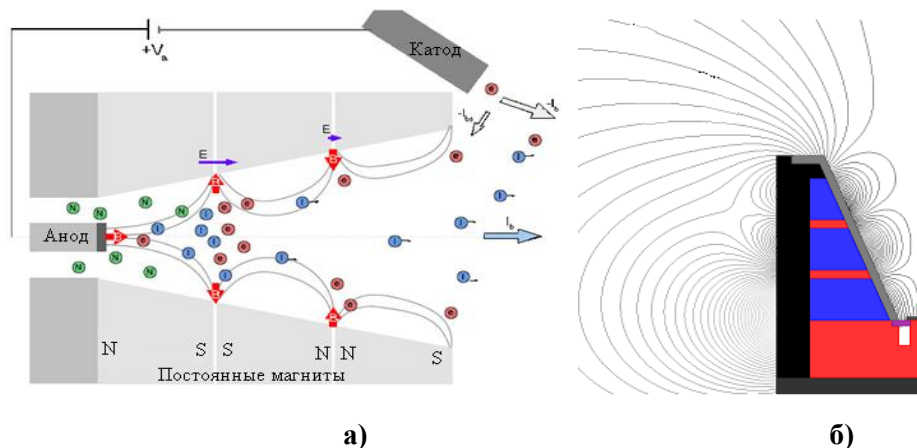


Рис. 16 Схема двигателя DCNT (а) и конфигурация магнитного поля (б)

1.4 Основные направления и задачи диссертационной работы

С учетом всего изложенного выше в качестве целей данной диссертационной работы выбрано выявление возможностей повышения выходных и ресурсных характеристик СПД путем оптимизации параметров и топологии магнитного поля как в УК, так и в выходной (периферийной) зоне двигателя и разработка рекомендаций по проектированию МС перспективных СПД.

Для достижения поставленных целей в ходе работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих в настоящее время конструкций и параметров МС СПД.
2. Отработать и верифицировать методики расчета двумерных и трехмерных расчетных моделей МС с учетом магнитного насыщения, провести анализ массовоэнергетической оптимальности МС современных двигателей.
3. Провести исследование взаимосвязи между параметрами и топологией магнитного поля в канале РК и геометрическими характеристиками зон эрозии. По результатам определить возможность и выработать рекомендации для прогноза геометрических характеристик зон эрозии по результатам расчета магнитного поля.
4. Провести экспериментальные исследования по определению влияния параметров и топологии магнитного поля выходной зоны на рабочие характеристики К-К и двигателя в целом. Выработать рекомендации по оптимальному размещению К-К для обеспечения требуемых выходных и ресурсных характеристик двигателя.
5. Исследовать влияния магнитного поля в УК СПД на выходные характеристики двигателя.
6. Внедрить предложенные методики и рекомендации на основе полученных результатов в практические разработки перспективных двигателей.

Глава 2. Обработка и верификация расчетных методик численного моделирования магнитного поля СПД

В этой главе выполнен обзор методов исследования параметров и конфигурации магнитного поля СПД. Проанализированы достоинства и недостатки указанных методов, описана отработанная автором методика моделирования магнитных систем и методика верификации, используемая в ФГУП ОКБ «Факел». Представлены результаты анализа массовоэнергетической эффективности магнитных систем существующих СПД, выполненного по результатам расчетов.

2.1 Анализ современных методик расчета магнитных систем СПД

Магнитная система (МС) является наиболее значительной подсистемой СПД. Все остальные основные подсистемы размещаются, как правило, в пределах ее объемов и закрепляются на ней. Расчет размеров МС осуществляется с учетом основных конструктивных параметров двигателя, к которым относятся: средний (или наружный) диаметр УК d , ширина УК b_k , длина УК l_k (от анода до среза РК), толщина выходных кромок РК δ (внутренней δ_{BH} и наружной δ_H).

Для СПД типовой схемы вне зависимости от масштаба характерны следующие основные соотношения [5]:

$$\frac{l_k}{b_k} > 1, \text{ а точнее } l_k = (1..2)b_k, d \geq 4b_k, \delta \approx 0.4b_k, d_y \approx 2d, l_y \approx 2l_k,$$

где d_y (внешний диаметр наружного полюса) и l_y (высота МС) – габаритные размеры МС. Конструкции СПД типовой схемы обычно проектируются на основе принципа геометрического подобия силуэта двигателя силуэту базовой модели. Непосредственно на размеры элементов МС данный принцип не распространяется. От МС требуется, чтобы величина радиальной индукции B_r в канале при одинаковом разрядном напряжении U_p удовлетворяла условию $B_r b_k = const$. Поэтому при постоянном U_p с увеличением масштаба модели минимальные сечения элементов МС ($S_{M_{min}}$) возрастают пропорционально среднему диаметру РК. При этом принималось, что суммарное количество ампервитков ($I_{W\Sigma}$) в модели должно быть постоянным, а в случае изменения и режима работы СПД:

$$S_{M_{min}} \approx S_{M\sigma} \frac{d}{d_\sigma} \sqrt{\frac{U_p}{U_{p\sigma}}}, I_{W\Sigma} \approx I_{W\Sigma\sigma} \sqrt{\frac{U_p}{U_{p\sigma}}},$$

где индексом « σ » помечены соответствующие размеры базовой модели.

В настоящее время в связи с высокими требованиями к современным СПД по массе, габаритам и энергопотреблению, появлению новых нетрадиционных схем двигателей, а кроме того новыми возможностями конструктора при разработке СПД придерживаются не столько соблюдения приведенных выше соотношений, сколько обеспечения необходимой величины и конфигурации магнитного поля как в УК, так и на периферии двигателя.

Основные требования, предъявляемые к МС на сегодняшний день, можно сформулировать следующим образом:

1. обеспечение требуемого уровня магнитной индукции в УК согласно типоразмеру и режиму работы двигателя при отсутствии в элементах МС магнитного насыщения. Как уже упоминалось, при постоянном разрядном напряжении U_p величина радиальной индукции B_r в канале должна удовлетворять условию $B_r b_k = const$, а при изменении U_p и $b_k = const$ величина B_r пропорциональна $\sqrt{U_p}$. При этом целесообразным является формирование некоторого резерва индукции;
2. создание в УК фокусирующей, близкой к симметричной относительно срединной поверхности УК конфигурации силовых линий магнитного поля с небольшим наклоном силовых линий к оси двигателя;
3. создание фокусирующей и, по возможности, вынесенной к срезу РК, магнитной линзы (области максимальных значений радиальной индукции магнитного поля в УК двигателя) с высоким положительным градиентом магнитной индукции;
4. обеспечение более высоких, чем по средней линии УК, значений магнитного поля у стенок РК;
5. обеспечение близкого к нулю уровня магнитной индукции в зоне расположения анода;
6. обеспечение высокой азимутальной равномерности распределения магнитного поля в УК;
7. обеспечение оптимума МС с точки зрения ее массовых и энергетических характеристик.

Поэтому при проектировании МС СПД большое значение имеет предварительный расчет магнитного поля, создаваемого МС той или иной конфигурации.

В общем случае, задача магнитного расчета состоит в нахождении вектора магнитной индукции \vec{B} или вектора напряженности магнитного поля \vec{H} , связанных известным соотношением:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (2.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость среды.

Расчет осуществляется на основе математической модели, базирующейся на известных уравнениях Максвелла. Задача описания магнитного поля СПД является задачей магнитостатики, так как, несмотря на то, что в ДУ на базе СПД, устанавливаемых на борту, катушки намагничивания включаются в цепь разрядного тока, в котором присутствуют колебания, они, вследствие большого количества витков, обладают достаточной индуктивностью, в силу чего амплитуда колебаний магнитного поля невелика.

Основные уравнения Максвелла для магнитостатического поля, записанные в дифференциальной форме, имеют следующий вид:

1. Закон полного тока:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (\nabla \times \vec{H} = \vec{J}), \quad (2.2)$$

где $I = \int_{S1} J ds$, J - плотность тока в сечении проводника $S1$;

2. Принцип непрерывности магнитного потока:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\nabla \cdot \vec{B} = 0). \quad (2.3)$$

Решение системы уравнений Максвелла представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому для приведения этой системы уравнений к более удобному для решения виду вводятся вспомогательные функции: векторного A и скалярного φ магнитных потенциалов [68].

При использовании векторного магнитного потенциала A , исходя из формулы (2.3), вектор магнитной индукции можно записать как

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}, \quad (2.4)$$

так как всегда $\operatorname{div} \operatorname{rot} A = 0$.

После подстановки формул (2.4) и (2.1) в формулу (2.2), имеем

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} = \vec{J}, \quad \nu = \frac{1}{\mu}. \quad (2.5)$$

Подчинив \vec{A} условию $\operatorname{div} \vec{A} = 0$, т.е. считая, что поле вектора \vec{A} не имеет источников, получим:

$$(\nabla \cdot \nu \nabla) \vec{A} = -\vec{J}. \quad (2.6)$$

Действительно, при условии $\operatorname{div} \vec{A} \neq 0$ можно положить $\vec{A} = \vec{A}' + \vec{A}''$, причем $\operatorname{div} \vec{A}' = 0$, а $\operatorname{div} \vec{A}'' \neq 0$. Поле составляющей \vec{A}'' , как созданное источниками, является потенциальным, и, следовательно, $\operatorname{rot} \vec{A}'' = 0$. Поэтому $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} = \operatorname{rot} \vec{A}'$, в силу чего можно принять $\vec{A}'' = 0$.

После нахождения векторного магнитного потенциала, по формуле (2.4) вычисляется индукция магнитного поля. Магнитный поток Φ сквозь некоторую поверхность S вычисляется по формуле:

$$\Phi = \int_S B ds = \int_S \text{rot} A ds = \oint A dl . \quad (2.7)$$

(магнитный поток Φ , пронизывающий замкнутый контур равен циркуляции векторного магнитного потенциала по этому контуру). При этом через векторный магнитный потенциал можно выразить и энергию магнитного поля, как

$$W = \int_V \frac{\vec{J} \vec{A}}{2} dV . \quad (2.8)$$

С целью упрощения расчета, в случае, когда рассматривается поле токов, протекающих по круговым контурам, лежащих в параллельных плоскостях и имеющих центры на общей оси, вместо трехмерной задачи достаточно рассмотреть картину поля в одной плоскости, проходящей через эту ось, так как все поле получается вращением найденной картины вокруг оси. Тем самым, трехмерная задача сводится к двумерной осесимметричной задаче магнитостатики, которая решается лишь относительно φ -составляющей магнитного векторного потенциала. Таким образом, расчет магнитного поля сводится к решению одного уравнения в частных производных для азимутальной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) = -\vec{J} . \quad (2.9)$$

Решив данное уравнение, и зная распределение векторного магнитного потенциала в области моделирования, можно найти распределение составляющей вектора магнитной индукции согласно соотношениям:

$$B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, B_z = \frac{\partial A_\varphi}{\partial r}, B_\varphi = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} . \quad (2.10)$$

Стоит отметить, 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:

$$H = -\text{grad} \varphi . \quad (2.11)$$

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

$$\text{div} (\mu \mu_0 \text{grad} \varphi) = 0 . \quad (2.12)$$

Решая уравнения относительно φ можно по формуле (2.11) найти напряженность H , а затем по формуле (2.1) – индукцию B .

Следует отметить, что 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^w , 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^w – $\nabla \times \vec{H} = 0$. Напряженность магнитного поля \vec{H} в области Ω^p в этом случае определяется равенством

$$\vec{H} = \vec{H}^c + \vec{H}^p = \vec{H}^c + \text{grad}p, \quad (2.13)$$

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

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

Исходя из (2.3) неизвестную функцию p находят из уравнения:

$$\nabla \cdot (\mu\mu_0 \nabla p) = \nabla \cdot (\mu\mu_0 \vec{H}^c). \quad (2.14)$$

Граничные условия задачи базируются на известных свойствах вектора индукции B и напряженности магнитного поля [69]:

- 1) нормальная составляющая вектора магнитной индукции на границе раздела двух сред с разными магнитными свойствами непрерывна;
- 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 A на границе раздела сред с разными магнитными свойствами непрерывна;
- 4) на внешних границах расчетной области должны быть заданы граничные условия: 1-го рода (Дирихле) – граница, к которой магнитный поток параллелен, когда задается значение потенциала; 2-го рода (Неймана) – граница, к которой магнитный поток перпендикулярен, когда задается изменение потенциала по нормали к границе или 3-го рода – смешанные.

На сегодняшний день существует большое количество различных методов расчета магнитных полей, в которых используются разные допущения к уравнениям Максвелла. Эти методы можно условно разделить на цепные и полевые методы [70].

К цепным методам относится расчет эквивалентной схемы замещения магнитной цепи. При составлении расчетной модели вся расчетная область магнитной системы разбивается на участки, представляющие отдельные элементы магнитной цепи. Магнитное поле в пределах

каждого участка при этом считается строго ориентированным и рассматривается независимо от полей прочих участков [71].

К полевым методам относится расчет распределения поля в некотором объеме. Точность исследований, проводимых полевыми методами, значительно выше точности исследований с помощью цепных методов в связи с изначально меньшим числом необходимых упрощающих допущений. С учетом высокого уровня развития вычислительной техники в настоящее время полевые методы получили более широкое распространение.

Полевые модели могут быть реализованы аналитическими или численными методами. При использовании аналитических методов решением является алгебраическое уравнение, в которое подставляют значения параметров, определяющих поле. В численных методах решение имеет вид совокупности численных значений описывающей поле функции для одной частной совокупности значений параметров. Достоинство аналитических методов заключается в возможности получения общего решения, которое дает полное представление о влиянии различных параметров. К наиболее известным аналитическим методам расчета магнитного поля относятся [72; 73]: расчеты по закону полного тока и уравнению непрерывности; по закону Био-Савара-Лапласа; интегрирование уравнения Лапласа, в том числе методом разделения переменных; метод наложения; метод участков; метод зеркальных изображений; метод круговых гармоник; метод конформных преобразований.

Однако все перечисленные аналитические методы применимы лишь для ограниченного круга задач и используются, в основном, при исследовании поля в некоторых конкретных областях при довольно серьезных допущениях и последующей корректировке с помощью эмпирических поправок, что объясняется сложной формой магнитопроводов, нелинейностью магнитных свойств материалов и т.д.

В противоположность аналитическим методам при использовании численных методов необходимо выполнять расчет для каждой совокупности значений параметров, и их недостаток состоит в большом объеме вычислений, однако современный высокий уровень развития вычислительной техники позволяет сделать это достаточно быстро. Поэтому в настоящее время приоритет имеют именно численные методы. Их основное преимущество заключается в возможности получения результатов даже в тех случаях, когда применение аналитических методов затруднено. При этом количество принимаемых допущений сводится к минимуму, и может быть обеспечена необходимая точность расчетов.

К наиболее распространенным численным методам относятся [71; 74; 75; 76; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83]:

- метод конечных разностей (МКР) или метод сеток;
- метод интегральных уравнений (МИУ);

– метод конечных элементов (МКЭ).

Абсолютного преимущества одного из этих методов над другими нет. Однако метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее универсальным при минимальных ограничениях и на сегодняшний день является общепризнанным методом структурного анализа в целом ряде областей науки и техники [74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 84]. Кроме того среди компьютерных программ отечественного и импортного производства для расчета магнитных полей в настоящее время наибольшее распространение получили программы, базирующиеся именно на МКЭ. Поэтому суть двух первых методов опущена.

Преимуществами МКЭ являются:

- возможность задания локальных граничных условий;
- простая физическая интерпретация его вычислительных операций;
- большая геометрическая гибкость и применимость к широкому классу дифференциальных уравнений в частных производных;
- обеспечение единственности получаемого решения во всех точках рассматриваемой области;
- эффективность и экономичность при его компьютерной реализации в сравнении с другими методами.

Методика использования МКЭ состоит в следующем.

Пусть имеется некоторая область определения задачи, ограниченная контуром L . Внутри этой области и на ее контуре можно задать произвольное количество точек (узлов). Соединяя точки прямыми линиями, получают подобласти (элементы), совокупность которых аппроксимирует область в целом. Нелинейные участки контура L заменяются прямолинейными. Следует отметить, что полученная сетка из элементов (конечно-элементная сетка), с помощью которой моделируется область определения задачи, не является регулярной ни геометрически, ни топологически. Это означает, что размеры и формы подобластей (элементов), которые моделируют область определения задачи, могут изменяться произвольно, их взаимные соединения не обязательно должны следовать какой-либо регулярной структуре. Последнее обстоятельство обеспечивает геометрическую гибкость метода. Элементам присваиваются соответствующие физической природе задачи свойства материала. Зависимая переменная аппроксимируется функцией специального вида, удовлетворяющей условиям допустимости и полноты, заключающихся в обеспечении непрерывности искомой функции и непрерывности или постоянства ее производных до $(n-1)$ порядка включительно внутри элемента и между элементами, где $2n$ – порядок рассматриваемой задачи. Важной особенностью МКЭ является то, что первоначально при локальной аппроксимации функции на конечных элементах их можно рассматривать независимо друг от друга. Это значит, что

каждый элемент можно считать изолированным от всей совокупности и аппроксимировать функцию на этом элементе с помощью ее значений в его узлах независимо от того, какое место займет рассматриваемый элемент в связанной модели, и от поведения функции на других конечных элементах. Подстановка аппроксимаций в определяющие уравнения (или эквивалентные им) дает систему уравнений с неизвестными параметрами. Решая эти уравнения, можно определить значения этих параметров и, следовательно, получить приближенное решение задачи. МКЭ основывается на проекционных методах решения уравнений или вариационных методах минимизации функционалов. Поэтому в качестве определяющих уравнений используется либо вариационный подход, либо методы взвешенной невязки – ставится условие обеспечения малости (в некотором смысле) разницы между истинным и приближенным решениями, то есть невязки [74].

МКЭ реализован в компьютерных программах: ABAQUS, ANSYS [85, 86], COMSOL Multiphysics, NISA [68], MSC.Nastran, NEMANAstran, SAMCEF, Elcut [87], FEMM [70], Ansoft, Cosmoss и др. Все они имеют ряд особенностей, и моделирование в каждой из них производится по своему определенному сценарию.

В данной работе численное моделирование МС СПД проводилось автором с использованием пакета прикладных программ NISA Version 18 разработки EMRC Engineering Mechanics Research Corporation (США), модуля для магнитных расчетов EMAG данного пакета. Существуют англоязычные пособия с алгоритмами использования данной программы, однако инженеру, решающему конкретные задачи, в данном случае по проектированию МС СПД необходима не только информация теоретического характера, но также и рекомендации об особенностях применения программы на практике. Таким образом, одной из задач данной работы является отработка методики моделирования МС в ППП NISA, а именно:

- описание основных положений, принимаемых при разработке расчетных моделей;
- методика подготовки исходных данных для моделирования;
- обоснование допущений, способствующих реализации модели, но не выводящих результаты исследования за пределы допустимых погрешностей;
- оценка ошибок моделирования из-за допускаемых упрощений;
- формулировка перечня основных рассчитываемых параметров;
- верификация результатов путем их сопоставления с экспериментальными результатами.

2.2 Методика расчета магнитного поля СПД с применением ППП NISA

Процедуру расчета магнитного поля СПД в ППП NISA можно разделить на три основных этапа: постановка задачи (дискретизация области моделирования, задание областей с токовыми нагрузками (или величины и направления коэрцитивной силы в случае использования постоянных магнитов) и граничных условий), решение задачи моделирования и анализ и верификация полученных результатов [88].

Постановка задачи является наиболее важным этапом, так как для получения удовлетворительных результатов расчета необходимо грамотно подготовить исходные данные, оценить возможности упрощения модели исследуемой МС для минимизации времени расчета, выбрать границы расчетной области и оптимально провести дискретизацию области моделирования на выбранные типы конечных элементов.

1. Подготовка исходных данных

Исходными данными для магнитного расчета являются конструктивные размеры МС двигателя, материалы, из которых изготовлена МС, а так же параметры источников МДС (размеры постоянных магнитов или количество витков катушки и величина тока намагничивания).

Начальным этапом создания расчетной модели является определение и подробное описание расчетной области, которая включает в себя геометрию МС и окружающий ее вакуум. При описании геометрии МС по возможности должны быть учтены все ее конструктивные особенности, например, фаски, фланцы, выемки, отверстия, особенно достаточно крупные. Так как точность расчетов во многом определяется именно точностью и подробностью описания геометрии исследуемого объекта.

Что касается размерности расчетной модели, то при рассмотрении МС бронированного типа, т.е. с кольцевыми катушками намагничивания, имеющими центр на общей оси, достаточно рассмотреть двухмерную осесимметричную модель и дискретизировать только сечение исследуемого объекта плоскостью, проходящей через ось симметрии. Отсутствие одной из координат понижает на единицу размерность базисных функций, существенно упрощает процедуры дискретизации области и получения решения.

Однако конструктивные схемы большинства МС не являются осесимметричными, поэтому для них предпочтительным является трехмерное моделирование, позволяющие оценить азимутальное распределение и конфигурацию магнитного поля в УК и в периферийной зоне двигателя и получить наиболее близкие к реальным результаты. Анализ влияния некоторых факторов представлен ниже.

После определения размерности задачи необходимо оценить размер расчетной области модели. Положение внешних границ расчетной области и граничные условия должны выбираться таким образом, чтобы их влияние на расчётные характеристики было минимальным. В случае проведения полного анализа магнитного поля, включающего и расчет магнитного момента двигателя, граница расчетной области должна располагаться на расстоянии не менее 5 метров от объекта моделирования. При магнитном анализе, не включающем определение магнитных моментов, достаточным является моделирование расчетной области с границей, отнесенной на 2-3 размера рассматриваемого объекта от

воображаемого центра модели, с заданием предусмотренных в программе «бесконечных элементов», о которых будет сказано позже, в виде, например, граничных элементов, на которых магнитный потенциал убывает в бесконечность не медленнее, чем $1/r$, где r - расстояние от элемента тока до точки, в которой определяется магнитное поле.

После описания расчетной области осуществляется ее разбиение на конечные элементы, нумерация полученных элементов и узлов, индексация последних и задание свойств элементов. Разбиение на конечные элементы по данной методике должно осуществляться лично пользователем.

Тип элемента обуславливается выбором для каждого элемента аппроксимирующей функции. Аппроксимирующие функции в МКЭ являются полиномиальными. Размерность функции, а, следовательно, и элемента определяется размерностью области определения задачи. По размерности элементы можно разделить на одномерные, двумерные и трехмерные.

Степень аппроксимирующей функции определяет число узлов, которым должен обладать элемент, – оно должно равняться числу неизвестных коэффициентов, входящих в полином. Поэтому все элементы одной и той же размерности могут быть линейными (симплекс-элементы) и нелинейными – квадратичными или кубическими (комплекс-элементами). Все элементы в МКЭ можно так же классифицировать в зависимости от того, включают ли узловые переменные только значения функции - лагранжевы элементы, или также и значения производных – эрмитовы элементы. В электромагнетизме предпочтение отдается лагранжевым элементам для учета изменения констант при переходе из одной среды в другую.

Размеры элементов выбираются таким образом, чтобы материал элемента был одним и тем же по физическим свойствам. При разбиении необходимо учитывать, что узел одного элемента не может располагаться на линии, соединяющей узлы граничащего с ним другого элемента. Если границами является разные по размерам элементы, то соблюсти указанное требование можно при сохранении однотипности элементов увеличением их количества или с использованием элемента (элементов) другого типа. При этом размер элементов значительно влияет на точность и скорость расчета. Применение крупных элементов сокращает вычислительную работу и время расчета, однако может приводить к большим погрешностям вычислений. Однозначно определить требуемый минимальный характерный размер элемента МС СПД затруднительно, так как все детали МС имеют различную толщину, от 0,5 мм (магнитные экраны) и выше, поэтому проще говорить о мелкости разбиения. С целью получения приемлемой точности результатов расчета МС рекомендуется разбивать на симплекс-элементы сеткой, состоящей из не менее четырех, пяти элементов как по высоте, так и по ширине каждой детали. При использовании комплекс-элементов это количество можно уменьшить. Область вакуума, окружающего МС, необходимо разбивать грубой сеткой. Это не

распространяется только на вакуумные зазоры в магнитопроводе. Зазоры требуют очень высокой степени дискретизации. Что касается рабочего зазора двигателя, то сетка здесь должна быть создана таким образом, чтобы узлы располагались на интересующих исследователя контрольных радиусах. Как правило, это радиусы, соответствующие положению внутренней и наружной стенок РК, а так же середине УК. Так же желательно уменьшать размеры элементов вблизи границ раздела сред, то есть при переходе от магнитных элементов к вакууму. При этом должен быть плавный переход от мелкого шага к крупному, чтобы не было узких длинных треугольных элементов, сильно снижающих или даже делающих невозможной сходимость задачи. Все элементы не должны иметь форму, слишком отличающуюся от идеальной (равносторонних треугольников, квадратов, кубов и т. д.), слишком острые или слишком тупые углы, ввиду опасности вырождения решения.

При трехмерном моделировании огромную важность имеет и шаг сетки по азимуту. В ППП NISA в трехмерном расчете плотность тока в катушках намагничивания задается по проекциям для каждого сектора элементов в прямоугольной декартовой системе координат, поэтому увеличение мелкости разбиения элементов МС по азимуту способствует и повышению точности расчета. Рекомендуемый шаг должен быть не более 7,5 градусов.

В целом можно отметить, что применение грубой сетки при создании расчетной модели имеет смысл только при разработке новой конструкции МС при проектировании с тем, чтобы в дальнейшем провести более точный и длительный расчет для лучшего по предварительным оценкам варианта системы.

Полученные аппроксимирующие функции для каждого элемента представляют в общей для всей области расчета системе координат при общей (глобальной) нумерации узлов и элементов. Для этого проводят упорядоченную сквозную нумерацию всех узлов и элементов. Порядок нумерации узлов существенно влияет на эффективность вычислений [74]. Применение МКЭ к решению стационарного дифференциального уравнения приводит к системе алгебраических уравнений, большое число коэффициентов в которой равно нулю.

Далее осуществляется задание свойств материалов.

Свойства окружающего МС вакуума, как и свойства обмоток катушек намагничивания, задаются равными величине $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, так как относительная магнитная проницаемость вакуума равна единице.

Элементы МС СПД изготавливаются из ферромагнитных материалов. Детали МС, такие как магнитопровод, сердечники катушек намагничивания, полюса, фланцы, изготавливают из магнитомягких материалов, свойства которых задаются кривыми намагничивания $B(H)$. Как правило, используются технически чистое железо, электротехнические нелегированные горячекатаные стали с изотропными свойствами и пермендюры.

Общие требования, предъявляемые к материалам для деталей МС СПД, можно сформулировать следующим образом:

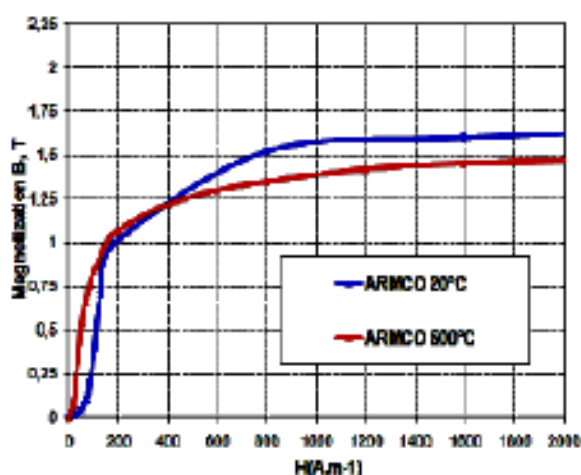
- материал должен удовлетворять высоким требованиям к чистоте исходных материалов (очистка от примесей осуществляется различными технологическими приемами (переплавкой в вакууме, отжигом при высокой температуре в вакууме и др.), где примеси – это случайные включения, попавшие в магнитный материал в процессе его изготовления и ухудшающие его свойства),
- материал должен легко намагничиваться и размагничиваться, то есть петля гистерезиса должна быть узкой, что выполняется при малой коэрцитивной силе и большой проницаемости (особенно начальной и максимальной),
- материал должен обладать высокой индукцией насыщения (т.е. обеспечивать прохождение максимального магнитного потока через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода), что позволит получить наименьшие габаритные размеры и массу магнитной системы,
- материал должен обладать высокой точкой Кюри (температура, выше которой материал теряет свои ферромагнитные свойства),
- обладать температурной стабильностью,
- обладать высокой прочностью,
- для получения оптимальных магнитных свойств должен быть термически обработан после механической обработки и различных технологических операций, приводящих к деформации (отжиг по необходимому режиму),
- обладать удовлетворительной стоимостью и дефицитностью.

Технически чистым железом называется железо, содержащее не более 0,04 % углерода. Оно широко применяется благодаря наличию высоких магнитных (высокие магнитная проницаемость и индукция насыщения, относительно низкая коэрцитивная сила), хороших механических и технологических свойств наряду с невысокой стоимостью. Чем чище железо, тем выше его магнитная мягкость. Промышленность изготавливает железо в виде карбонильного (металлокерамика в виде листов и готовых изделий из порошка, полученного конденсацией газообразного пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$), электролитического и железа Армко (кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь). Магнитные свойства железа представлены в таблице 3 [89]. Температура Кюри $769^{\circ}C$.

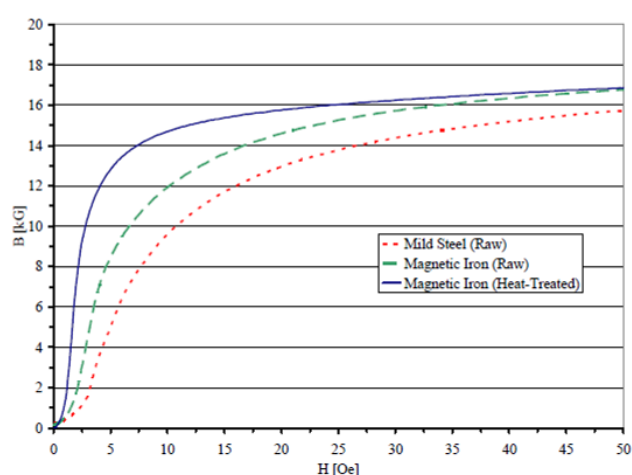
В СПД-строении за рубежом применяется в основном технически чистое железо Армко (см. рис. 17).

Магнитные свойства технически чистого железа

Железо	Содержание углерода, %	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила
		мГн/м		
Карбонильное	0,005-0,01	4,0	26	6,4
Электролитическое, переплавленное в вакууме	0,01		79	7,2
Электролитическое	0,02-0,04	0,8	19	28
Железо Армко	0,02-0,025	0,3	9	64



а) [90]



б) [91]

Рис. 17 Магнитные свойства материалов, применяемых для МС СПД за рубежом

Электротехнические нелегированные стали представляют железо с примесями кремния, марганца, меди, а так же серы, фосфора и углерода. Сортовые стали изготавливаются разных марок [92], где в обозначении марки цифры значат:

первая – класс по виду обработки давлением (1- горячекатаная; 2 –калиброванная),
 вторая – тип по содержанию кремния (0 – сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения; 1 - сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения),
 третья - группа по основной нормируемой характеристике (8 – коэрцитивная сила),
 четвертая и пятая – количественное значение основной нормируемой характеристики (коэрцитивной силы в целых единицах А/м).

Магнитные свойства сталей представлены в таблице 4.

При разработке СПД ОКБ «Факел» использует в основном сталь марки 10880 (прежнее обозначение Э10). Физико-механические свойства данной стали показаны в таблице 5.

При этом учитывая значительную зависимость магнитных свойств сплавов от качества его компонентов, процесса изготовления, режима термообработки и хранения и тот факт, что образцы даже из одной плавки могут иметь различные магнитные свойства, а в

государственных стандартах (как отечественных, так и зарубежных) содержится только минимум информации (оговариваются только значения магнитной индукции при напряженности поля до 2500 А/м и величина коэрцитивной силы, а их допуски не регламентируются) в ОКБ «Факел» постоянно осуществляется контроль и ведутся дополнительные исследования в данном направлении.

Таблица 4

Магнитные свойства электротехнических нелегированных сталей

Марка материала	Коэрцитивная сила в разомкнутой цепи, А/м, не более	Магнитная индукция при напряженности магнитного поля в А/м в цепи, Тл, не менее				
		200	300	500	1000	2500
10895 20895 11895 21895	95,0	1,00	1,20	1,32	1,45	1,54
10880 20880 11880 21880	80,0	1,00	1,20	1,36	1,47	1,57
10860 20860 11860 21860	60,0	1,15	1,25	1,40	1,50	1,60
10850 20850 11850 21850	50	1,15	1,25	1,44	1,53	1,62

Таблица 5

Физико-механические свойства стали 10880

Состав	массовая доля элементов
Углерод (С), не более	0,035
Фосфор (Р), не более	0,02
Сера (S), не более	0,03
Кремний (Si), не более	0,3
Марганец (Mn), не более	0,3
Медь (Cu), не более	0,3
Плотность, г/см³	7,83
Относительное удлинение, %	24
Твердость по Бринеллю условная (HBr)	131
Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, МПа (кгс/мм²)	270
Максимальная рабочая температура, °С (точка Кюри)	770
Коэффициент линейного расширения в диапазоне температур, 10⁻⁶ град⁻¹	
20-200	12,75
20-300	13,20
20-400	13,70
20-500	14,60
20-600	14,30

На рисунке 18 представлены требуемые для стали 10880 по ГОСТ 11036-75 данные и результаты выполненных в различное время замеров магнитных свойств образцов стали, используемой при разработке двигателей М290 (1986 г.) и SPT-140 (1996 г., 1999 г.) [93].

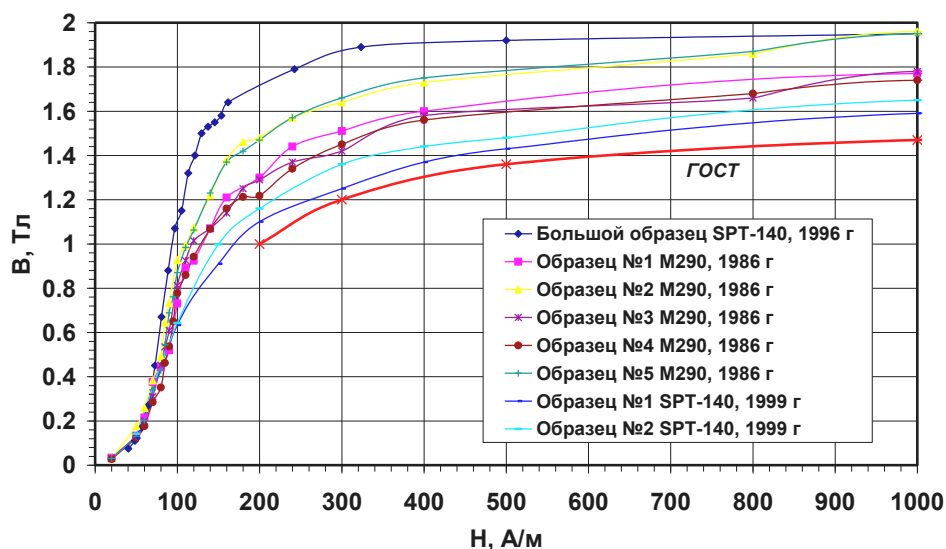


Рис. 18 Зависимость индукции от напряженности поля для нескольких образцов стали 10880 и данные ГОСТ 11036-75

Из рисунка 18 видна нестабильность измеряемых магнитных свойств, что, как и было отмечено, можно объяснить неуправляемым технологическим процессом или возможной недостоверностью результатов измерений (влиянием размера образца; влиянием количества измерительных и силовых обмоток; человеческий фактор (разные исполнители); погрешностью методики измерений (колебания электрических параметров сети в корпусе, отсутствие контрольного эталона).

При этом данные ГОСТ представляют собой наихудший случай, когда индукция насыщения имеет наименьшее значение 1,2 Тл.

Поэтому при разработке расчетных моделей элементам МС, выполненным из стали 10880, рекомендуется присваивать свойства, полученные по данным ГОСТ 11036-75 с экстраполяцией на более широкий диапазон до 1000000 А/м, а также с учетом обеспечения монотонности кривой в этом диапазоне.

В последнее время для деталей МС СПД стали применять и пермендюры. Пермендюр – это сплав железа с кобальтом (30—50%), обычно с добавкой ванадия (до 2%), который улучшает технологические свойства сплавов, в частности их обрабатываемость в холодном состоянии. Этот материал характеризуется высокой намагниченностью насыщения и повышенной магнитной проницаемостью при больших индукциях. Установлено, что экономия в массе и объеме изделий, в случае использования пермендюра вместо технического чистого железа, составляет 15-20 %.

В ОКБ «Факел» используют сплав 49КФ с 48—50 процентным содержанием кобальта. Магнитные свойства сплава 49КФ показаны в таблице 6.

Таблица 6

Марка материала	Коэрцитивная сила в разомкнутой цепи, А/м, не более	Магнитная индукция при напряженности магнитного поля в А/м в цепи, Тл, не менее	
		2500	15000
		49КФ	160

Сравнение магнитных свойств сплава 49КФ с магнитными свойствами стали 10880 показаны на рисунке 19.

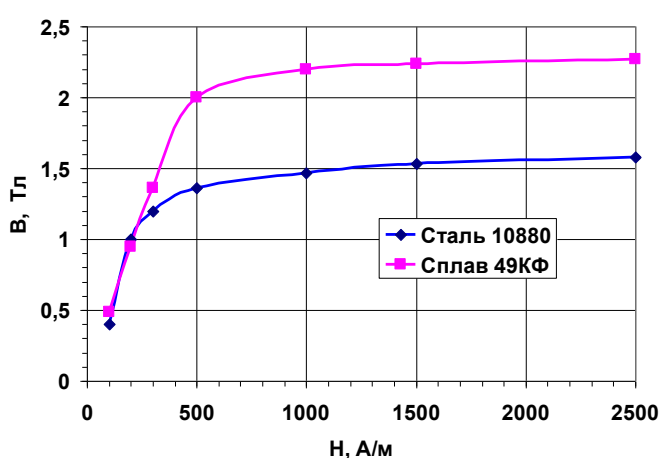


Рис. 19 Сравнение магнитных свойств стали 10880 и сплава 49КФ

Из рисунка 19 видно, что индукция насыщения для сплава 49КФ составляет 2,1 Тл, что в 1,75 раза выше, чем у стали 10880.

К недостаткам пермендюроров относятся высокая стоимость и дефицитность кобальта и ванадия. Поэтому в МС СПД его используют только для наиболее напряженных участков магнитной цепи, а именно в качестве материала сердечников катушек намагничивания.

Следует также отметить, что во время работы СПД нагревается, при этом характеристики материалов МС могут ухудшаться. Это особенно актуально в режимах работы двигателя при повышенных мощностях разряда.

Физико-механические свойства сплава 49КФ представлены в таблице 7.

Влияние температуры на свойства железа показано на рисунке 20 [94]. Из рисунка видно, что для железа оно начинает проявляться при температуре свыше 500°С.

В ОКБ «Факел» проводились исследования влияния температуры на свойства стали 10880. Рисунок 21 отражает полученные результаты. Свойства стали 10880 так же начинают ухудшаться при температуре свыше 500°С. Так при нагреве до 600°С величина индукции насыщения снижается на 20%.

Физико-механические свойства сплава 49КФ

Состав	массовая доля элементов
Углерод (С), не более	0,05
Фосфор (Р), не более	0,02
Сера (S), не более	0,02
Никель (Ni), не более	0,5
Кобальт (Co), не более	48,0-50,0
Кремний (Si), не более	0,3
Марганец (Mn), не более	0,3
Ванадий (V), не более	1,3-1,8 (1,7-2,1)
Медь (Cu), не более	0,05
Плотность, г/см³	8,15
Относительное удлинение, %	1/1
Твердость по Бринеллю условная (HВг)	HRC 35 HRB 90
Временное сопротивление σв, МПа (кгс/мм²)	1320/490
Максимальная рабочая температура, °С (точка Кюри)	960
Коэффициент линейного расширения в диапазоне температур, 10⁻⁶ град⁻¹	
20-200	9,5
20-300	9,8
20-400	10,1
20-500	10,4
20-600	10,5
20-700	10,8
20-800	11,3

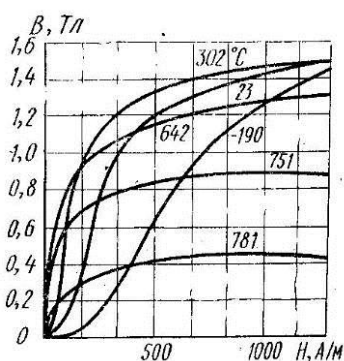


Рис. 20 Кривые намагничивания железа при различных температурах

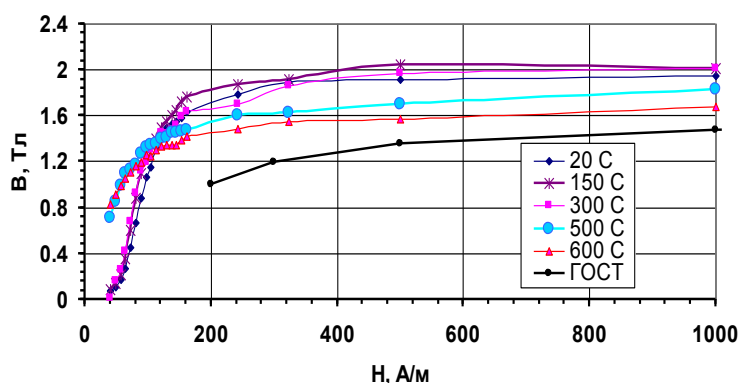


Рис. 21 Зависимость индукции при температурах от 20°C до 600°C от напряженности магнитного поля для образцов стали 10880 (1986г.)

Для железокобальтовых сплавов влияние температуры на индукцию насыщения отражено на рисунках 22, 23 в зависимости от процентного содержания кобальта, так же показана зависимость при его 50%-ном содержании.

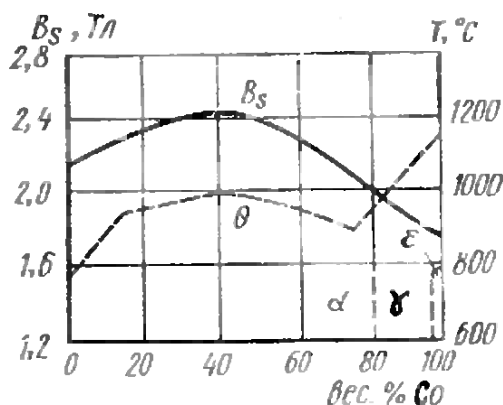


Рис. 22 Зависимость индукции насыщения и температуры Кюри от состава железокобальтовых сплавов

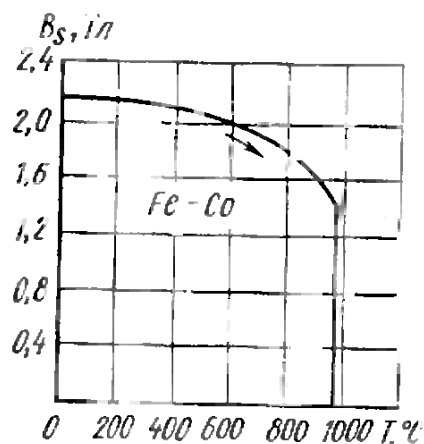


Рис. 23 Зависимость индукции насыщения сплавов 50%Fe - 50%Co от температуры

Таким образом, при задании свойств материалов МС необходимо учитывать и распределение температур в двигателе. Поэтому расчет рекомендуется проводить в два этапа: по кривой ГОСТ и по кривым намагничивания, соответствующим определенным температурам элементов изделия. Точность расчета в значительной степени определяется точностью задания свойств материалов.

Далее, при использовании в качестве источников тока катушек намагничивания, в расчете задается плотность тока, вычисляемая по формуле: $J = \frac{I \cdot W}{S}$, где I – ток в катушках намагничивания, W - количество витков в катушке, S – площадь обмотки катушки. При этом учитывается направление тока (положительное или отрицательное). Если используются постоянные магниты задается соответствующая величина коэрцитивной силы.

Если внешние границы расчетной области достаточно удалены от воображаемого центра модели, то в качестве граничных условий используется условие Дирихле, то есть задание на граничных поверхностях нулевого потенциала. В противном случае на границе расчетной области необходимо вводить “бесконечные элементы”, предусмотренных в ППП NISA, на которых расчётная величина потенциала убывает по одному из предложенных законов:

1. с экспоненциальным затуханием,
2. с обратным затуханием,
3. с геометрией, отображенной к бесконечности.

В случае проведения осесимметричного расчета на оси симметрии модели так же необходимо граничное условие Неймана ($\frac{\partial A}{\partial n} = 0$).

2. Этап решения задачи – осуществляется по алгоритму, заложенному в программе.

Неизвестными переменными являются значения магнитного потенциала (векторного или скалярного) в каждой узловой точке. Узловые значения потенциала удовлетворяют основным

уравнениям магнитостатики и граничным условиям задачи. Приближенное решение уравнений в ППП NISA определяется с помощью вариационного подхода исходя из условия минимума энергетического функционала. Поэтому искомый потенциал находится, обращая в минимум функционал, соответствующий или пропорциональный энергии магнитного поля.

При нахождении векторного потенциала \vec{A} , энергетический функционал имеет вид:

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

в случае осесимметричной задачи:

$$F(A) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \nu \left[\frac{A^2}{r^2} + \frac{2A}{r} \left(\frac{\partial A}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega - \int_{\Omega} A J d\Omega,$$

при нахождении скалярного потенциала Φ_m -

$$F(\Phi_m) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mu (\Phi_m)^2 d\Omega + \int_{\Omega} \Phi_m (\nabla \cdot \mu \vec{H}_s) d\Omega, \text{ где } \Omega - \text{ область определения решения задачи.}$$

Для решения системы полученных алгебраических уравнений в ППП NISA реализованы прямой (метод Гаусса) и при возникновении нелинейности итерационный (метод Ньютона-Рафсона) методы. Проблема нелинейности возникает при задании нелинейных свойств магнитных материалов, подходящий функционал в этом случае представляет собой:

$$F(\vec{A}) = \int_{\Omega} \left[\int_0^B \vec{H}(B) \cdot d\vec{B} \right] d\Omega - \int_{\Omega} \vec{A} \cdot \vec{J} d\Omega.$$

Необходимо отметить, что точность решения и количество итераций задаются пользователем. Вычисления программой проводятся до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность или выполнено заданное количество итераций.

Эффективность способов решения во многом зависит от структуры и свойств полученной расчетной матрицы, которые определяются качеством построения пользователем конечно-элементной расчетной модели.

3. Основные возможные допущения расчета

С целью упрощения моделирования и вычислений и минимизации времени расчета при разработке расчетных моделей МС возможно введение некоторых допущений.

1) если МС двигателя не является осесимметричной конструкцией, но обладает определенной симметрией, вместо расчета полной конструкции МС рекомендуется расчет половины или одной четвертой МС, учитывая, что ППП NISA имеет такую возможность при задании условий симметрии;

2) замена свойств материала МС, выражающихся нелинейной зависимостью $B(H)$, линейной – значительно ускоряет вычислительную процедуру. Это допущение не оказывает значительного влияние на результаты расчета в случае отсутствия в деталях МС насыщения, то есть, например, для стали 10880 при работе в области 1 (см. рис. 24). В противном случае позволяет выявить критичные элементы по насыщению и оценить возможности имеющейся конструкции в случае их утолщения или замены материала, из которого они изготовлены, на материал с более высоким предельно допустимым по насыщению значением магнитной индукции (например, сплав 49 КФ).

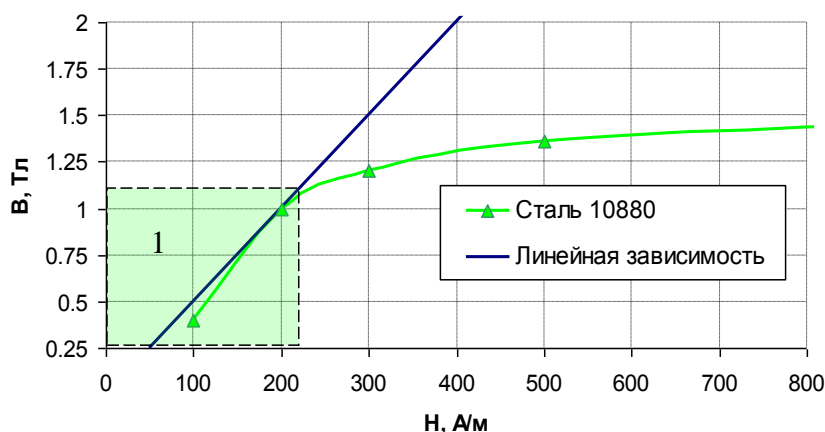


Рис. 24 График зависимости индукции от напряженности магнитного поля для стали 10880

Данное допущение может использоваться как в случае двумерного, так и трехмерного моделирования. И рекомендуется особенно в стадии проектирования схемы МС при первоначальном рассмотрении различных вариантов конструкции. Т.е., для начала достаточно провести расчеты с заданием линейных свойств магнитных материалов, затем с нелинейных (фактических) по возможности с учетом влияния температуры.

3) подбор осесимметричного эквивалента МС;

В случае осесимметричной модели МС (например, «бронированного» типа) это упрощение не вызывает никаких вопросов. Однако в случае МС с несколькими наружными катушками намагничивания, основания магнитопровода и полюсов сложной формы не позволяет оценить равномерность распределения магнитного поля по азимуту.

Известно, что двумерная модель построенная заменой нескольких наружных катушек намагничивания двумя цилиндрическими катушками, таким образом, что площади их сечения были равны, а намагничивающая сила и площадь сечения окна катушки оставлены без изменений, дает наиболее близкие к реальным усредненным результаты. Так же в модели должны учитываться и другие особенности элементов МС.

Так с целью проверки данного факта, а так же оценки влияния конструктивных особенностей на равномерность распределения магнитного поля СПД была проведена серия расчетов для нескольких вариантов МС типовой схемы типоразмера СПД-100:

- МС с кольцевой наружной катушкой намагничивания (двумерный осесимметричный расчет) (см. рис. 25 а));
- МС с 4 цилиндрическими катушками (см. рис. 25 б));
- МС с 8 цилиндрическими катушками;
- МС с 2 плоскими катушками;
- МС с 4 плоскими катушками.

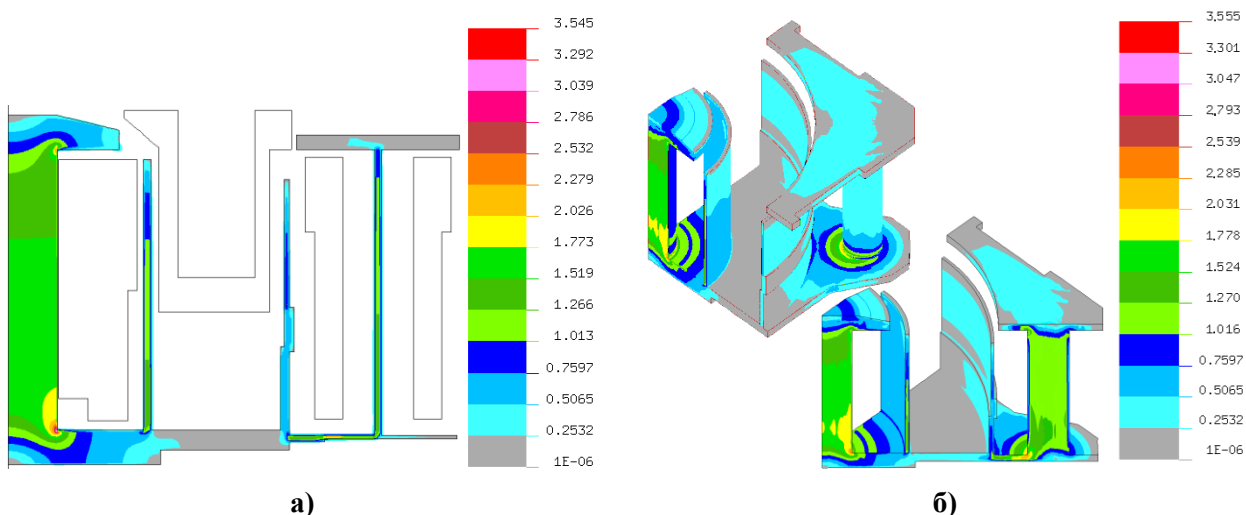


Рис. 25 Распределение индукции в элементах магнитной системы СПД типа СПД-100 а) двумерный осесимметричный линейный расчет; б) трехмерный линейный расчет

Учитывая, что наибольший коэффициент неравномерности азимутального распределения магнитного поля в УК достигается по наружной стенке, на рисунке 26 приведено нормированное распределение радиальной составляющей магнитной индукции по наружной стенке по срезу РК для всех исследуемых вариантов.

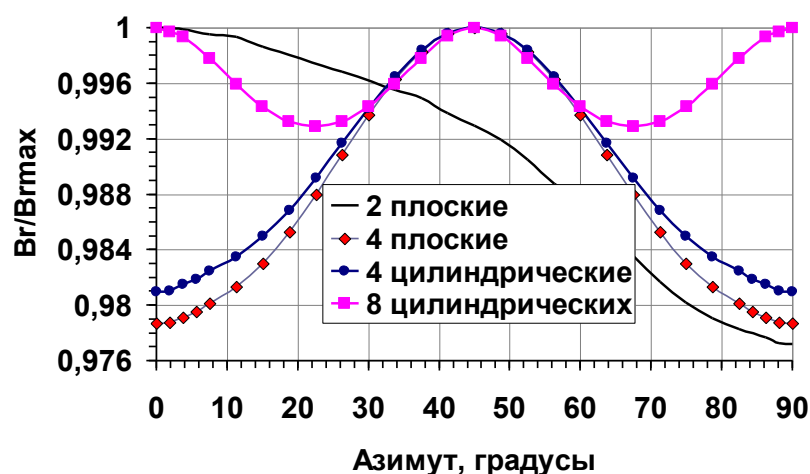


Рис. 26 Нормированное распределение радиальной индукции магнитного поля по наружной стенке по срезу РК

Очевидно, что для МС с кольцевой наружной катушкой намагничивания расчетный коэффициент неравномерности равен нулю. Наиболее приближенным к нему является вариант

с 8 катушками, для которого коэффициент составляет менее 1 %. Для 4 катушек – примерно 2%.

Что касается плоских катушек, разработанных в ОКБ «Факел», то из графика видно, что в данном случае использование двух плоских катушек является эквивалентом 4 цилиндрических. Такие катушки предназначены для повышения механической устойчивости МС.

Приведенные коэффициенты дают лишь качественную оценку, так как количественно они индивидуальны для каждой МС и зависят от типоразмера СПД, местоположения наружных катушек относительно РК, величины МДС и др.

Таким образом, для предварительного анализа использование подобного упрощения допустимо.

4. Анализ полученных результатов и их верификация

После проведения расчета программа представляет цифровые и графические распределения напряженности, индукции, потока и энергии магнитного поля. Используя полученные величины можно оценить основные параметры МС СПД, а именно:

- 1 Распределение магнитной индукции в элементах МС для определения степени насыщения;
- 2 Распределение радиальной (B_r) и осевой (B_z) составляющих индукции магнитного поля по среднему диаметру УК, а так же по внутренней и наружной стенкам РК;
- 3 Максимальное значение радиальной индукции магнитного поля посередине УК ($B_{r\max}$) и местоположение этой точки относительно внутренней плоскости наружного полюса Z_{\max} ;
- 4 Градиент магнитного поля вдоль оси канала, определяемый по формуле:

$$\text{grad } B = \frac{B_{r\max} - kB_{r\max}}{Z_{\max} - Z_k},$$

где k - коэффициент, определяемый согласно методике, приведенной в главе 3, Z_k - местоположение точки с индукцией $kB_{r\max}$ относительно внутренней плоскости наружного полюса;

- 5 Относительный градиент магнитного поля вдоль оси канала, определяемый по формуле:

$$\text{grad}_o B = \frac{(1-k)}{Z_{\max} - Z_{0.7\max}};$$

- 6 Протяженность зоны ускорения:

$$L = Z_{\max} - Z_k;$$

- 7 Значения магнитной индукции посередине УК в зоне расположения анода (B_{ra});

8 Магнитный параметр K_b , вычисляемый по формуле:

$$K_b = 1 - \frac{B_{ra}}{B_{r \max}}$$

численное значение которого для оптимальной работы МС определяется согласно графику, представленному на рисунке 2 в зависимости от величины разрядного напряжения;

9 Конфигурация силовых линий магнитного поля двигателя в целом и более детально в УК,

10 Положение границы раздела рабочей и периферийной зоны магнитного поля,

11 Топология магнитной линзы, определяемой положением $(B_{r \max}) - (kB_{r \max})$ с целью определения ее формы и расположения относительно МС;

12 Азимутальное распределение радиальной составляющей магнитного поля посередине УК, по наружной и внутренней стенкам РК по срезу камеры;

13 Коэффициент азимутальной равномерности распределения магнитного поля по срезу РК по середине канала (по внутренней и наружной стенкам), вычисляемый по формуле:

$$K_{np} = 100 \times (B_{\max} - B_{\min}) / B_{cp} [\%],$$

где B_{\max} - максимальное измеренное значение радиальной индукции посередине канала (внутренней стенке, наружной стенке); B_{\min} - минимальное измеренное значение радиальной индукции посередине канала (внутренней стенке, наружной стенке); B_{cp} - среднее значение радиальной индукции посередине канала (внутренней стенке, наружной стенке);

14 Суммарная магнитодвижущая сила (МДС) $\sum I\omega$, действующая на элементы МС. Распределение МДС по участкам магнитных контуров, посчитанное с помощью закона полного тока по результатам расчета интегралов от скалярного произведения напряженности магнитного поля на путь для каждого из участков, входящий в контур.

15 Определение величины магнитного потока, в том числе величины потока, приходящегося на рабочий зазор двигателя, оценка в процентном отношении этой величины от общей;

16 Мощность катушек намагничивания МС - N [Вт];

17 Масса МС - m [кг];

18 Параметр, характеризующий эффективность МС с точки зрения используемой мощности:

$$K_1 = \frac{N}{B_{\max}} [\text{Вт/мТл}];$$

19 Параметр, характеризующий эффективность МС с точки зрения величины требуемых ампервитков:

$$K_2 = \frac{\sum I\omega}{B_{\max}} [\text{АВ/мТл}];$$

20 Параметр, характеризующий эффективность МС с точки зрения массовой оптимальности:

$$K_3 = \frac{m}{B_{\max}} \text{ [кг/мТл];}$$

21 Магнитный момент, вычисляемый по формулам:

$$\text{– осевой: } M = 2\pi\ell^3 \frac{B}{\mu_0} \text{ [А/м}^2\text{]},$$

$$\text{– радиальный: } M = 4\pi\ell^3 \frac{B}{\mu_0} \text{ [А/м}^2\text{]},$$

где ℓ - расстояние до точки с индукцией B , при этом рассматривается в основном осевая составляющая поля;

22 Индуктивность катушки намагничивания:

$$L_i = \frac{2W_h}{I^2} \text{ [Гн]},$$

где W_h - энергия магнитного поля, I - ток в катушке.

Последним этапом является проведение верификации расчетной модели, то есть сопоставление расчетных результатов с экспериментальными (с учетом погрешности измерений) и при их расхождении введение в модель поправок и уточнений.

2.3 Верификация расчетных моделей

Верификация соответствия магнитного поля разработанных расчетных моделей МС изготовленным экспериментальным может осуществляться путем сравнения:

- топологии силовых линий магнитного поля в рабочей зоне двигателя,
- распределения радиальной и осевой составляющих индукции поля в разрядном канале.

Одним из простейших способов визуализации топологии магнитного поля СПД является известный метод железных опилок [95]. Ранее данный метод активно использовался для определения конфигурации силовых линий в канале двигателя, в настоящее же время применяется в основном для верификации расчетных моделей.

Распределение индукции магнитного поля СПД можно получить по результатам прямых измерений на двигателе. В ОКБ «Факел» магнитные измерения осуществляются с использованием разработанного в ОКБ координатного устройства и следующих приборов:

- измерителя магнитной индукции РШ1-10 – переносного прибора, предназначенного для измерения индукции постоянного магнитного поля магнитов, электромагнитов и соленоидов. Измерения проводятся с помощью измерительных зондов, отличающихся расположением преобразователей Холла. Зонд «М» - для измерения индукции, перпендикулярной рабочей поверхности чувствительной зоны зонда, зонд «С» - индукции, параллельной оси зонда. Диапазон измерений данного прибора составляет 10..300 мТл при измерении с помощью зонда

«С» и 10..2000 мТл при измерении зондом М. Прибор содержит следующий полудиапазоны: 10..20 мТл, 20..200 мТл, 200..2000 мТл. При этом основная погрешность измерений составляет не более $\pm(1,5 - \frac{10}{B_{\text{изм}}})\%$ в диапазоне 10..100 мТл и $\pm 1,5\%$ в диапазоне свыше 100 мТл, где

$B_{\text{изм}}$ - измеряемое значение магнитной индукции.

– милитесламетра портативного универсального ТП2-2У №955 так же с двумя зондами для измерений. Диапазон измерений магнитной индукции для этого прибора от 0,1 до 1999 мТл на пределах измерений 20, 200, 2000 мТл. Основная относительная погрешность Δo в % при измерении индукции постоянного магнитного поля не превышает значений, рассчитанных по формуле $\Delta o = \pm[2,0 \pm 0,1(B_{\text{п}} / B_{\text{н}} - 1)]$, где $B_{\text{п}}$ - предел измерений милитесламетра [мТл], $B_{\text{н}}$ - показания милитесламетра [мТл].

Схема разработанной системы (установки) для измерения магнитной индукции и ее общий вид показаны на рисунках 27 и 28 соответственно.

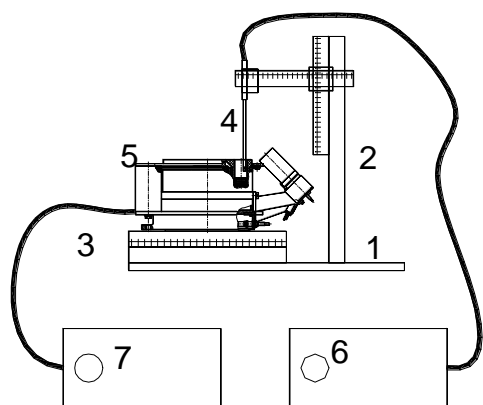


Рис. 27 Схема устройства измерения азимутальной равномерности магнитной индукции



Рис. 28 Общий вид системы для измерения азимутальной равномерности магнитной индукции

Для закрепления зондов (4) измерителя магнитной индукции (6) на плите-основании смонтировано координатное устройство (2). Это же устройство служит для перемещения и координирования зонда относительно испытуемого двигателя (5). Для закрепления двигателя на устройстве имеется монтажное устройство (3). Координатное и монтажное устройства монтируются на плите-основании (1).

Питание катушек МС двигателя при выполнении измерений осуществляется от источника постоянного тока (7).

Координатное устройство позволяет перемещать измерительный зонд (датчик) магнитного поля в вертикальном и горизонтальном (радиальном) направлениях. Погрешность

установки и позиционирования зонда относительно контрольной точки - 0,05 мм. Кроме того применение координатного устройства дает возможность измерения азимутального распределения поля в канале. При измерениях зонд с помощью координатного устройства вводится в РК двигателя, а изменения сечений выполняются за счет поворота двигателя на заданный угол с помощью монтажного устройства, которое имеет механизм поворота с приводом для поворота смонтированного на монтажном устройстве двигателя вокруг его оси. Кроме того позволяет устанавливаемый испытуемый двигатель таким образом, чтобы положение его геометрической оси совпадало с положением геометрической оси привода. На приводе имеется специальная координатная шкала для контроля углового положения двигателя относительно зонда. Погрешность установки составляет не более 0,5 углового градуса.

В конструкции деталей и узлов системы для измерения индукции СПД по возможности использованы немагнитные материалы, что уменьшает влияние внешних магнитных полей на результаты измерений внутри канала двигателя.

Методика выполнения измерений с точки зрения последовательности операций может быть следующей:

- 1) установка испытуемого двигателя на монтажное устройство и его юстировка относительно базовых осей и поверхностей монтажного устройства;
- 2) сборка электрической схемы и схемы измерений. Установка зонда в контрольную точку. Подготовка измерительного прибора и источника питания магнитных катушек;
- 3) проведение измерений магнитной индукции при выбранном значении тока в катушках и в выбранных сечениях;
- 4) Обработка результатов измерений.

С целью определения параметров поля в разрядном канале необходимо проводить измерения распределения радиальной и осевой составляющих магнитной индукции посередине канала, по внутренней и наружной стенкам РК от анода к выходу из РК двигателя при токах в катушках намагничивания, рекомендуемых по результатам магнитных расчетов, в сечении между магнитными катушками, проходящем через положение К-К.

По полученным результатам измерений определить точки, в которых достигаются максимальные значения магнитного поля. Эти точки затем целесообразно использовать в качестве контрольных точек для дальнейших измерений, в частности азимутальной равномерности распределения магнитного поля. Так как в этом случае минимизируется погрешность измерения, обусловленная большим градиентом магнитной индукции при неточной установке зонда.

Измерения азимутальной равномерности должны выполняться в контрольных точках на радиусах, соответствующих внутренней и наружной стенкам РК в нескольких сечениях

расположенных равномерно по азимуту канала двигателя. Обычно для определения азимутальной равномерности достаточно измерений в 8 или 16 сечениях (соответственно с шагом 45 и 22,5 градуса). За начало отсчета выбирается место расположения К-К. Обход сечений измерения ведется от катодов по часовой стрелке. Токи в катушках намагничивания желательно устанавливать расчетными или выбрать в ходе работы, таким образом, чтобы индукция в контрольных точках находилась в диапазоне 10..20 мТл, учитывая чувствительность измерительных приборов. При проведении оценки величины разброса измеренных значений может быть использована обработка результатов с использованием анализа Фурье.

Качество МС с точки зрения азимутальной равномерности может быть оценено по величине коэффициентов неравномерности магнитного поля $K_{нр}$, рассчитываемых при обработке экспериментальных значений индукции на двух радиусах. По результатам исследований влияния неравномерности магнитного поля в канале СПД на основные характеристики двигателей в ОКБ «Факел» принято считать допустимой с точки зрения годности изделия величину коэффициентов $K_{нр}$ на срезе РК, не превышающую 4 %. Установлено, что оценочное значение суммарной погрешности измерения азимутальной неравномерности магнитной индукции не превышает 2 % при доверительной вероятности 0,95.

С целью определения возможностей разработанной МС необходимо так же проводить измерения радиальной магнитной индукции в выбранной на первом этапе измерений контрольной точке по середине РК при увеличении тока в катушках намагничивания с шагом 0,5 А в диапазоне от 0 А до значений тока, при которых индукция перестает расти.

Последним этапом является сопоставление полученных экспериментально значений магнитного поля с расчетными значениями и в случае расхождения введение в расчетную модель необходимых поправок с учетом погрешности измерений.

Следует отметить, что расхождение может быть вызвано:

- ошибками метода расчета (ошибки дискретизации и обычные ошибки округления и аппроксимации, связанные с вычислительной процедурой);
- несоблюдением описанных выше требований по определению размера расчетной области и заданию граничных условий,
- некорректным упрощением расчетной схемы (например, в области наружного магнитопровода);
- точностью задания исходной информации (например, магнитных свойств используемых материалов);
- качеством изготовления элементов МС;

– качеством сборки элементов МС (так в местах соединения отдельных деталей магнитопровода возможно образование дополнительных «паразитных» воздушных зазоров, увеличивающих магнитное сопротивление цепи. При этом зная величину «паразитного» зазора l в магнитопроводе и параметры магнитного поля в нем можно оценить потери ампервитков в нем по формуле $\Sigma Iw = \oint H_l dl$. При этом с увеличением магнитного потока в контуре потери ампервитков в зазоре будут так же линейно увеличиваться).

Вследствие этих причин практически считается удовлетворительным расхождение расчетных данных с экспериментальными не более чем на 10%.

С целью проверки представленной расчетной методики было исследовано магнитное поле СПД различных типоразмеров разработки ОКБ «Факел». Как показали результаты верификации приведенной методики расчета магнитного поля СПД, разница между расчетными значениями магнитной индукции и измеренными экспериментально составляет приблизительно 3-6 %. А конфигурации силовых линий магнитного поля в УК СПД, полученные при расчетах, практически идентичны топологиям, полученным экспериментальным путем с применением железных опилок. Характерные результаты проводимой верификации приведены на рисунках 29, 30, 31.

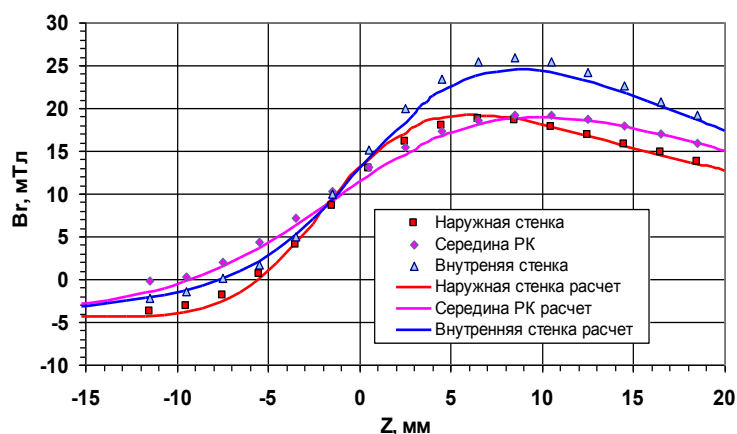


Рис. 29 Сопоставление расчетных и измеренных значений магнитной индукции в канале СПД типа СПД-100

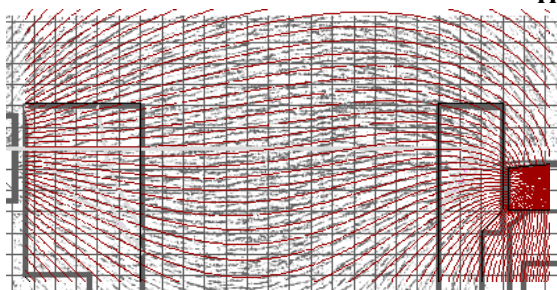


Рис. 30 Топология силовых линий СПД-70

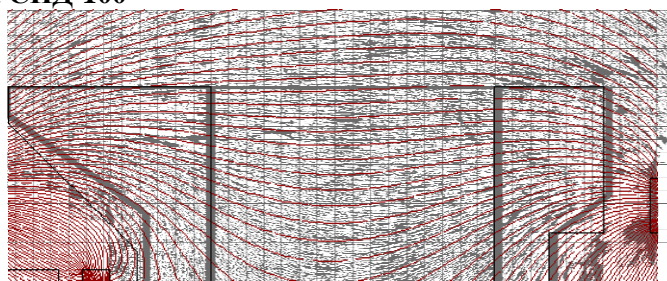


Рис. 31 Топологии силовых линий СПД-100

Таким образом, можно считать, что предложенная методика определения магнитных характеристик СПД может быть использована для поверочных и проектных расчетов.

2.4 Анализ оптимальности массовоэнергетических характеристик магнитных систем

При разработке МС СПД особое значение имеет обеспечение высокой эффективности ее использования как с точки зрения массовых, так и энергетических характеристик при условии достижения требуемых выходных параметров двигателя. С помощью представленной выше методики с использованием модуля EMAG ППП NISA/DISPLAY Version 18 было проведено исследование факторов, определяющих массовоэнергетические характеристики МС, и сформулированы основные рекомендации по выбору оптимальной схемы и конструктивных и электрических параметров МС.

В качестве объектов исследования были выбраны МС типоразмера СПД-100 и варианты ее модификации.

Исследуемыми параметрами являлись:

- распределение магнитного поля в УК и в элементах МС,
- параметры, характеризующие эффективность МС с точки зрения массы: масса МС m , параметр K_3 ,
- параметры, характеризующие энергетическую эффективность МС: величина требуемой МДС $\sum I\omega$, мощность катушек намагничивания N , параметр K_1 , параметр K_2 .

Так как основная задача МС состоит, в первую очередь, в обеспечении требуемых величины и конфигурации магнитного поля в рабочем зазоре, при исследовании рассматривались так же распределение МДС по контуру МС и величина МДС, приходящаяся на рабочий зазор, в том числе в процентном отношении к суммарной.

Главным фактором, ограничивающим эффективность использования МС, является магнитное насыщение ее элементов, особенно в высоковольтных СПД, предполагающих обеспечение достаточно высокого уровня магнитной индукции в УК. Наиболее критичными с точки зрения насыщения элементами являются: сердечники катушек намагничивания, основание магнитопровода в области расположения наружных катушек намагничивания и магнитные экраны.

Насыщение в сердечниках катушек намагничивания характеризуется практически незначительным повышением величины магнитного поля в канале при значительном увеличении токов в катушках.

Так, например, моделирования МС типовой схемы типоразмера СПД-100 с применением сплава 49 КФ с насыщением сердечника внутренней катушки показало, что при токе в катушках более 6А индукция в сердечнике внутренней катушки начинает превышать допустимый по насыщению для сплава 49КФ предел 2,1 Тл, при этом приращение индукции в контрольной точке, выбранной посередине УК, в точке максимума поля (9 мм над внутренней плоскостью наружного полюса) с увеличением тока снижается примерно в два раза с 2,5 мТл на

ампер до 1,3 мТл на ампер (см. рис. 32). Таким образом, для получения в УК требуемого уровня индукции с максимумом, например, в 25 мТл во внутреннюю катушку намагничивания в связи с насыщением необходимо подать ток на 15 % выше (8,4 А вместо 7,2 А, см. рис. 33), чем в случае эффективно функционирующей МС, что приводит к увеличению мощности катушки не менее чем на 36 %. Параметр K_1 в этом случае составит 1,29 Вт/ мТл вместо 0,95, параметр K_2 69 АВ/мТл вместо 59. Величина МДС в рабочем зазоре в обоих случаях будет одна и та же 1755 АВ, но для системы без насыщения это примерно 95% от суммарной МДС, а для МС с насыщением только 80%.

Таким образом, насыщение сердечников магнитных катушек приводит к нежелательным энергетическим затратам, а так же к возможным проблемам отвода тепла, затрудняет получение оптимальной величины и конфигурации силовых линий магнитного поля в УК, и это особенно существенно при насыщении сердечников наружных катушек намагничивания. В этом случае вместо ожидаемой конфигурации магнитного поля в разрядном канале наблюдается наклон магнитных силовых линий к наружной стенке РК при общем снижении уровня магнитной индукции, что может негативно повлиять на ионную фокусировку и снизить выходные характеристики двигателя.

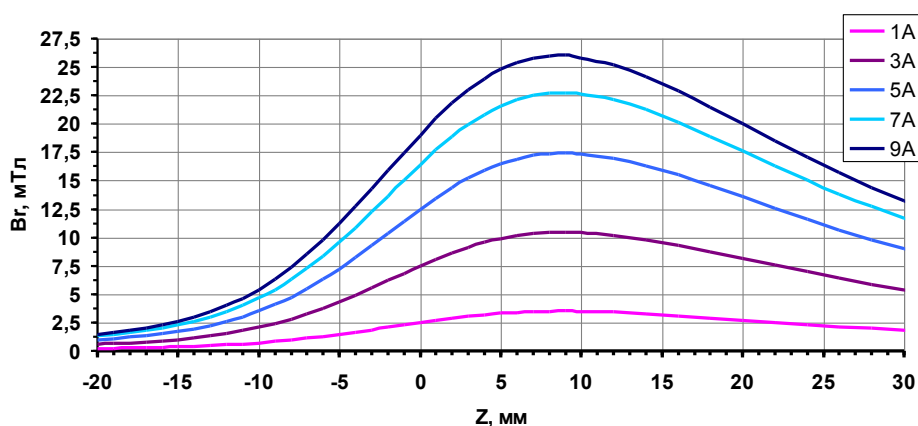


Рис. 32 Изменение радиальной составляющей магнитного поля в УК при изменении тока в катушках МС

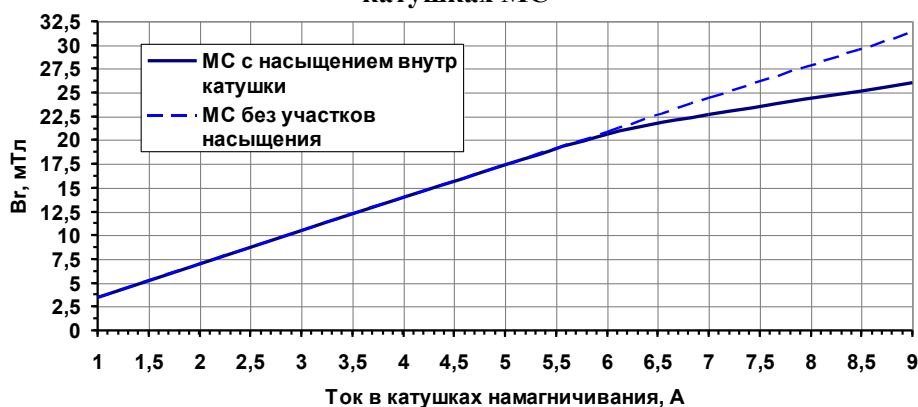


Рис. 33 Изменение радиальной составляющей магнитного поля в контрольной точке при изменении тока в катушках МС

Насыщение в основании магнитопровода в области расположения наружных катушек намагничивания (см. рис. 34, где представлены результаты распределения индукции в элементах МС типоразмера СПД-100 (показана восьмая часть конструкции), в которой наблюдается данный эффект) проявляется также, как и насыщение сердечников наружных катушек и также приводит к снижению их роли в организации необходимого уровня индукции и топологии магнитного поля в УК СПД.

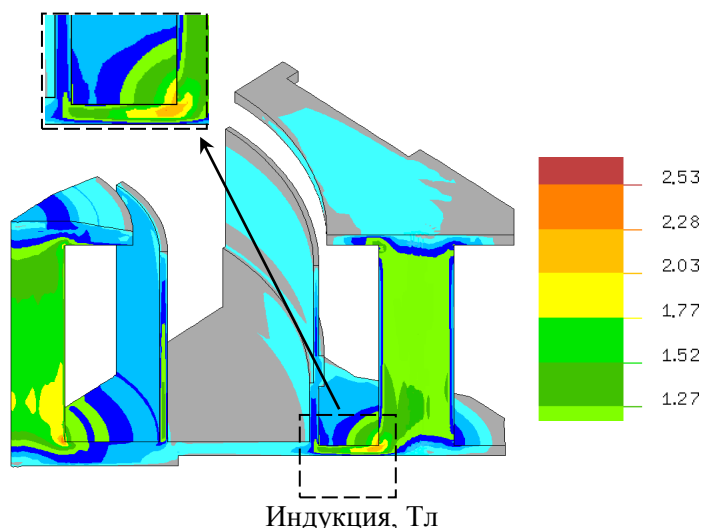


Рис. 34 Распределение индукции магнитного поля в элементах МС

Насыщение магнитных экранов, напротив, ведет к росту индукции в УК. Результаты расчетов радиальной индукции по середине УК и в контрольной точке, выбранной посередине УК в точке максимума поля (9 мм от внутренней плоскости наружного полюса) при изменении токов во внутренней (ВК) и наружных (НК) катушках намагничивания для МС с смоделированным насыщением внутреннего экрана представлены на рисунках 35 и 36 соответственно.

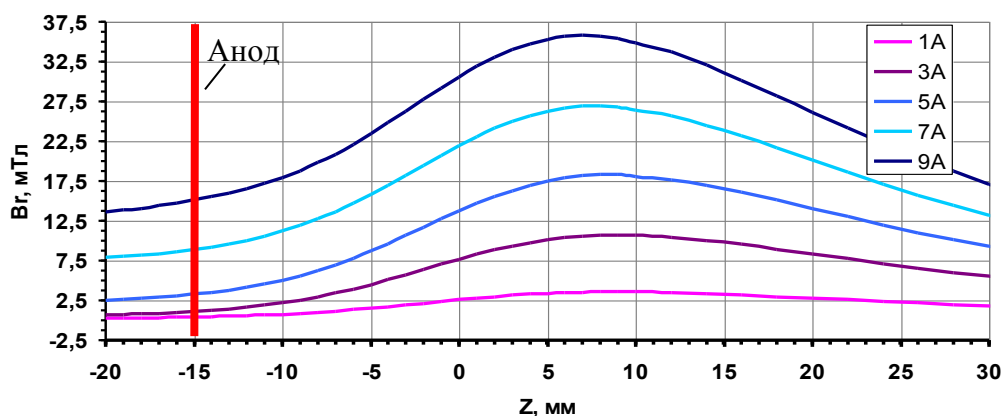


Рис. 35 Изменение радиальной составляющей магнитного поля в УК при изменении тока в катушках МС

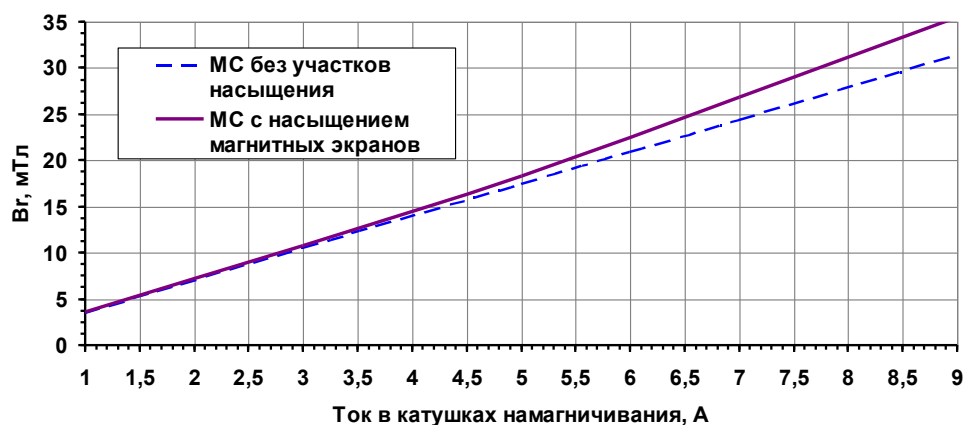


Рис. 36 Изменение радиальной составляющей магнитного поля в контрольной точке при изменении тока в катушках МС

Из рисунка 36 видно, что насыщение наступает при токе в катушках намагничивания 4,5 А и выше. Зависимость индукции в УК от тока в этом случае так же становится нелинейной, но отличается от зависимости, полученной при насыщении других элементов МС (см. рис. 33), так как наблюдается ее увеличение, а не снижение. Это связано с перераспределением магнитного потока в контуре. В связи с насыщением внутреннего экрана снижается его пропускная способность, и часть потока, который ранее шунтировался в экран, переходит в УК. Так для тока 9 А величина МДС, приходящаяся на УК, из-за насыщения увеличилась на 13% и составила 39% от общего числа ампервитков, что, как показали расчеты выше на 4% по сравнению с МС без насыщения. Данный эффект только на первый взгляд является положительным, так как рост магнитной индукции в точке максимума сопровождается и ростом индукции в области анода, что приводит к снижению градиента поля, а положение точки максимума постепенно смещается вглубь канала (например, при токе 9 А на 2 мм, см. рис. 35). Как следствие происходит увеличение протяженности магнитной линзы, а соответственно и СИУ, и его смещение к аноду, что влечет за собой дополнительные потери ионов на стенках РК, тем самым снижая параметры и эффективность работы двигателя. На рисунках 37 и 38 показаны магнитные линзы, определяемые положением силовых линий, проходящих через точки B_{max} и $0,7B_{max}$ посередине УК, для МС без насыщения и МС с насыщением внутреннего магнитного экрана, иллюстрирующие данный факт.

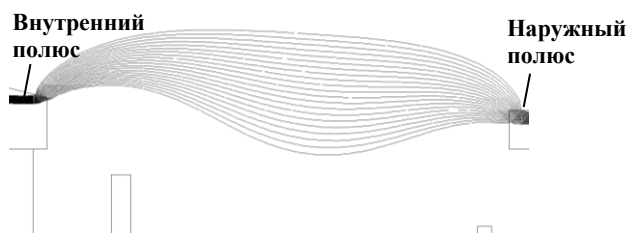


Рис. 37 Магнитная линза для МС без насыщения



Рис. 38 Магнитная линза для МС с насыщением внутреннего магнитного экрана

Таким образом, необходимым условием для обеспечения оптимальности массовоэнергетических характеристик МС СПД является как минимум отсутствие в МС участков магнитного насыщения. Площади всех элементов МС по возможности должны быть выбраны с некоторым запасом по индукции насыщения материала, выбранного для изготовления, для гарантированного обеспечения функционирования СПД и обеспечения функционирования СПД в случае повышения температуры изделия при нагреве в процессе работы.

При проведении анализа в дальнейшем рассматриваются МС, индукция в элементах которых не превышает допустимое по магнитному насыщению значение.

Стоит отметить, что и в ненасыщенном состоянии в магнитных экранах осуществляются потери ампервитков МДС, которые могли бы быть задействованы для создания поля в рабочем зазоре, однако как уже было отмечено в 1 главе, они позволяют решить проблему обеспечения требуемой для высокой эффективности работы и высокого ресурса СПД величины и топологии магнитного поля в УК при уширенном межполюсном зазоре. В целях уточнения влияния магнитных экранов на параметры магнитного поля и массовоэнергетические характеристики МС были проведены магнитные расчеты для МС типоразмера СПД-100 с магнитными экранами (МЭ) и без них. На рисунках 39 и 40 соответственно представлены результаты расчетов распределения относительной величины радиальной индукции посередине УК, нормированного к величине поля МС с МЭ для обоих случаев и конфигурация магнитной линзы, определяемой положением силовых линий, проходящих через B_{\max} и $0,7B_{\max}$, для МС без МЭ.

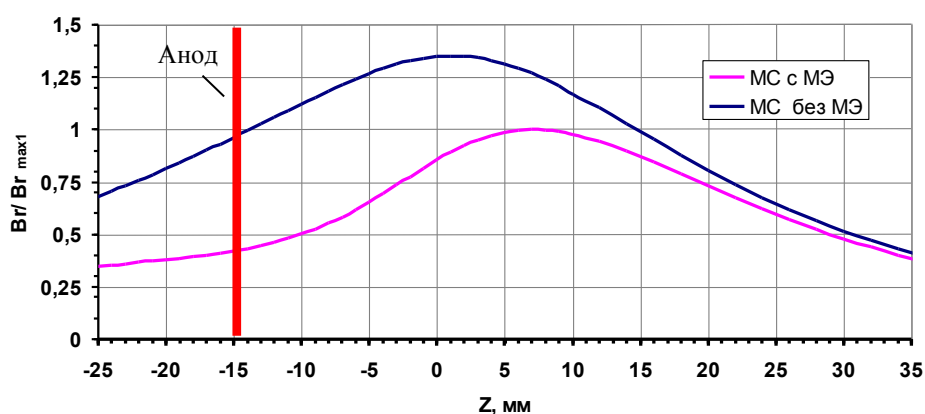


Рис. 39 Распределение радиальной магнитной индукции посередине УК в относительных величинах

По результатам расчетов установлено, что максимальная величина индукции в УК для МС без МЭ увеличивается на 35% при увеличении в зоне расположения анода на 55%, т.е. градиент поля в таких МС значительно ниже, чем в МС с МЭ. Положение же самого максимума поля опускается на 6 мм к аноду. МДС, приходящаяся на УК, на 15% выше и составляет 50% от

общего числа ампервитков. При этом индукция в сердечниках катушек намагничивания снижается на 35% из-за уменьшения «паразитных» потоков.

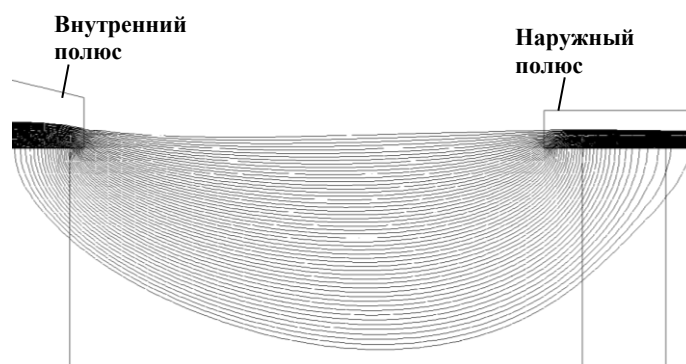


Рис. 40 Магнитная линза для МС без магнитных экранов

За счет снижения индукции в элементах МС при общем увеличении поля МС без МЭ обладают меньшей массой и мощностью, однако не могут обеспечить длительного ресурса, что характеризует и магнитная линза, представленная на рисунке 40.

В МС такого типа обычно осуществляется сближение магнитных полюсов к середине канала. Расчет смоделированного варианта МС со сближенными на 5 мм полюсами показал, что в этом случае индукция поля при одинаковой МДС имеет прирост в максимуме на 50%, при увеличении в зоне анода на 20%. Т.е. сближение полюсов или уменьшение рабочего зазора позволяет увеличить градиент поля и сократить протяженность магнитной линзы. При этом индукция в сердечнике внутренней катушки возросла на 24% и наружных на 12%. Таким образом, для получения максимальной величины поля в УК, полученной до сближения полюсов, при их сближении на 5 мм в исследуемой МС необходимо снизить ток в катушках с 9 А до 6 А, при этом индукция в элементах МС будет на 17-25% ниже по сравнению с вариантом до сближения, таким образом можно снизить массу и мощность МС. На рисунке 41 показано относительное распределение радиальной индукции посередине УК для трех вариантов МС. Из рисунка видно, что уменьшение рабочего зазора приводит к увеличению градиента поля и приближает его к значению для МС с МЭ. Однако это так же приводит, во-первых, к уменьшению толщины стенок РК, а, во-вторых, не позволяет обеспечить вынос магнитной линзы над магнитными полюсами (см. рисунок 42).

Влияние тока в катушках намагничивания на конфигурацию магнитной линзы в таких МС незначительно. Результаты расчета при увеличении тока в наружных катушках в 1,5 раза до 9А для данной МС представлены на рисунке 43. Несмотря на увеличение тока в УК, сравнение рисунков 42 и 43 показывает, что положение магнитной линзы, ее конфигурация и протяженность остаются практически идентичными, несколько меняется в этом случае только топология силовых линий под внутренней плоскостью наружного полюса.

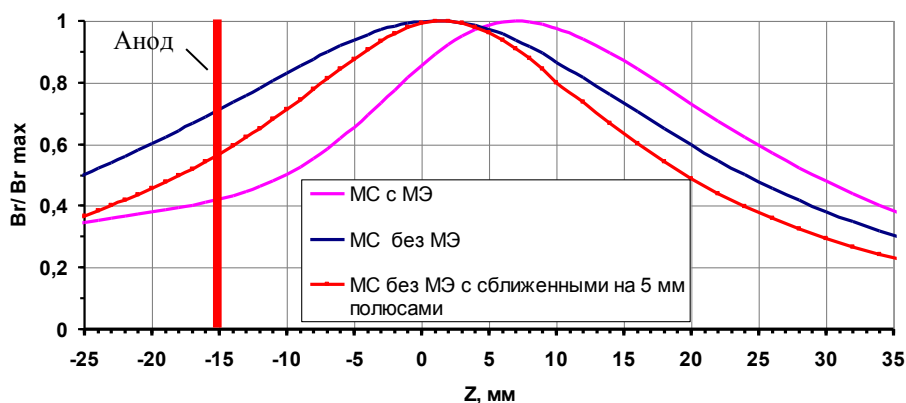


Рис. 41 Распределение радиальной магнитной индукции посередине УК в относительных величинах

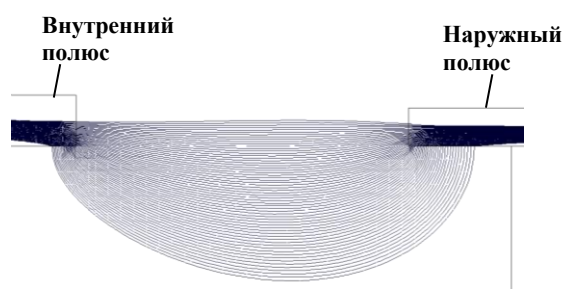


Рис. 42 Магнитная линза для МС без магнитных экранов со сближенными на 5 мм полюсами

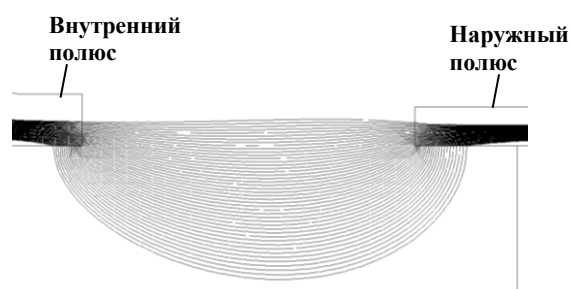


Рис. 43 Магнитная линза для МС без магнитных экранов со сближенными на 5 мм полюсами при токе в увеличенном до 9А токе в наружных катушках намагничивания

Поэтому такие МС несмотря на наименьшую массу и энергопотребление не могут быть основой для СПД длительного ресурса и большого типоразмера.

В МС же с МЭ достаточно легко управлять топологией поля в УК за счет образования в таких МС двух магнитных контуров (внутреннего и наружного). Можно создать оптимальную конфигурацию поля в РК, изменяя соотношение ампервитков в вакуумных зазорах. При этом соотношениями можно управлять, как изменяя конструктивные размеры элементов МС (диаметры полюсов, диаметры экранов, высоту полюсов, величины зазоров между экранами и полюсами), так и изменяя величину МДС в катушках намагничивания (см. рис. 44 и 45).

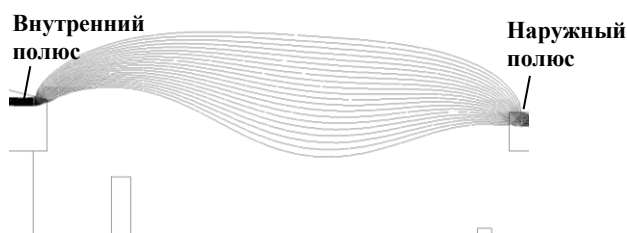


Рис. 44 Магнитная линза для МС с магнитными экранами

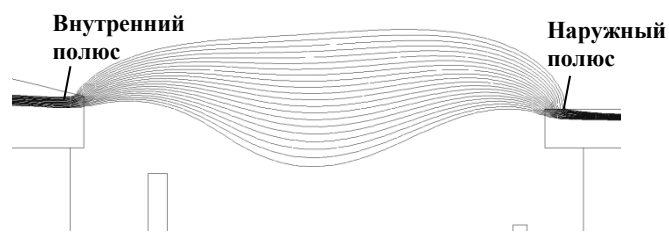


Рис. 45 Магнитная линза для МС с магнитными экранами при увеличении тока в НК

Некоторого снижения потерь ампервитков в магнитных экранах можно добиться уменьшением толщины выходных торцев экранов, что приведет к незначительному увеличению магнитной индукции в УК, и приближением магнитных экранов к середине УК.

В настоящее время, как перспективные, рассматриваются СПД с секционной РК. Преимущества МС двигателей такого типа заключается в именно в возможности осуществления данного приближения.

Были смоделированы следующие варианты: 1) - в рассматриваемой выше МС с магнитными экранами экраны были отделены от основания магнитопровода и 2) – в полученном варианте магнитные экраны были сближены, как если бы они находились внутри РК СПД. На рисунках 46 и 47 изображены полученные магнитные линзы. В первом варианте отделение МЭ от магнитопровода привело к некоторому изменению конфигурации линзы при практически неизменной протяженности за счет перераспределения ампервитков в контуре. Во втором варианте протяженность линзы значительно уменьшилась, что говорит об увеличении градиента поля.

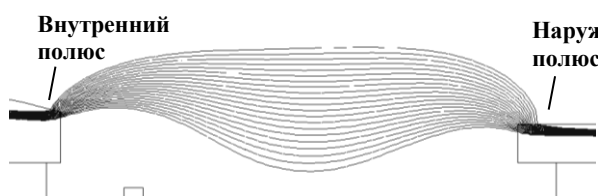


Рис. 46 Магнитная линза для МС с отделенными от магнитопровода магнитными экранами

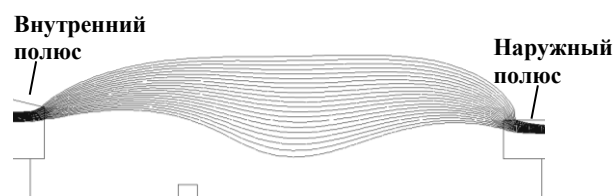


Рис. 47 Магнитная линза для МС с отделенными от магнитопровода сближенными магнитными экранами

На рисунке 48 показано распределение радиальной индукции посередине УК в относительных величинах для рассматриваемых вариантов.

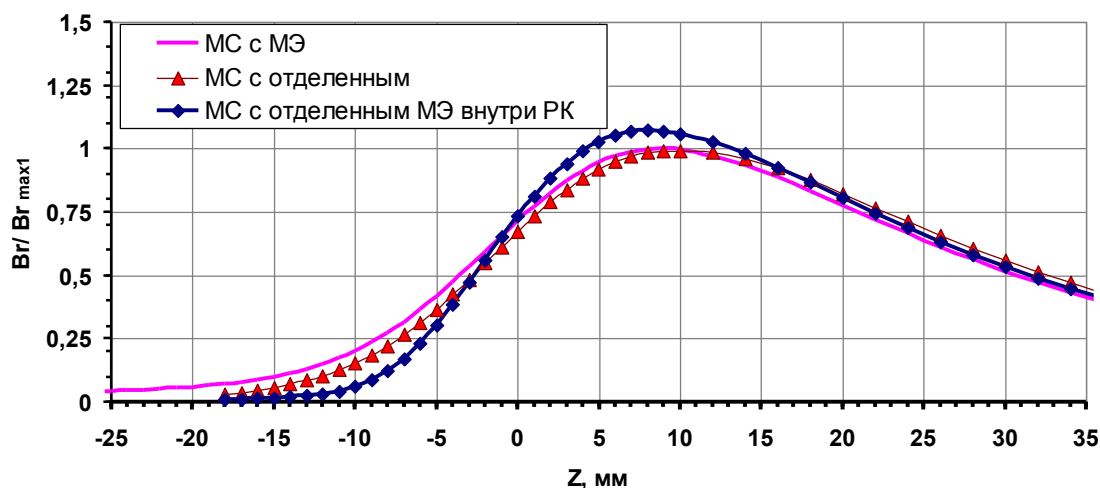


Рис. 48 Распределение радиальной магнитной индукции посередине УК в относительных величинах

Из рисунка видно, что 2 вариант обладает определенным преимуществом, так наблюдается рост градиента поля, снижение индукции в зоне анода при увеличении в

максимуме. При этом в первом случае индукция в сердечнике внутренней катушки снижается, а в наружной - значительно увеличивается. Во втором варианте по сравнению с первым наблюдается снижение индукции в обеих катушках намагничивания, что ведет и к снижению массы. Однако следует отметить, что данная схема менее чувствительна к изменению величины МДС в катушках, чем типовая с МЭ. Таким образом, необходимая фокусировка магнитной линзы может быть достигнута только благодаря выбору основных конструктивных соотношений элементов МС.

Увеличение градиента магнитного поля в СПД типовой схемы, как уже было отмечено в главе 1 может осуществляться с использованием анодной катушки намагничивания, которая может быть заменена с точки зрения улучшения массовоэнергетических характеристик двигателя кольцевым зазором в основании магнитопровода, величина которого будет определяться необходимой для оптимальной работы двигателя величиной МДС анодной катушки.

Что касается, выбора количества наружных катушек намагничивания, то с точки зрения, массовоэнергетической оптимальности МС, предпочтительно использовать 4 катушки вместо одной кольцевой, шести или восьми. Это связано со снижением массы обмотки при одинаковой массе сердечников. Суммарная мощность наружных катушек для рассматриваемых вариантов также минимальна для 4 катушек намагничивания.

Кроме того, снижения массы и мощности МС можно достичь применением магнитных материалов с более высоким порогом насыщения.

Глава 3. Зависимость ресурсных характеристик СПД от параметров и конфигурации магнитного поля. Исследования влияния магнитного поля на рабочие характеристики катода-компенсатора и двигателя в целом

В данной главе приведены результаты исследования взаимосвязи ресурсных характеристик СПД и параметров магнитного поля как в УК, так и на периферии двигателя. При этом ресурсные характеристики определялись геометрическими параметрами зон эрозии выходной части канала РК двигателей и скоростью эрозии элементов К-К при их боковом расположении (на периферии СПД).

Здесь же представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по определению влияния индукции и топологии магнитного поля на рабочие характеристики К-К при его боковом расположении.

Отмечена возможность и выработаны рекомендации для прогноза геометрических параметров зон эрозии стенок РК СПД по итогам магнитного расчета. Сформулированы

рекомендации для определения оптимального размещения К-К на периферии двигателя для обеспечения требуемых как ресурсных, так и тяговых характеристик.

3.1 Анализ результатов ресурсных испытаний и определение взаимосвязи между геометрическими характеристиками зон эрозии РК и величиной и топологией магнитного поля в УК СПД

Одним из основных узлов конструкции СПД, определяющих время его безотказной работы, является разрядная камера (РК). Как правило, прогноз ресурсных характеристик СПД строится на основе анализа степени эрозии выходной части канала РК, которая определяется

несколькими факторами: пространственным распределением плотности и структуры потока ионов в выходной части канала и эрозионной стойкостью материала РК к ионному распылению.

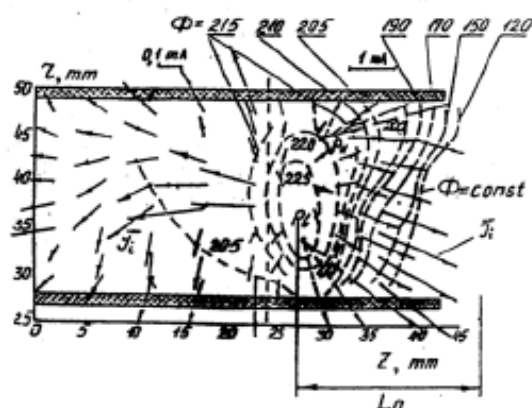


Рис. 49 Типичная для СПД структура ионного потока в УК

Пространственная плотность и структура ионов в выходной части канала зависит от параметров слоя ионизации и ускорения (СИУ). Экспериментальным

путем определено, что максимальная плотность ионного потока достигается в начальной части СИУ. Считается, что в этой области наблюдается постепенный переход эквипотенциалей от направления, близкого к продольному, к направлению близкому к радиальному, что определяет квазилучистую структуру пристеночных частей ионного потока, в которой направления ионных токов как бы исходят из некоторых фиктивных центров, а, следовательно, и большую величину потоков ионов на стенки канала (см. рис. 49 [5]).

В свою очередь, как уже упоминалось, протяженность и положение СИУ относительно среза РК определяются параметрами магнитного поля (распределением индукции и топологией поля в канале). Известно, что СИУ локализуется в области канала РК, где достигаются максимальные значения радиальной индукции, при этом нижняя граница слоя соответствует положению на срединной линии канала некоторой величины $k \times B_{r\max}$, где k – некоторый численный коэффициент, а $B_{r\max}$ – максимальное значение магнитной индукции. Известные численные значения коэффициента находятся в довольно широком диапазоне: от $k=0,6$ [5] до $k=0,7...0,9$ [17; 19]. При этом, положение СИУ зависит от режима работы двигателя, характеризующегося напряжением и током разряда [96; 97; 98; 99].

Положение границы зоны эрозии в канале РК непосредственно связано с положением СИУ [17] и определяется следующими геометрическими параметрами (см. рис. 50) [27]:

– глубина зоны эрозии, то есть величина эрозии внутреннего и наружного изоляторов РК от среза РК по направлению к аноду (L_B и L_H) (см. рис. 51),

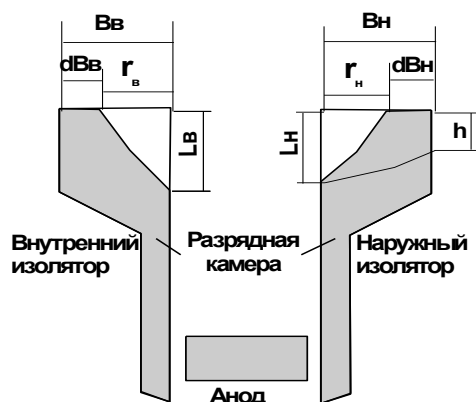


Рис. 50 Размеры, определяющие эрозию РК СПД

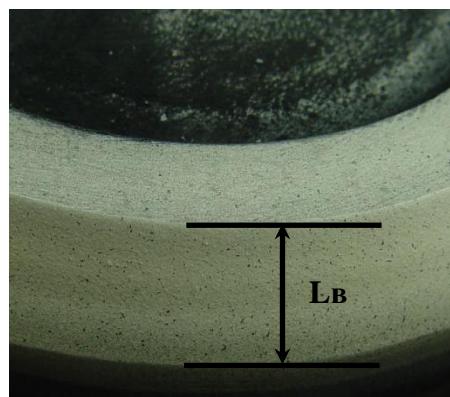


Рис. 51 Эрозия внутреннего изолятора РК СПД

– ширина зоны эрозии, т.е. величина эрозии внутреннего и наружного изоляторов РК на срезе (торце) (r_B и r_H). Иногда при анализе эрозионных процессов по срезу РК рассматривают оставшуюся толщину материала (dB_B и dB_H).

В большинстве случаев глубина зон эрозии внутренней и наружной стенок РК различна. При этом в [24] показано, что границы зон находятся на двух силовых линиях, между которыми располагается максимум функции, которая определяется как проекция градиента абсолютной величины магнитной индукции $|\vec{B}|$ на направление, перпендикулярное к вектору \vec{B} , в области которого предполагается положения ядра ионизации. Линии же для внутреннего и наружного изоляторов не совпадают между собой, но чаще всего, удалены на равное расстояние относительно точки максимума. Связь положения границы зон эрозии с силовыми линиями магнитного поля указывает на зависимость процессов эрозии от топологии магнитного поля, что также подчеркивается и в работах [29; 98; 99].

В ОКБ «Факел» имеются результаты как параметрических, так и длительных испытаний различных типоразмеров СПД и результаты измерений геометрических характеристик зон эрозии для этих же двигателей. Наличие таких данных позволяет провести анализ взаимосвязи между параметрами магнитного поля и характером эрозии и сопоставить результаты этого анализа с ранее полученными [100].

Для анализа использовались результаты испытаний, в том числе и ресурсных, двигателей типа СПД-50, СПД-70, СПД-100 и СПД-140 и их модификаций.

Параметры рабочих режимов двигателей приведены в таблице 8. Все двигатели работали при оптимальных значениях токов в катушках магнитных систем (оптимизация по минимуму тока разряда).

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

Так же следует отметить, что изоляторы РК исследуемых изделий были изготовлены из керамик БГП-10, АХ-05 и БГП-Д.

Для совместного анализа использовались:

- геометрические параметры зон эрозии стенок РК двигателей, а именно глубина и форма зон эрозии (профили эрозии);
- распределение радиальной индукции магнитного поля по срединной линии УК;
- конфигурация силовых линий магнитного поля.

Измерения параметров зон эрозии выполнялись после проведения огневых испытаний двигателей при рабочих параметрах, которые в течение проводимых испытаний поддерживались постоянными. Измерения проводились с помощью инструментального микроскопа, а так же методом сравнения с эталонным образцом с известными размерами. Погрешность определения глубины зоны эрозии не превышала 0,1 мм. Погрешность измерения

координат профилей эрозии не превышала $\pm 0,05$ мм.

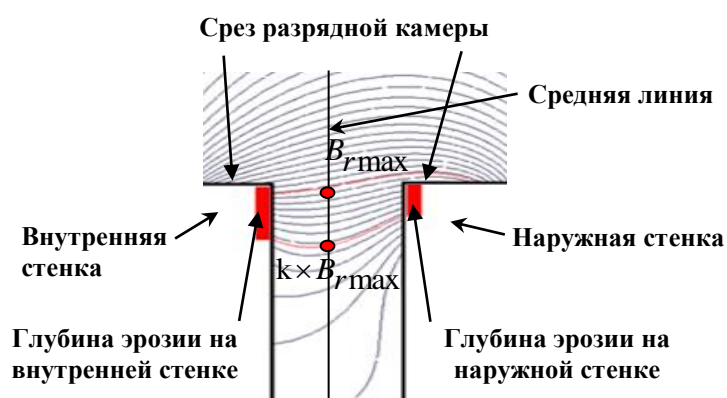


Рис. 52 Параметры, рассматриваемые при анализе

зон эрозии для исследуемых двигателей в виде схем приведены в таблице 9. Пояснения к схемам таблицы представлены на рисунке 52. При проведении анализа определялись силовые

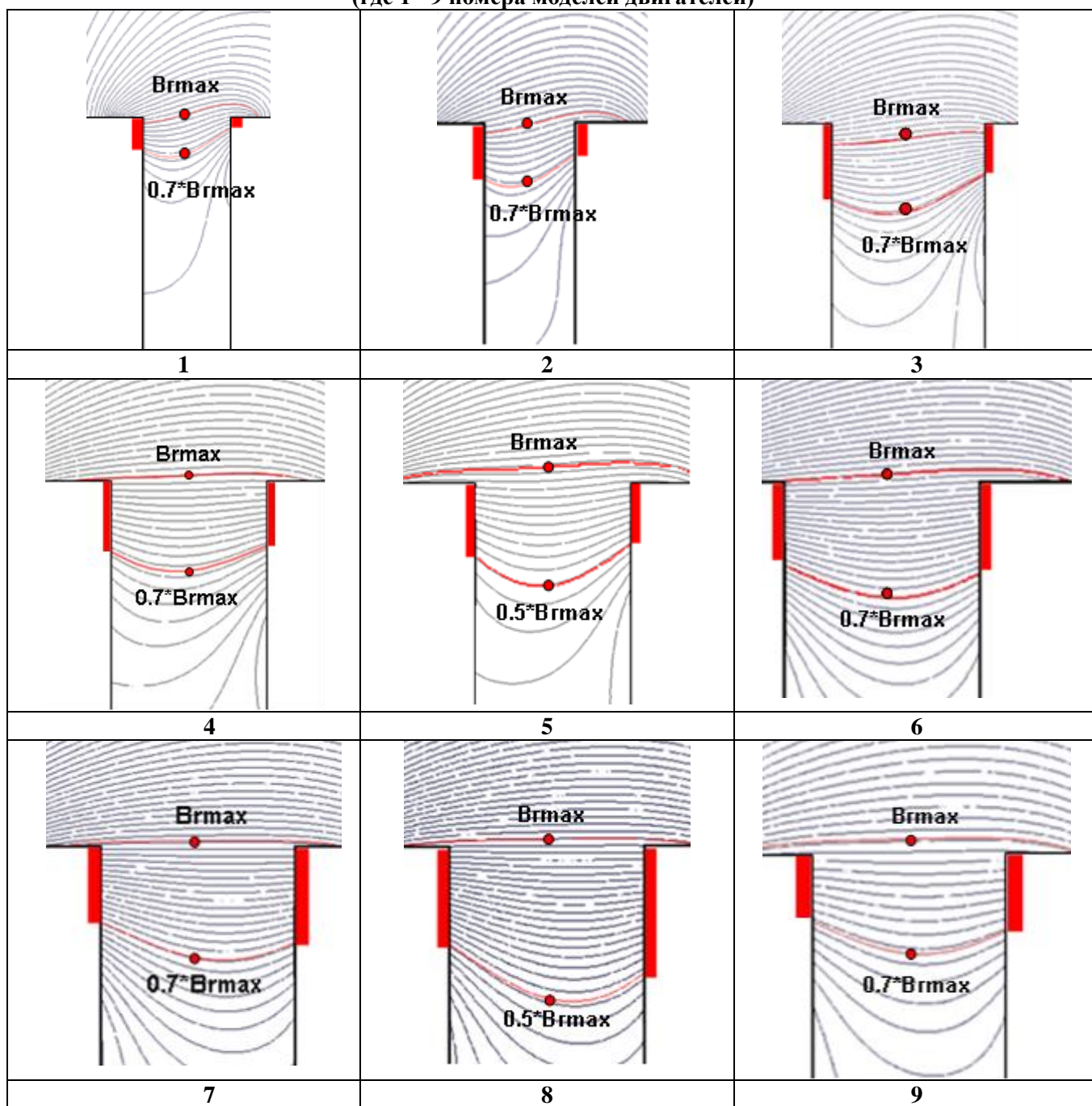
Параметры магнитного поля были определены расчетным методом с использованием методики, приведенной в главе 2.

Результаты сопоставления параметров магнитных систем и глубины

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 . Стоит отметить, что для более корректного анализа были использованы результаты измерений глубины зон эрозии на внутренних и наружных стенках РК после примерно одинаковой продолжительности работы всех двигателей, достаточной для четкого определения границ зон эрозии.

Таблица 9

Взаимное расположение границ зон эрозии и параметров магнитного поля исследуемых СПД
(где 1 - 9 номера моделей двигателей)



Представленные в таблице 9 результаты показывают, что для всех исследуемых двигателей границы зон эрозии на внутренней и наружной стенках РК со стороны анода находятся на пересечении со стенками канала одной силовой линии магнитного поля, проходящей через величину $k \times B_{r\max}$ по срединной линии УК, а численные значения коэффициента k для каждого случая различны.

При этом полученный результат для двигателей СПД-50, СПД-70 и СПД-100 - положение границ зон эрозии находится на пересечении со стенками РК силовой линии $0,7 \times B_{r\max}$ хорошо согласуется с известным ранее [17], если принимать во внимание форму силовой линии – она вогнута в направлении к аноду.

Следует напомнить, что для анализа использовались двигатели различного типоразмера, и рабочие параметры двигателей были различными. Ранее было показано [19], что на положение СИУ могут оказывать влияние как величина магнитной индукции в канале РК, так и режим работы двигателя, в частности, величина тока разряда, при котором двигатель работает. Ток же разряда при работе двигателя в оптимальном режиме непосредственно связан с расходом в анод.

Было показано также, что уменьшение расхода РТ при прочих равных условиях приводит к расширению СИУ в направлении к аноду и соответствующему смещению границы зоны эрозии в этом же направлении [7; 96]. Поскольку положение СИУ в целом определяется распределением магнитного поля, можно предположить, что названное смещение границы зоны эрозии связано с увеличением продольной протяженности (размера) СИУ при уменьшении расхода. Характер изменения продольного размера СИУ (L_a) может быть определен с использованием известной формулы Жаринова А.В. [101] для двигателя с анодным слоем:

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

где:

- m, e - масса и заряд электрона,
- U - падение напряжения в слое,
- B - индукция магнитного поля,
- $v_e = \langle \sigma_{ed} v_e \rangle n_a$ - 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,
- $v_u = \langle \sigma_u v_e \rangle n_a$ - частота ионизационных столкновений, где $\langle \sigma_u v_e \rangle$ – усредненный по функции распределения электронов коэффициент скорости ионизации,

При этом среднее значение концентрации атомов в слое можно считать пропорциональным плотности расхода рабочего газа через ускорительный канал, т.е.

$$n_a \approx k_n \frac{\dot{m}_a}{v_a S},$$

где \dot{m}_a - анодный расход, v_a - скорость атомов, S - площадь поперечного сечения канала.

Применительно к СПД приведенное выше выражение для эффективной частоты столкновений электронов можно записать в следующем виде [5; 7]:

$$v_e = v_{ea} + v_{ew} + \tilde{v}_e,$$

где $v_{ea} = \langle \sigma_{ea} v_e \rangle n_a$, а v_{ew}, \tilde{v}_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 продольный размер СИУ зависит от концентрации нейтральных атомов в ускорительном канале и, соответственно, от плотности расхода рабочего газа через него. Поэтому для исследуемых двигателей был проведен анализ зависимости приведенного выше коэффициента k , характеризующего значение магнитной индукции на граничной силовой линии посередине УК, от плотности расхода РТ.

Полученные результаты для всех подвергавшихся анализу СПД (независимо от величины индукции в канале, формы магнитной линзы, напряжения разряда и прочих) приведены на рисунке 53.

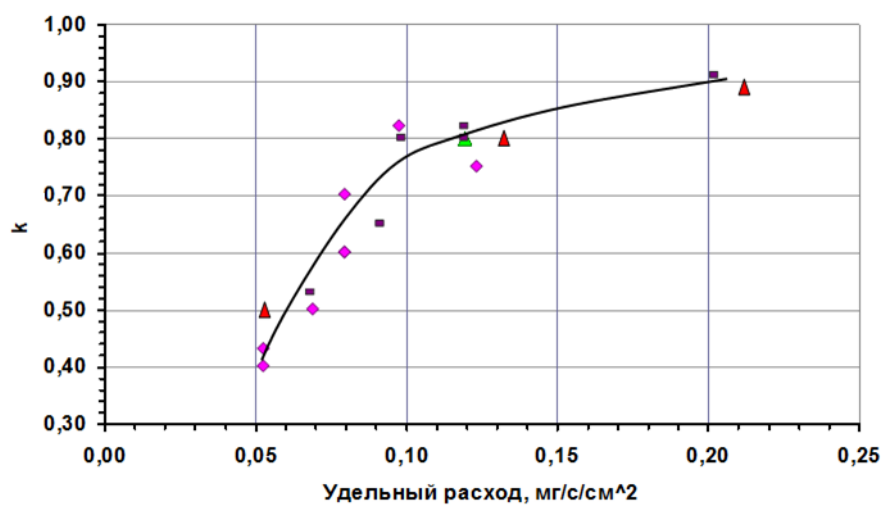


Рис. 53. Зависимость коэффициента k от удельного расхода для исследуемых двигателей (▲ - СПД типоразмера СПД-50, ◆ - СПД типоразмера СПД-70, ■ - СПД типоразмера СПД-100, ▲ - СПД типоразмера СПД-140)

Как можно видеть из рисунка 53, полученная зависимость «граничных» значений индукции магнитного поля от удельного расхода РТ удовлетворительно описывается единой кривой. При этом с уменьшением удельного расхода происходит и уменьшение численных значений коэффициента k , то есть границы зон эрозии стенок и граница СИУ со стороны анода уходят в глубину канала РК. Для двигателей с удельным расходом, превышающим $0,1 \text{ мг/с/см}^2$, начало зоны распыления не будет опускаться глубже $0,7 \times B_{r\text{max}}$.

Таким образом, полученные результаты позволяют с большой степенью вероятности полагать, что одной из причин разброса приводившихся ранее численных значений коэффициента k является различие в плотности расхода в РК исследуемых СПД.

На наличие зависимости между топологией магнитного поля и формой профилей эрозии указывали результаты еще первых длительных испытаний СПД. В качестве примера на рисунке 54 показана топология магнитного поля одного из двигателей типа СПД-100, визуализация которой была выполнена методом железных опилок. На этом же рисунке приведены профили эрозии, полученные для различных моментов времени в процессе длительной работы этого двигателя. Как можно видеть из представленных на рисунке результатов, между топологией

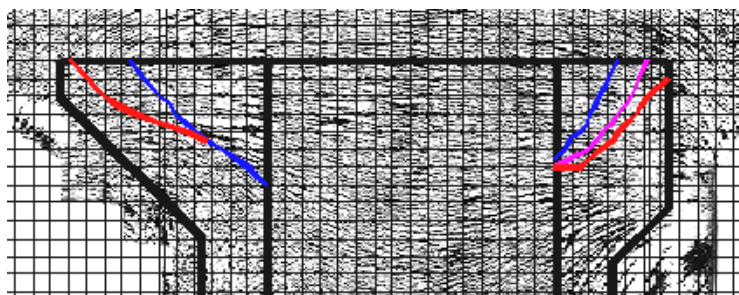


Рис. 54 Топология магнитного поля и профили эрозии СПД-100

магнитного поля и формой профилей эрозии имеется определенная качественная зависимость.

Для определения количественной зависимости между этими двумя параметрами было

проведено дополнительное исследование. Для этого использовались результаты измерений профилей эрозии двигателей в процессе их длительных испытаний в ОКБ «Факел». Все двигатели работали при напряжении разряда 300 В и неизменных значениях токов в катушках их МС. В качестве инструмента для определения параметров магнитного поля использовалась та же расчетная методика, что и при анализе зависимости между параметрами магнитного поля и глубиной зон эрозии стенок РК.

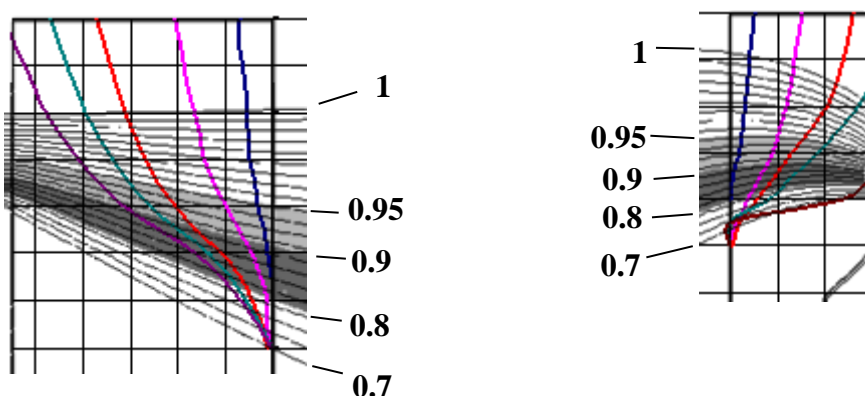
В таблице 10 наглядно показаны измеренные профили эрозии, конфигурация силовых линий магнитного поля, а также отмечены соответствующие значения коэффициента k по средней линии УК.

Для исследуемых двигателей по мере увеличения времени работы наблюдается смещение зоны эрозии к аноду. Этот процесс может быть объяснен уширением канала РК в процессе длительной работы и уменьшением удельного расхода в выходной зоне.

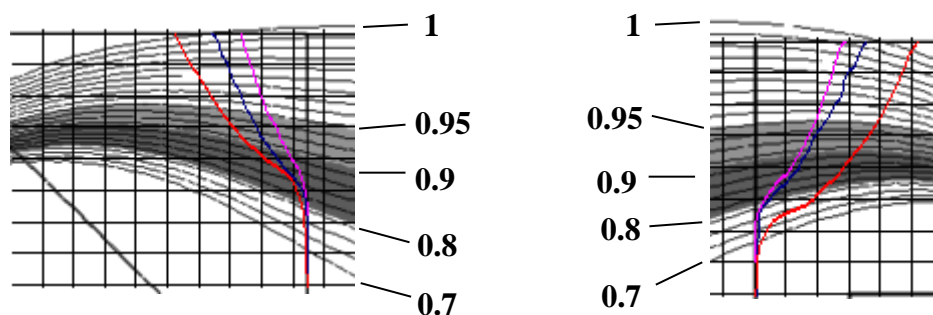
Из рисунков таблицы 10 видно, что характер изменения профиля от времени определенно коррелирует и с формой магнитных силовых линий. Так для исследуемых двигателей в зоне магнитной линзы, заключенной между силовыми линиями, проходящими через начало зоны эрозии и $0,8 \times B_{r\max}$, профиль эрозии «раскрывается» по форме магнитной линзы. Таким образом, можно предположить, что при некоторой неизменной глубине профиля, определяемой силовой линией, проходящей через величину $k \times B_{r\max}$ по средней линии УК, эрозии будет подвержена область РК среза до этой силовой линии.

Таблица 10

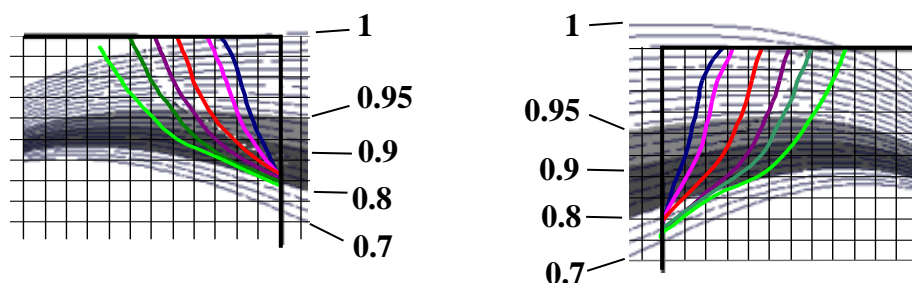
Результаты анализа характера изменения зон эрозии РК в процессе длительного ресурса и параметров и топологии магнитного поля



Профили эрозии изоляторов РК СПД-70



Профили эрозии изоляторов РК СПД-100



Профили эрозии изоляторов РК СПД-140

На основании проведенных исследований показано, 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 т.д.;

– выбор этой «граничной» силовой линии обуславливается величиной $k \times B_{r\max}$ по срединной линии УК, где коэффициент k может принимать различные значения и зависит от удельного расхода РТ в выходной зоне канала двигателя. При этом зависимость удовлетворительно описывается единой кривой;

– по мере увеличения длительности работы СПД наблюдается смещение глубины зоны эрозии к аноду, что затрудняет прогнозирование ее предельного положения;

– в процессе длительной работы двигателя при постоянном удельном расходе эрозии будет подвержена область стенок РК от среза до силовой линии, проходящей через точку $k \times B_{r\max}$ по средней линии УК. Предельные профили эрозии стенок РК близки к силовым линиям, что подтверждает принципиальную возможность создания СПД «бесконечного» ресурса.

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

3.2 Анализ влияния параметров магнитного поля на рабочие характеристики катода-компенсатора

К-К является одним из наиболее важных элементов СПД, так как играет определяющую роль в организации процесса получения и ускорения плазмы. От условий функционирования К-К, его надежности и ресурсных характеристик зависят эффективность работы, надежность и ресурсные характеристики двигателя в целом [31; 32].

Эффективность и надежность работы К-К в составе ЭРД определяются, в первую очередь, его месторасположением относительно анодного блока (АБ). Обычно месторасположение катода выбирают по результатам прямых огневых испытаний, при проведении которых измеряются 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):

$$U_{кз} = \phi_c - \phi_g, \quad (3.1)$$

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

Разность потенциалов между плазмой в струе и катодом можно записать в виде

$$\phi_{pl} - \phi_c = \Delta U_c + \Delta \phi_m, \quad (3.2)$$

где ϕ_{pl} – потенциал плазмы в струе двигателя; $\Delta U_c, \Delta \phi_m$ – соответственно прикатодное падение потенциала и падение потенциала в плазменном мостике между катодом и струей.

Из соотношения (3.2) получим:

$$\phi_c = \phi_{pl} - \Delta U_c - \Delta \phi_m. \quad (3.3)$$

Вакуумная камера «плавает» относительно плазмы струи. Поэтому можно считать, что ее потенциал равен:

$$\phi_g \approx \phi_{pl} - \gamma \frac{kT_e}{e}, \quad (3.4)$$

где коэффициент γ может доходить до ~ 6 .

Таким образом, для $U_{кз}$ на основании предыдущих формул можно записать:

$$U_{кз} = \phi_c - \phi_g \approx -\Delta U_c - \Delta \phi_m + \gamma \frac{kT_e}{e} \quad (3.5)$$

или по-другому:

$$U_{кз} - \gamma \frac{kT_e}{e} \approx -\Delta U_c - \Delta \phi_m. \quad (3.6)$$

Правая часть (3.6) характеризует энергетические затраты на получение электронов и доставку их в разряд при работе катода с двигателем. Таким образом, если при определенном размещении катода получить данные о температуре электронов и вычесть соответствующее слагаемое в левой части (3.6) из измеренного значения $U_{кз}$, можно оценивать эффективность использования К-К в определенном местоположении.

Кроме того, для работы двигателя важны потенциал плазмы ϕ_{pl} в струе и разность потенциалов анода ϕ_a или прианодной плазмы, имеющей потенциал, близкий к ϕ_a , и ϕ_{pl} , которая определяет максимальную ускоряющую разность потенциалов в двигателе при его работе. С учетом (3.3) и (3.6) имеем:

$$\phi_a - \phi_{pl} = \phi_a - \phi_c - \Delta U_c - \Delta \phi_m = \phi_a - \phi_c + U_{кз} - \gamma \frac{kT_e}{e} \approx U_p + U_{кз} - \gamma \frac{kT_e}{e} \quad (3.7)$$

где U_p – разрядное напряжение.

На основании приведенных формул можно заключить, что при рассмотрении факторов, влияющих на работу К-К и двигателя в целом, необходимы измерения параметров работающего двигателя, параметра U_{K3} и температуры электронов в струе.

При проведении огневых испытаний в ОКБ «Факел» ограничиваются измерением только параметров работающего двигателя и параметра U_{K3} . Критерием оптимальности выбора пространственного расположения К-К относительно анодного блока СПД является максимум тягового к.п.д. двигателя, достигаемый, как правило, при минимуме U_{K3} . Установлено, что при оптимальном расположении катода при работе на ксеноне величина U_{K3} не превышает 18...22 В, что ниже порога распыления материалов катода. Снижение U_{K3} до нуля указывает на появление случайной гальванической связи катодных цепей с «землей». В этом случае возможно самопогасание разряда вследствие того, что эмиссионный ток катода уменьшается на величину ионного тока. Возрастание же U_{K3} свидетельствует об отклонениях в работе К-К, которые могут быть вызваны: параметрами магнитного поля; параметрами теплового режима К-К; отравлением эмиттера; негерметичностью катода или малым катодным расходом газа. Неустойчивый режим работы К-К характеризуется так же повышением разрядного тока, колебаниями анодного напряжения, визуально наблюдаемыми колебаниями струи и изменением цвета и формы плазменного "моста" (факел с розоватым оттенком переходит в факел шарообразной формы зеленого цвета) [102].

При выборе места расположения катода должно учитываться и требование обеспечения его ресурсных характеристик. В случае неоптимального его расположения в процессе длительной работы он может быть разрушен истекающей из двигателя струей плазмы [27; 34]. Имеется ряд работ по исследованию влияния места расположения катода в СПД на эффективность его работы [31; 32; 33; 103; 104]. Считается, что основными факторами, определяющими место установки К-К, являются индукция и распределение магнитного поля в этом месте. В частности, показано, что для обеспечения высокой эффективности работы двигателя, катод необходимо располагать в зоне среза разрядной камеры, где магнитные силовые линии замыкаются между магнитными полюсами, то есть, в рабочей зоне. При испытаниях расположение катода в рабочей зоне визуально характеризуется интенсивным свечением области перед двигателем, в котором наблюдается светящийся жгут от катода к внутреннему магнитному полюсу, совпадающий с траекторией магнитной силовой линии, проходящей через катод. Это наглядно представлено на рисунке 55 а), а на рисунке 55 б) приведена конфигурация силовых линий магнитного поля и схематично отмечено положение К-К.

При этом элементы катода могут оказаться под воздействием ускоренного потока плазмы из РК, и, следовательно, уже в начале ресурса бомбардировке ускоренными ионами будет подвергаться торцевая часть поджигного электрода (ПЭ) К-К. Эта ситуация крайне нежелательна, так как ПЭ в катоде служит не только для инициирования первоначального разряда и способствует зажиганию основного разряда двигателя, но и выполняет дополнительные защитные функции внутренних элементов катода от ионного распыления. Поэтому интенсивному износу будут подвергаться и остальные элементы конструкции катода вплоть до их последующего разрушения, что в свою очередь будет ограничивать ресурс как самого катода, так и плазменного двигателя в целом [27; 34].

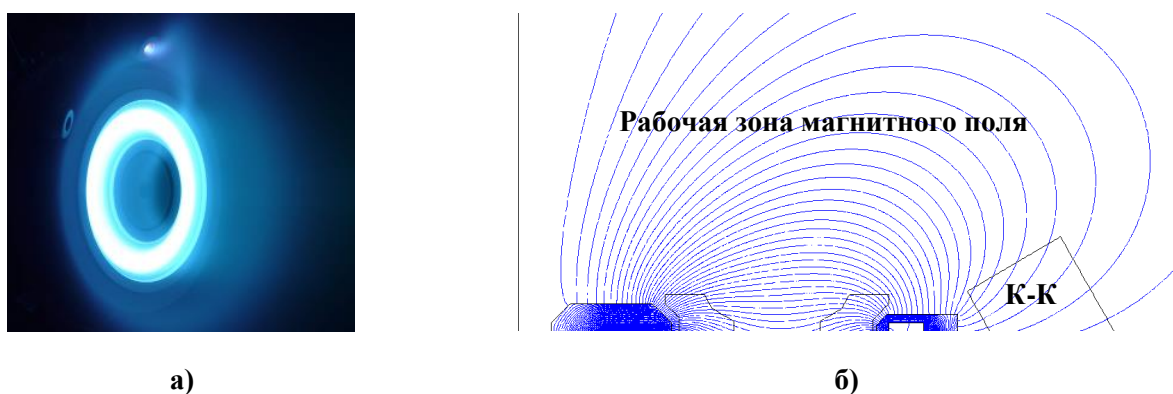


Рис. 55 а) - вид работающего двигателя при положении К-К в рабочей зоне магнитного поля; б) - конфигурация магнитного поля

Традиционно используемый способ резервирования К-К, как одного из наиболее критичных элементов конструкции плазменного двигателя, для обеспечения высокой надежности СПД становится несостоятельным, так как разрушающему воздействию ускоренной струи плазменного потока будут одновременно подвергаться как основной (работающий), так и резервный (неработающий) катоды-компенсаторы.

Размещение К-К таким образом, чтобы его торец с выходным отверстием находился в зоне минимального воздействия ускоренного потока плазмы, позволит снизить износ различных элементов его конструкции [105]. Однако в этом случае он, скорее всего, окажется в периферийной зоне магнитного поля, где индукция будет значительной [31; 32; 33; 103; 104]. Размещение К-К в периферийной зоне может приводить к снижению эффективности работы двигателя в связи с увеличением затрат на транспортировку электронов к аноду, сопровождающемуся ростом $U_{КЗ}$. Такое положение катода характеризуется фиолетовым свечением возбужденных атомов в периферийной зоне двигателя.

Следует так же отметить, что при большой величине напряжения в цепи «катод-земля» возрастает энергия ионов в зоне выходного отверстия К-К, что может проводить к более интенсивному распылению элементов этой зоны. При этом если некоторые элементы катода все-таки окажутся над наружным магнитным полюсом, они все равно могут подвергаться

процессу эрозии материалов. При этом степень эрозии материалов этих элементов будет возрастать с увеличением напряжения разряда и времени работы СПД, так как с ростом напряжения разряда возрастает доля двух- и трехкратно заряженных ионов, и соответственно возрастает энергия ионов периферийной части ускоренного потока плазмы, которая может составлять половину разрядного напряжения [106]. При увеличении времени работы двигателя соответственно будет возрастать и время воздействия на К-К периферийной части ускоренного потока.

В работе [23] показано, что при расположении К-К в непосредственной близости от среза РК двигателя, поток ксенона, истекающий из катода и необходимый для его работы, изменяет параметры двигателя, в частности, увеличивает его разрядный ток I_p при неизменных тяговых характеристиках. При значительном же радиальном отдалении катода от анодного блока величина параметра $U_{кз}$ уменьшается, а параметры, характеризующие эффективность двигателя, приближаются к оптимальным. Однако в этом случае увеличиваются габаритные размеры двигателя и снижается механическая прочность конструкции в целом.

На основании приведенного материала можно заключить, что задача поиска оптимального места размещения К-К в плазменном двигателе, обеспечивающего одновременно, с одной стороны, высокие выходные параметры СПД и, с другой стороны, надежную и эффективную работу самого К-К в течение необходимого срока эксплуатации СПД, становится весьма существенной.

Оптимальным принято считать такое размещение катода, при котором его торец находится если не в рабочей зоне, то, по меньшей мере, на границе раздела замыкания силовых линий рабочей и периферийной зон магнитного поля, а граница при этом располагается, по меньшей мере, под углом раскрытия ускоренного потока плазмы. Размещение торца с выходным отверстием катода-компенсатора на границе раздела замыкания силовых линий рабочей и периферийной зон магнитного поля позволяет реализовать наиболее близкую к максимальному значению эффективность работы катода-компенсатора и СПД благодаря снижению энергетических затрат на транспортировку электронов к аноду за счет максимального приближения к силовым линиям рабочей зоны поля. Расположение же границы раздела замыкания силовых линий во внешней области перед двигателем, по меньшей мере, под углом раскрытия ускоренного потока плазмы, позволяет решить задачу по повышению надежности и увеличению ресурса как К-К, так и СПД за счет размещения К-К вне зоны наиболее интенсивного разрушающего воздействия струи ускоренного потока плазмы.

Кроме того, в настоящее время активно исследуется, как перспективное, центральное

расположение К-К, то есть его размещение в отверстии в сердечнике внутренней катушки намагничивания. Считается, что центральное расположение К-К позволяет обеспечить высокий ресурс К-К, облегчает компоновку и упрощает юстировку его на объекте и, кроме того, позволяет устранить отклонение вектора тяги от геометрической оси двигателя в сторону работающего катода, что присуще периферийному расположению, и тем самым снизить расходимость струи.

Результаты исследований [107; 108] показали, что при центральном положении по сравнению с расположением катода на периферии наблюдается повышение тяговых характеристик двигателя, и это связывают с уменьшением затрат на транспортировку электронов из катодной полости к плазменному пучку. Однако неизвестно, являлось ли при этом сравнении рассматриваемое положение катода на периферии оптимальным. В частности, в работе [108] отчетливо видно обратное: вокруг двигателя при периферийном положении К-К наблюдается интенсивное фиолетовое свечение (см. рис. 56).

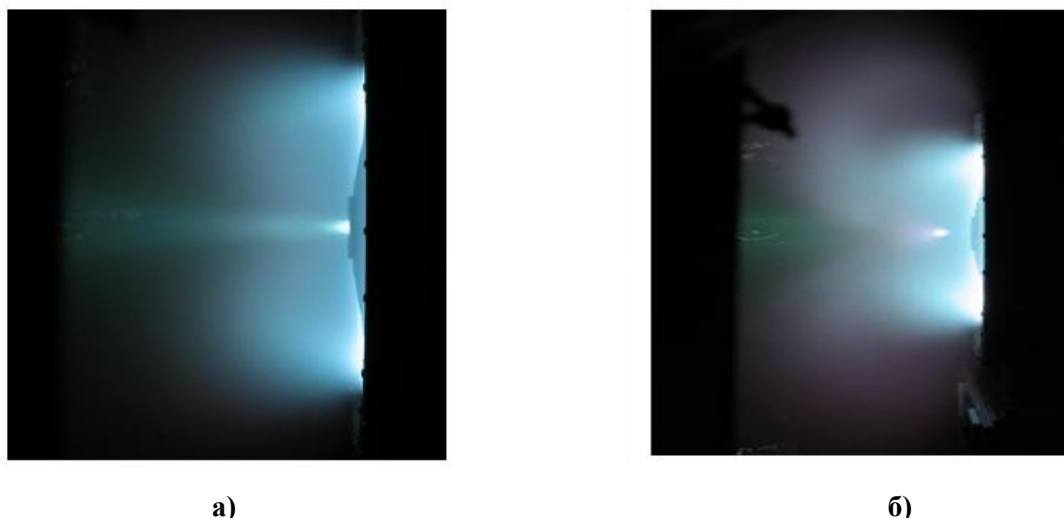


Рис. 56 Общий вид работающего двигателя ВНТ-8000 (500 В, 16А, 8кВт) при положении катода: а) – в центре; б) – в периферийной зоне

В настоящее время с центральным размещением катода в стадии разработки ОКБ «Факел» находятся: лабораторная модель типоразмера СПД-140 (см. рис. 57) и гибридный плазменный двигатель Плас-120 (см. рис. 58) [67], разработки университета Мичиган: Н6 (см. рис. 59) [31; 109], разработки Snesta (Франция) PPS-20k ML [110] (см. рис. 60) и др.

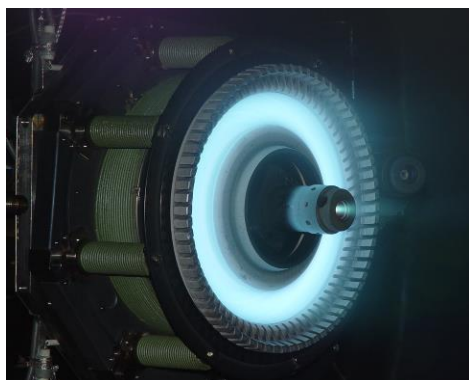


Рис. 57 Общий вид лабораторной модели типа СПД-140



Рис. 58 Общий вид двигателя Плас-120

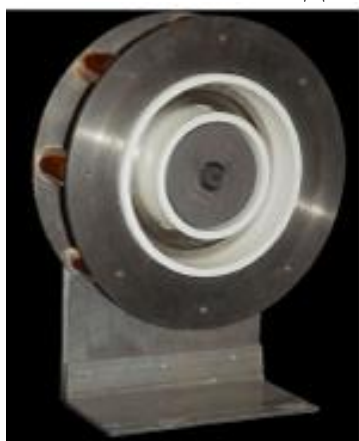


Рис. 59 Общий вид двигателя Н6

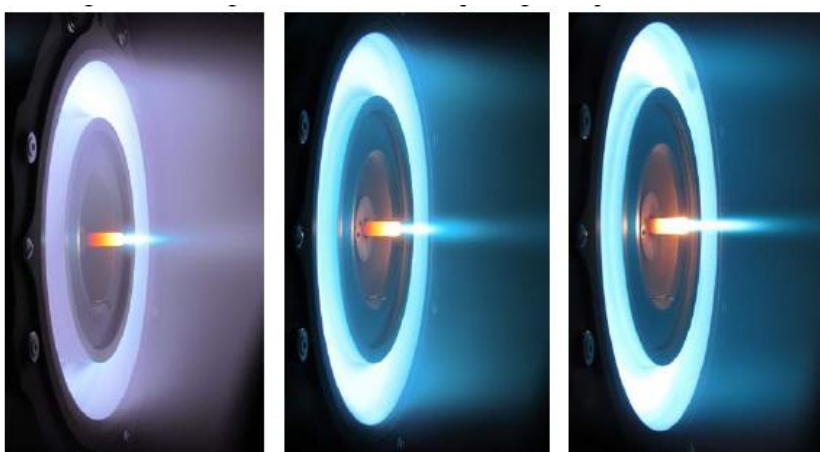


Рис. 60 Общий вид работающего двигателя PPS-20k ML при малой мощности, 15кВт и 23,5 кВт

Положение К-К в центре МС сложно реализовать в СПД малых типоразмеров. Кроме того, ввиду необходимости резервирования катода для повышения надежности СПД, размещение двух катодов в центре не всегда является возможным, поэтому резервный катод устанавливают все же на периферии анодного блока двигателя.

С целью определения критериев оптимального периферийного местоположения К-К относительно АБ, при котором была бы уменьшена эрозия его элементов с сохранением высокой эффективности его работы, были проведены исследования:

- механизма распыления элементов К-К;
- структуры ускоренного ионного потока в зоне размещения К-К;
- влияния параметров магнитного поля в зоне размещения К-К на выходные параметры работы двигателя;
- влияния материала ПЭ на параметры работы двигателя;
- параметров магнитного поля периферийной зоны СПД и факторов, их определяющих;
- влияния параметров поля на работу и ресурс К-К.

3.3 Описание исследуемых лабораторных моделей двигателей

В качестве основы для разработки лабораторных моделей двигателей с различной конфигурацией периферийной зоны магнитного поля в целях проведения необходимых исследований был взят СПД М100. В двигателях этого типа К-К установлены на периферии АБ и в течение длительной наработки подвергаются значительной эрозии. Наблюдается износ торцевой поверхности поджигных электродов (ПЭ). Кроме того, ионный поток, попадая через выходное отверстие, распыляет расположенные внутри тепловые экраны. Продукты распыления, осаждаясь с внутренней стороны ПЭ, могут отслаиваться в виде токопроводящих пластинок, способных закортить ПЭ с катодом, что делает запуск К-К и двигателя невозможным.

В ходе длительных испытаний двигателей типа М100 было выявлено: влияние материала ПЭ на величину эрозионных процессов катодов; наличие паразитного расхода ксенона через неработающий катод, обусловленного перетеканием рабочего газа из магистрали подачи к основному катоду в магистраль питания резервного через анодные дроссельные устройства за счет наличия противотока; наличие электрической связи основного и резервного катодов при объединении электрических цепей ПЭ и собственно катодов; явление азимутальной закрутки ускоренных ионов. При этом было отмечено заметное ускорение темпа разрушения поджигных электродов после 4500 часов работы, когда наружный изолятор укоротился до уровня наружного магнитного полюса. В настоящее время конструкция летных газораспределителей ХФС-100 обеспечивает перекрытие подачи газа в неработающий катод, при этом поджигные электроды и К-К электрически изолированы друг от друга. Кроме того, для снижения эрозии резервного катода и повышения эффективности его использования при длительном ресурсе основной К-К располагается первым в направлении азимутальной закрутки ускоренных ионов, а резервный катод – вторым [27; 111].

Эти меры привели к некоторому снижению эрозионного разрушения, но оказались недостаточными для обеспечения необходимого срока безотказной работы К-К.

Установлено, что ресурс катодов из-за износа поджигных электродов у летных двигателей ограничен временем 10000 часов.

Таким образом, в настоящий момент по-прежнему актуальной является задача повышения эффективности работы катодов М100, которая может быть решена как при изменении местоположения самого К-К относительно АБ, так и при изменении параметров магнитного поля в зоне его размещения.

Для проведения работ по изучению механизма распыления элементов К-К и исследований структуры ионного потока на периферии двигателя М100 использовался двигатель М100, который к началу исследований отработал не менее 2280 ч. У этого двигателя кромка наружной стенки РК выступала над наружным полюсом примерно на 0,5 мм. Торцевые

поверхности поджигных электродов К-К (в особенности основного) подверглись значительной эрозии. У основного катода К1 в верхней части произошло распыление торцевых тепловых экранов и существенно увеличилось отверстие в поджигном электроде, выполненном из титана.

На этот двигатель были установлены два контрольных образца, изготовленных из листового алюминия АМг-3 толщиной 1 мм. Образцы представляли собой две склепанные Г-образные пластины с отверстиями для крепления на наружном полюсе двигателя. Пластины имели анодированное (черное) покрытие из оксида алюминия толщиной 17 мкм. Общий вид

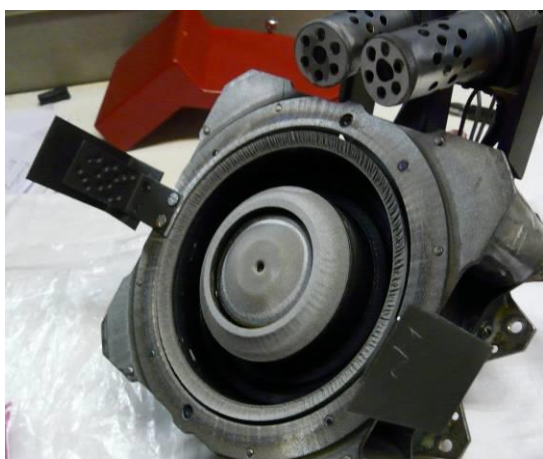


Рис. 61 Двигатель М100 с контрольными образцами для исследований структуры ионного потока на периферии двигателя

двигателя с установленными на нем образцами показан на рисунке 61.

Во внутренней пластине (маске) были выполнены отверстия диаметром 2 мм с фасками. Внешняя пластина была выполнена сплошной и представляла собой экран, на котором при испытаниях проецировались отверстия маски. Расстояние от маски до экрана составляло приблизительно 10 мм. Контрольный образец № 1 имитировал штатное расположение двигателя. Его маска была расположена на расстоянии

приблизительно 21 мм от внутреннего диаметра наружного полюса. Маска контрольного образца № 2 была расположена на расстоянии 31 мм. Образцы были гальванически соединены с корпусом двигателя, который находился под катодным потенциалом.

Для исследований скорости эрозии на двигатель были установлены 2 новых одинаковых контрольных образца с уменьшенной до 4..5 мкм толщиной оксидного покрытия на сплаве АМг-3. Образцы аналогичны приведенным выше, но с тремя параллельными плоскостями, располагающимися на радиусах 79, 89 и 100 мм.

Для оценки влияния формы периферийной зоны на параметры работы двигателя и К-К рассматривались следующие лабораторные модели: конструкция М100 со стандартным квадратным наружным полюсом, конструкция М100 с наружным полюсом от двигателя PPS-1350; одна из лабораторных моделей типоразмера СПД-100 с круглым полюсом, в котором было выполнено отверстие для К-К.

Для проведения ускоренных сравнительных испытаний с целью определения оптимального месторасположения К-К относительно анодного блока и оценки влияния материала поджигного электрода на параметры работы катода и двигателя, помимо основных

катодов К1 и К2 в составе двигателя диаметрально противоположно на разных технологических кронштейнах устанавливались два дополнительных катода К3 с ПЭ из магнитного материала и К4 из титана. Для контроля скорости эрозии на ПЭ всех катодов были установлены контрольные образцы из медной пластины толщиной 0,2 мм, как это показано на рисунке 62, так как медь обладает низкими эрозионными свойствами, в силу чего она и используется при ускоренных испытаниях.



Рис. 62 Двигатель М100 и катоды с контрольными образцами

Контрольные образцы были промаркированы клеймением цифрами от 1 до 4. Перед началом испытаний и по их завершению образцы взвешивались с погрешностью $\pm 0,02$ мг. Крепление образцов на ПЭ выполнялись контрольной проволокой.

Катоды К3 и К4 устанавливались в различные положения, отличающиеся углом наклона φ , радиусом R от продольной оси двигателя, на котором находились выходные

отверстия и высотой h центра выходного отверстия ПЭ над наружным полюсом (см. таблицу 11). Оси катодов К3 и К4 были расположены параллельно на расстоянии 40 мм. Катоды К1 и К2 оставались в штатном положении.

Таблица 11

Условия проведения испытаний

Номер эксперимента	Номер Катода	Материал ПЭ	Положение катодов		
			R, мм	h, мм	φ , град
1	K1	Титан	79	15	45
	K2	Титан			
	K3	Ковар	89	10	20
	K4	Титан			
2	K1	Титан	79	15	45
	K2	Титан			
	K3	Ковар	92	6	20
	K4	Титан			
3	K1	Титан	79	15	45
	K2	Титан			
	K3	Ковар	85	15	30
	K4	Титан			

3.4 Исследование по оптимизации положения катода-компенсатора на периферии анодного блока СПД

3.4.1 Результаты исследования структуры ускоренного потока в зоне размещения катода-компенсатора

Для определения направления ускоренного ионного потока в зоне размещения К-К использовалась описанная выше модель М100 с двумя контрольными образцами из листового алюминия АМг-3. Запуск двигателя осуществлялся на номинальном рабочем режиме СПД-100В (4,5А, 300В). Через каждые 4 часа наработки выполнялся контроль состояния контрольных образцов. После испытаний на экранах образцов были обнаружены пятна. Соотнеся отпечатки с соответствующими отверстиями, было определено направление ускоренных потоков плазмы.

Для двух сечений, совпадающих с масками двух контрольных образцов, были определены углы пролета ионов, которые хорошо описываются формулами:

$$- \text{ для } R=79 \text{ мм: } \alpha = 1,5h + 7,8; \quad (3.7)$$

$$- \text{ для } R=89 \text{ мм: } \alpha = 1,3h + 4,2, \quad (3.8)$$

где α - угол над плоскостью полюса в градусах; h - высота над наружным полюсом в мм.

После 16 часов работы двигателя в верхней части маски образца №1 (на высоте ~31 мм от наружного полюса) оксидное покрытие оказалось полностью распылено. Через 20 часов граница распыления опустилась до 25 мм.

Для определения источника ускоренных потоков плазмы были использованы результаты расчетов магнитного поля, создаваемого МС двигателя, проведенных согласно методике, изложенной в главе 2.

На рисунке 63 изображены контуры элементов конструкции двигателя, конфигурация магнитной линзы (области между силовыми линиями, проходящими через максимальное значение индукции $B_{r\max}$ и $0,7 \times B_{r\max}$ по середине УК у среза РК, а так же пунктирными линиями обозначены направления ионных потоков в зоне контрольных образцов.

Видно, что частицы не вылетают непосредственно из зоны основного разряда. Пунктирные линии указывают на область, примыкающую к наружному полюсу и наружной стенке РК, где магнитные силовые линии имеют форму четверти тора.

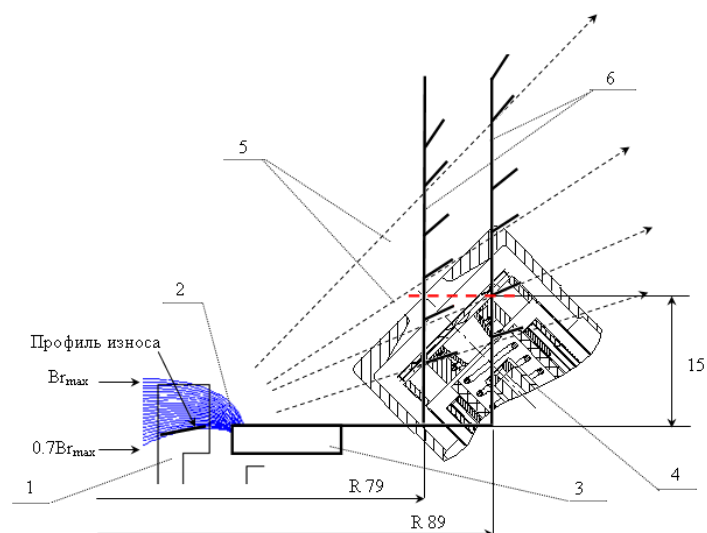


Рис. 63 Структура плазменного потока на периферии анодного блока М100

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

Для осуществления ионизации в этой зоне необходимым является наличие достаточно энергичных электронов ($\sim 12,1$ эВ) и источника нейтральных частиц. Высокоэнергетичные электроны могут появиться только в пределах зоны ускорения (в объеме разрядной камеры). Их проникновение в эту зону возможно только после износа наружного изолятора. Возможно, именно по этой причине эрозия катода и интенсифицируется только после большой наработки двигателя, что и было отмечено в работе [27], где заметное ускорение темпа разрушения поджигных электродов происходило именно после времени 4500 часов работы, когда наружный изолятор укорачивался до уровня наружного магнитного полюса (см. рис. 64). При этом основной катод разрушался быстрее резервного в 1,5...2 раза.

Появление нейтральных атомов может быть связано с рекомбинацией плазмы на стенке РК (на пояске эрозии) обратным потоком атомов ксенона из объема вакуумной камеры и попаданием части катодного расхода. Первый механизм является неотъемлемой частью рабочего процесса. Второй связан с условиями испытаний (ограниченной быстротой откачки стендовых вакуумных систем). Третий зависит от ориентации катода.

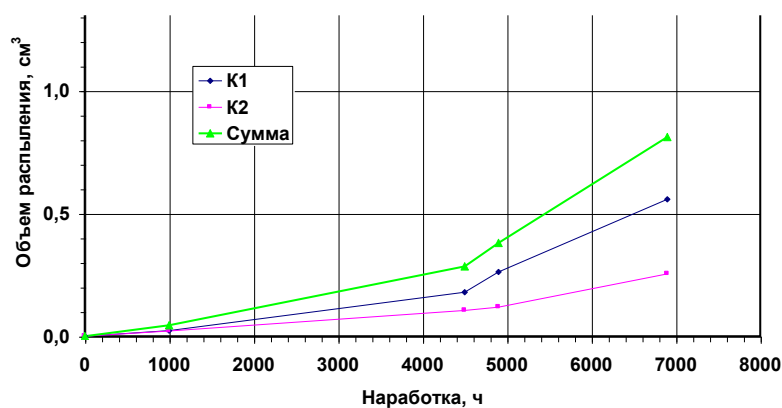


Рис. 64 Распыление ПЭ К-К М-100 при длительных испытаниях

3.4.2 Результаты исследования скорости эрозии контрольных образцов в зоне размещения катода-компенсатора

Для оценки скорости эрозии контрольных образцов в зоне размещения К-К использовались 2 новых одинаковых контрольных образца с толщиной оксидного покрытия (4 – 5) мкм, имеющих уже три параллельные плоскости (подробнее см. п.3.3). Необходимо было определить положение границы распыления оксидного покрытия на плоскостях контрольных образцов после работы двигателя длительностью 2, 6, 10, 14 и 18 ч. Положение границы распыления анодированного покрытия (усредненное для двух контрольных образцов) приведено в таблице 12, где за начало отсчета в осевом направлении принята плоскость наружного магнитного полюса, в радиальном – ось двигателя.

Таблица 12

Положение границы распыления покрытия

Длительность работы двигателя, ч	Граница распыления покрытия на различных радиусах, мм		
	R=79 мм	R=89 мм	R=100 мм
2	17,5	33	
6	13,5	24	37
10	9	20	32
14	8	17	30
18	8	16	27

Скорость распыления оксида алюминия в привязке к координатам была рассчитана по формуле:

$$V_p = \frac{H_{II}}{t}, \quad (3.9)$$

где V_p – линейная скорость распыления, мкм/ч; H_{II} – толщина покрытия, равная примерно 4,5 мкм; t – длительность работы двигателя, ч.

Оказалось, что зависимость скорости эрозии коррелирует с функцией экспоненциального вида (см. рисунок 65). Очевидно, чем ближе к наружному полюсу и дальше от оси двигателя, тем распыление будет меньше.

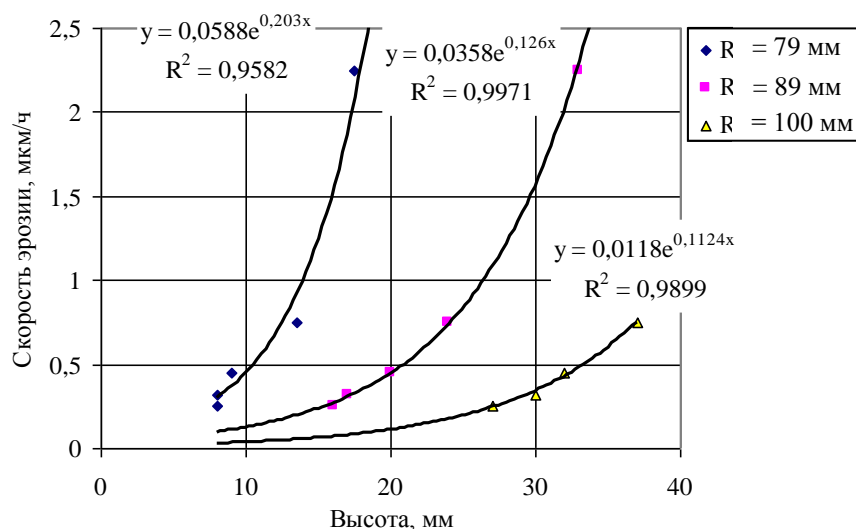


Рис. 65 Зависимость скорости распыления анодированного покрытия

Функции, представленные на рисунке 65, характеризуют абсолютную величину скорости эрозии оксида алюминия V_p :

$$- \text{ для } R=79 \text{ мм: } V_p = 0,0588e^{0,203h}; \quad (3.10)$$

$$- \text{ для } R=89 \text{ мм: } V_p = 0,0358e^{0,126h}. \quad (3.11)$$

Формулы (3.8), (3.9), (3.10) и (3.11) дают полное описание структуры эрозии на двух радиусах (в окрестности расположения катодов). Можно сделать вывод, что для M100 наблюдается снижение эрозионного разрушения при приближении к наружному магнитному полюсу и удалении от продольной оси двигателя.

3.4.3 Оценка конфигурации магнитного поля в месте размещения катода-компенсатора.

Исследования влияния материала поджигного электрода на работу катода-компенсатора

Определение влияния конфигурации магнитного поля в месте размещения К-К на рабочие параметры двигателя проводилось при испытаниях одной из лабораторных моделей типоразмера СПД-100 как с квадратным, так и с круглыми наружными магнитными полюсами.

На первом этапе объектом исследования являлась модель с квадратным наружным полюсом. Рассматривались положения К-К относительно АБ, обоснованно выбранные по результатам расчета магнитного поля трехмерной модели МС. Координаты рассматриваемых положений К-К показаны на рисунке 66.

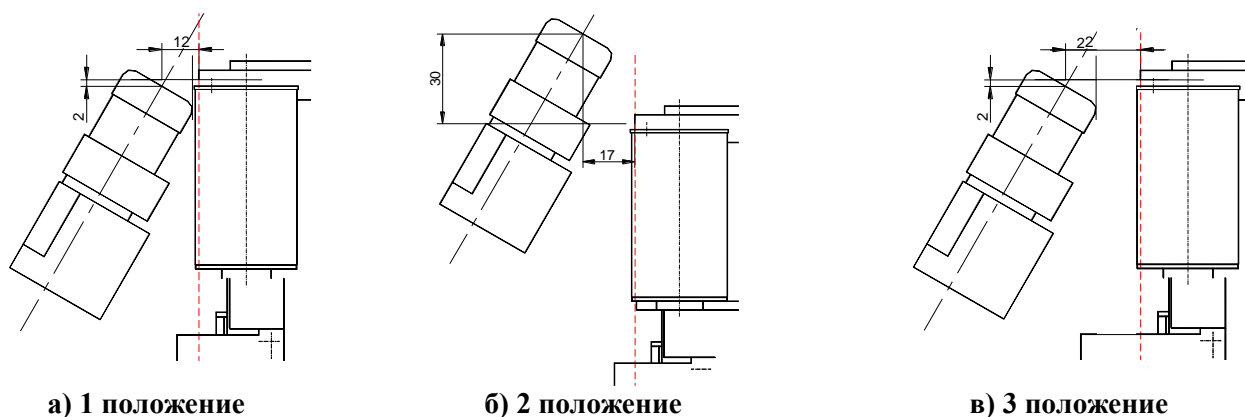


Рис. 66 Варианты размещения К-К относительно анодного блока СПД-100М

На рисунке 67 приведена расчетная векторная топология магнитного поля периферии двигателя, пунктиром отмечена граница раздела рабочей и периферийной зон поля. Следует отметить, что местоположение границы раздела периферийной и рабочей зон в сечении двигателя, взятом в плоскости наружных катушек и в сечении между наружными катушками значительно отличается. В первом случае она располагается ближе к центру магнитного наружного полюса и проходит под углом приблизительно в 80° к плоскости полюса, а во втором случае граница смещается к внешнему краю полюса и наклонена к его плоскости уже под углом приблизительно 45° . Для наглядности на рисунке так же схематично показаны первые два положения К-К. В третьем положении катод был смещен в сторону относительно первого на 10 мм.

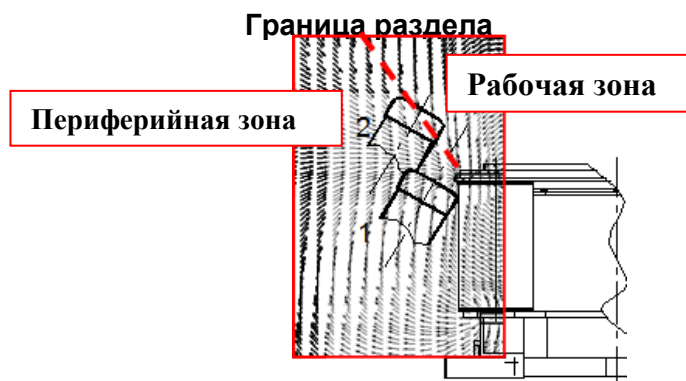


Рис. 67 Топология магнитного поля на периферии СПД

Таким образом, в 1-м и 3-м положениях катод был установлен в периферийной зоне поля, а во 2-м – в рабочей. Во всех случаях ось катода был наклонена к оси двигателя под углом 30° .

Эксперименты проводились при напряжении разряда U_p 300 В и разрядном токе I_p 4,5 А и 2,6 А на одном из стендов ОКБ «Факел» (см. п.4.2).

Расход ксенона составлял: в К-К 0,2 мг/с в анод $\sim 4,3$ м/с и $\sim 2,43$ мг/с. Перед началом каждого этапа выполнялась приработка на режиме 300 В при 4,5 А. Длительность приработки составляла не менее 30 мин. Во время приработки осуществлялась оптимизация магнитного поля. При проведении испытаний измерялись тяговые и удельные параметры двигателя и

напряжение в цепи «катод-земля» ($U_{кз}$), характеризующее оптимальность рабочего процесса в К-К.

На рисунке 68 представлены полученные результаты: значения $U_{кз}$ и КПД двигателя (а)), тяги и удельного импульса (б)) в зависимости от положения катода, а на рисунках 69 и 70 - внешний вид работающего двигателя в первом и втором положениях К-К соответственно.

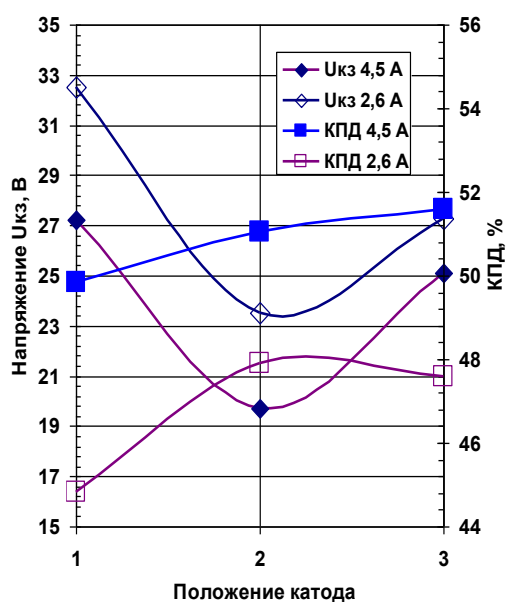
При первом положении К-К (см. рис. 69) при работе двигателя наблюдалось фиолетовое свечение по всему объему вакуумной камеры, кроме плазменной струи. Особенно интенсивным свечение было в задней полусфере в непосредственной близости от двигателя.

При выбранных токах в магнитных катушках величина $U_{кз}$ составила 27,2 В для режима 300 В при 4,5 А, и 37,5 В для режима 300 В при 2,6 А.

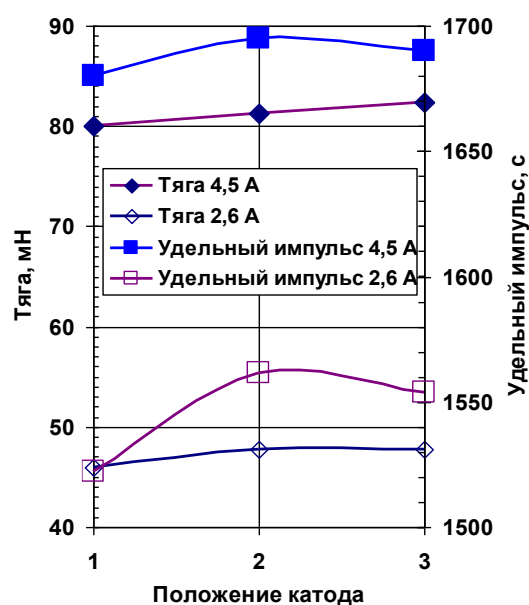
При оптимизации магнитного поля путем увеличения тока в наружных катушках в диапазоне 6,0..8,0 А при постоянном токе во внутренней катушке, величина $U_{кз}$ менялась от 31,5 В при 6,0 А до 39,0 В при токе 8,0 А. Влияние внутренней катушки на $U_{кз}$ было значительно слабее – при изменении тока в ней от 3,0 до 2,0 А величина $U_{кз}$ менялась в диапазоне 35,2..37,5 В.

Во втором положении катода фиолетового свечения не наблюдалось. Величина параметра $U_{кз}$ оказалась ниже примерно на 30% величины в 1-м положении и составила 19..23,5 В. При этом КПД двигателя оказался выше на 1..3 % в зависимости от режима работы.

Из рисунка 68 видно, что с точки зрения получения максимального значения КПД при близких к минимальным значениям $U_{кз}$ преимуществом действительно обладает именно положение 2 К-К в рабочей зоне магнитного поля, что согласуется и с результатами исследований, приведенных в п.4.1. Однако этот вариант не выдерживает критики с точки зрения ресурса как К-К, так и двигателя в целом. Как уже упоминалось, вынесение катода вперед от внешнего торца наружного полюса может привести к быстрому разрушению конструкции катода под действием истекающего из двигателя потока плазмы.



а)



б)

Рис. 68 Результаты испытаний по оптимизации местоположения К-К (по оси X – номера вариантов)



Рис.69 Внешний вид двигателя при работе на К-К в положении 1 (режим 300 В, 4,5 А)



Рис. 70 Внешний вид двигателя при работе на К-К в положении 2 (режим 300 В, 4,5 А)

При работе катода в третьем положении, так же как и при первом, по всему объему вакуумной камеры наблюдалось фиолетовое свечение, кроме плазменной струи. Однако влияние магнитного поля на величину U_{K3} было несколько меньшим. При изменении тока в катушках намагничивания в диапазоне 6,5..8,0 А U_{K3} менялась от 29,2 В при 6,5 А до 33,0 В при токе 8,0 А. Что связано, возможно, с величиной магнитной индукции в зоне размещения К-К.

Учитывая, что поджигные электроды К-К могут быть изготовлены как из немагнитного, так и магнитного материала, были проведены дополнительные исследования, направленные на изучение влияния материала ПЭ на работу К-К.

Были разработаны трехмерные расчетные модели МС типоразмера СПД-100 с учетом материалов ПЭ К-К согласно методике, изложенной в главе 2. Расчет был выполнен для токов в катушках намагничивания 4,5 А. На рисунке 71 представлены результаты расчета векторной топологии магнитного поля, взятые в сечении посередине К-К. Также показаны контуры

наружного магнитного полюса и ПЭ К-К, а пунктирной линией отмечена граница раздела рабочей и периферийной зоны поля.

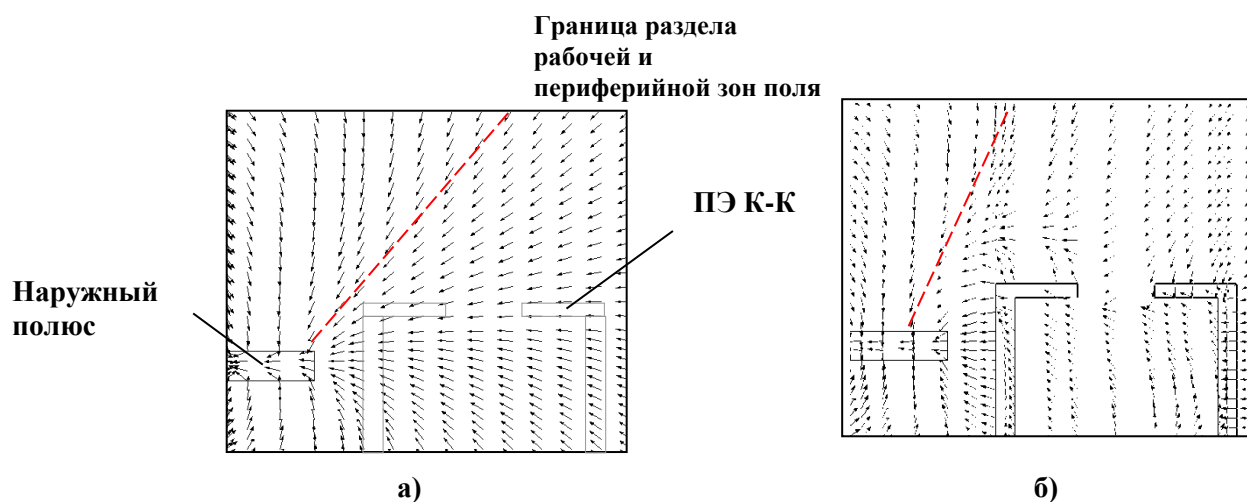


Рис. 71 - Топология магнитного поля при использовании катодов

а) – с немагнитным ПЭ, б) – с магнитным ПЭ

Из рисунка 71 б) видно, что при установке в СПД катода с ПЭ, выполненного из магнитного материала, магнитное поле в его окрестности трансформируется. Конфигурация поля становится более способствующей транспортировке электронов в струю плазмы, а индукции магнитного поля в зоне отверстия в ПЭ близкой к нулевой. Для оценки влияния материала ПЭ на работу К-К на катод, установленный в положение 1, был надет кожух из магнитомягкого материала. Этот вариант условно обозначим как положение 4. Испытания так же были проведены для режимов 300 В 4,5 А и 300 В 2,6 А. Полученные результаты испытаний представлены на рисунках 72.

После того, как на катод был надет кожух из магнитомягкого материала, фиолетовое свечение при проведении испытаний исчезло. В передней полусфере двигателя, незначительно превышая его геометрические размеры, наблюдалось плотное голубое свечение толщиной примерно 100 мм. При этом, как видно из рисунка 72, величина $U_{КЗ}$ снизилась на 7..19 % при одновременном увеличении КПД от 3 до 6 % в зависимости от режима работы. Величины полученного удельного импульса и тяги двигателя, а, следовательно, и КПД, оказались даже выше значений, полученных при втором положении К-К в рабочей зоне магнитного поля. При оптимизации токов в катушках намагничивания двигателя в ходе испытаний с использованием К-К с магнитным материалом ПЭ было отмечено, что увеличение тока в наружных катушках намагничивания МС приводит, напротив, к некоторому снижению величины $U_{КЗ}$. При постоянном токе во внутренней катушке 1,8 А, при изменении тока в наружных катушках в

диапазоне 3,5..6,5 А величина $U_{КЗ}$ менялась от 24,3 В при 3,5 А до 21,0 В при токе 6,5 А.

Влияние внутренней катушки на $U_{КЗ}$ было практически не заметно.

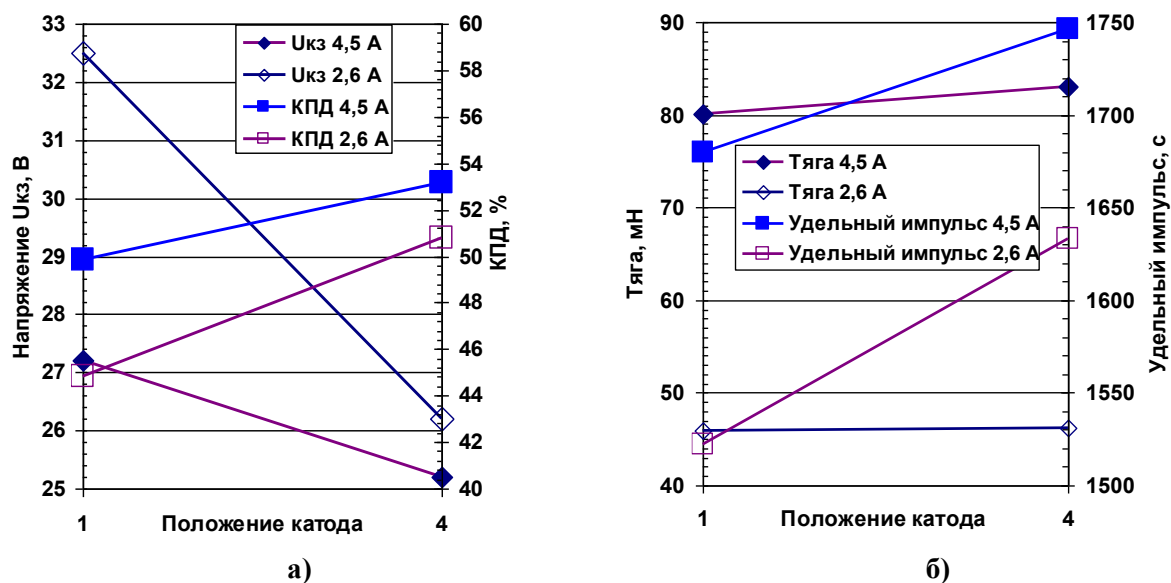


Рис. 72 Результаты испытаний по оптимизации места расположения катодов-компенсаторов (по оси X – номера вариантов)

Для анализа данного эффекта было смоделировано магнитное поле двигателя для случая К-К с магнитным ПЭ при разных токах в катушках намагничивания. Полученные результаты представлены на рисунках 73 и 74.

Оказалось, что в случае магнитного ПЭ увеличение тока в наружных катушках приводит к созданию еще более содействующей продвижению электронов в направлении анода конфигурации поля в зоне ПЭ.

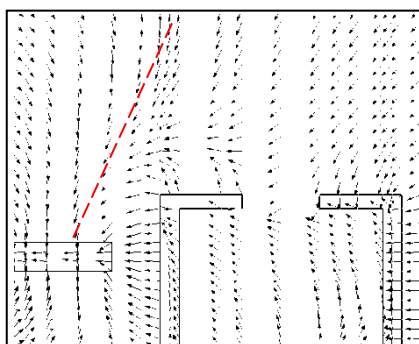


Рис. 73 Топология магнитного поля М100 с К-К с магнитным ПЭ (базовый вариант)

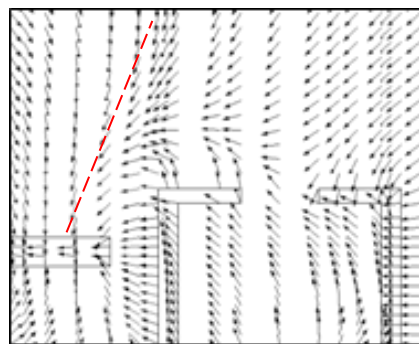


Рис. 74 Топология магнитного поля М100 с К-К с магнитным ПЭ с увеличенным током в наружных катушках

Учитывая приведенные результаты, необходимо оценить и влияние материала ПЭ при работе К-К на повышенных разрядных напряжениях. Для положений катода 1 и 4 были проведены испытания с увеличением разрядного напряжения от 300 В до 750 В.

На рисунке 75 представлены полученные зависимости U_{K3} для К-К с магнитным и немагнитным поджигным электродами. С ростом разрядного напряжения параметр U_{K3} для К-К с магнитным ПЭ изменился с 24 В до 27 В, в то время как для К-К с немагнитным ПЭ более существенно – с 27 В до 38 В.

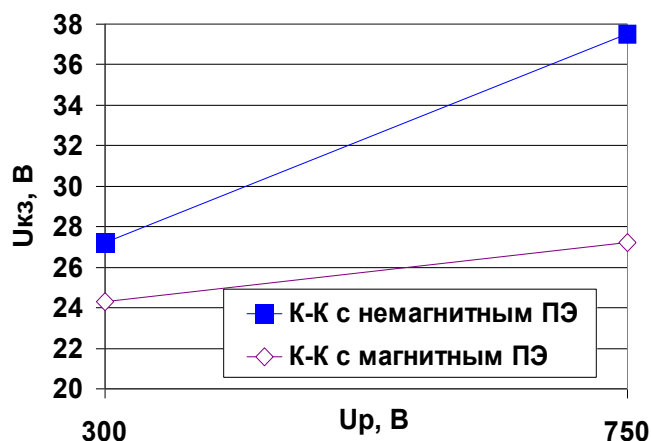


Рис. 75 Зависимость параметра U_{K3} от разрядного напряжения и материала ПЭ К-К

На втором этапе испытаний исследовалась модель с круглым наружным полюсом. В качестве объекта испытаний выбран штатный двигатель СПД-100В. На него был установлен круглый наружный полюс, изготовленным в виде кольца шириной 38,5 мм с отверстием диаметром 27,5 мм для К-К. При этом исследовались влияния на работу двигателя двух положений катодов: К1 – штатный с титановым поджигным электродом был установлен вдалеке, в рабочей зоне магнитного поля (положение 1), и К2 – технологический в отверстии полюса (положение 2).

Испытания двигателя при двух положениях катодов проводились при прочих равных условиях: в режиме 300 В и 4,5 А с расходом ксенона в К-К 0,35 мг/с и в анод ~ 4,73 мг/с.

Работа СПД с боковым расположением катода-компансатора и с катодом-компансатором, размещенным в наружном полюсе, показана на рисунках 76 и 77 соответственно.

При положении катода в полюсе было отмечено повышение эффективности работы двигателя на примерно 2,8 % при увеличении удельного импульса на 57 с, что примерно на 3,6 % выше. U_{K3} в обоих случаях не превышало 20 В.

Таким образом, на параметры работы двигателя влияет не только конфигурация магнитного поля в зоне размещения катода, но и его величина, а так же факторы, их определяющие.

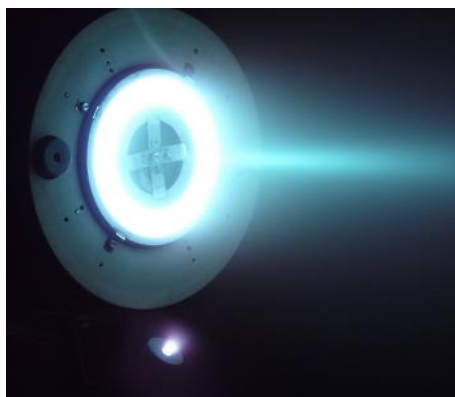


Рис. 76 Внешний вид двигателя при боковом положении К-К (режим 300 В, 4,5 А)

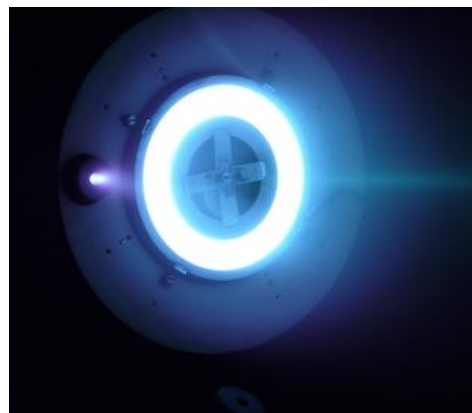


Рис. 77 Внешний вид двигателя при положении катода в отверстии наружного магнитного полюса (режим 300 В, 4,5 А)

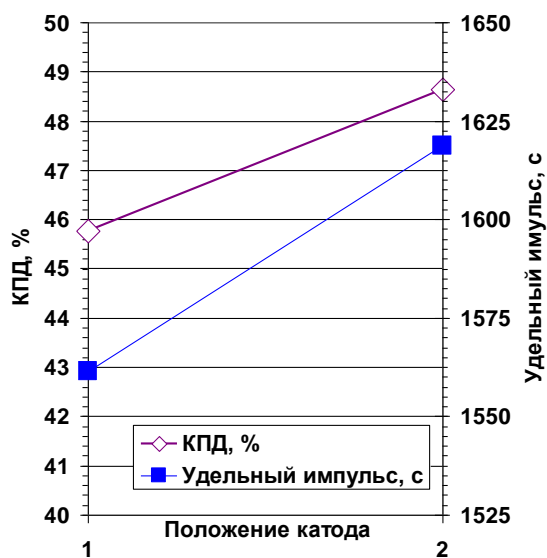


Рис. 78 Результаты испытаний по оптимизации места расположения катодов-компенсаторов (по оси X – номера вариантов)

3.4.4 Исследование влияния величины магнитного поля в месте размещения катода-компенсатора на эффективность его работы

С целью уточнения степени влияния величины магнитной индукции в зоне размещения К-К на эффективность его работы было проведено дополнительное исследование, объектом которого также являлся двигатель СПД-100 с штатным квадратным наружным полюсом [112].

При проведении экспериментов работающий катод перемещался вдоль продольной оси двигателя при помощи координатного устройства, имеющего электрический привод перемещения и датчик контроля координат.

Схема расположения К-К относительно анодного блока показана на рисунке 79. Было рассмотрено два положения К-К. В первом положении ось катода была наклонена к оси двигателя под углом 45° (положение А), во втором (положение В) – под углом 60° . Все эксперименты проводились при напряжении разряда $U_p = 300$ В. Расход в анод двигателя составлял 4,6 мг/с. Расход в катод поддерживался на уровне 0,4 мг/с.

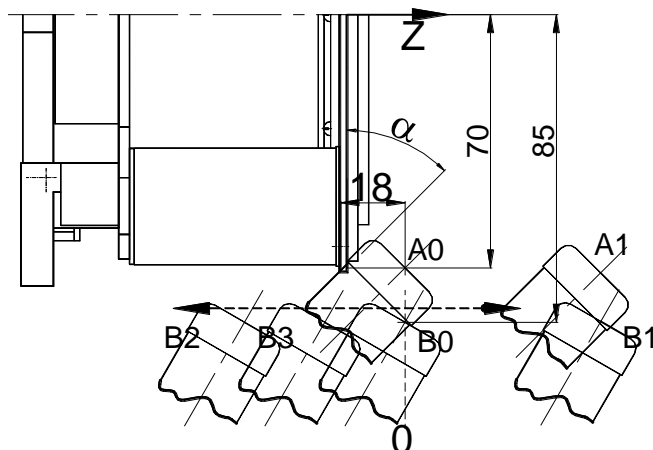


Рис. 79 Схема расположения и перемещений катода

Электрическое питание катушек магнитной системы осуществлялось от автономных источников и устанавливалось оптимальным по критерию минимума разрядного тока. Кроме того, при проведении экспериментов в положении В оценивалось влияние изменения величины тока в катушках намагничивания в диапазоне 4,9...5,5 А на параметры работы двигателя.

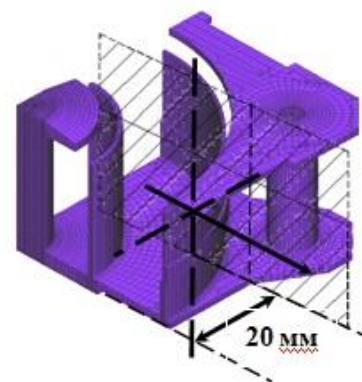
В обоих положениях выходное отверстие поджигного электрода катода было расположено на расстоянии 18 мм от наружного полюса МС. В положении А катод двигался в осевом направлении на расстоянии 70 мм от продольной оси. Исходное положение катода на схеме обозначено как А0. Наибольшее расстояние от исходного положения вдоль оси двигателя по ходу струи (положение А1) – 57 мм. В положении В катод находился на расстоянии 85 мм от продольной оси. Исходное положение катода на схеме обозначено как В0. Наибольшее расстояние от исходного положения вдоль оси двигателя по ходу струи (положение В1) – 57 мм.

В противоположном направлении от исходного положения катод перемещался до 60 мм (положение В2).

Для определения параметров магнитного поля в месте размещения К-К автором была разработана по приведенной в главе 2 методике трехмерная расчетная модель четверти (в связи с симметрией конструкции) магнитной системы СПД-100, которая представлена на рисунке 80. В данном случае нельзя выполнять расчет с использованием упрощенной осесимметричной схемы МС в связи со значительным влиянием четырех наружных катушек и формы наружного полюса на конфигурацию силовых линий в периферии двигателя.

На рисунке 80 показана также плоскость, в которой перемещался катод при проведении исследований, расположенная на расстоянии 20 мм от оси МС.

Расчет магнитного поля проводился с использованием методики, представленной в главе 2. Верификация расчетной модели показала достаточно хорошую согласованность полученных расчетных и экспериментальных результатов.



В исследованной области перемещений катода были рассчитаны: значения осевой B_z и радиальной B_r компонент вектора магнитной индукции в области перемещений катода; значение магнитной индукции $|\vec{B}|$; конфигурация силовых линий магнитного поля. При расчете значения токов в магнитных катушках задавались равными значениям, полученным при проведении экспериментов на работающем двигателе.

По результатам расчета компонент магнитной индукции были найдены абсолютные значения углов наклона силовых линий магнитного поля к продольной оси двигателя, характеризующие конфигурацию силовых линий. Кроме того, определена граница раздела рабочей и периферийной зон магнитного поля. Результаты расчетов и экспериментов по перемещению катода в положении А показаны на рисунке 81. В этом положении катода область его перемещений не выходила за границы рабочей зоны магнитного поля.

Как можно видеть из представленных результатов, значения $U_{кз}$ монотонно уменьшаются по мере удаления катода от наружного полюса двигателя с 20 В в исходном положении до ~ 12 В в его наиболее удаленном от полюса положении. Таким образом, хотя катод и находится в рабочей зоне магнитного поля, величина $U_{кз}$ растет с ростом магнитной индукции при приближении катода к наружному полюсу двигателя. Аналогичным образом

изменяются также и значения магнитной индукции $|\vec{B}|$, т.е. между этими двумя параметрами возможна корреляционная связь. Разрядный ток по мере приближения катода к наружному полюсу сначала уменьшается, а затем увеличивается.

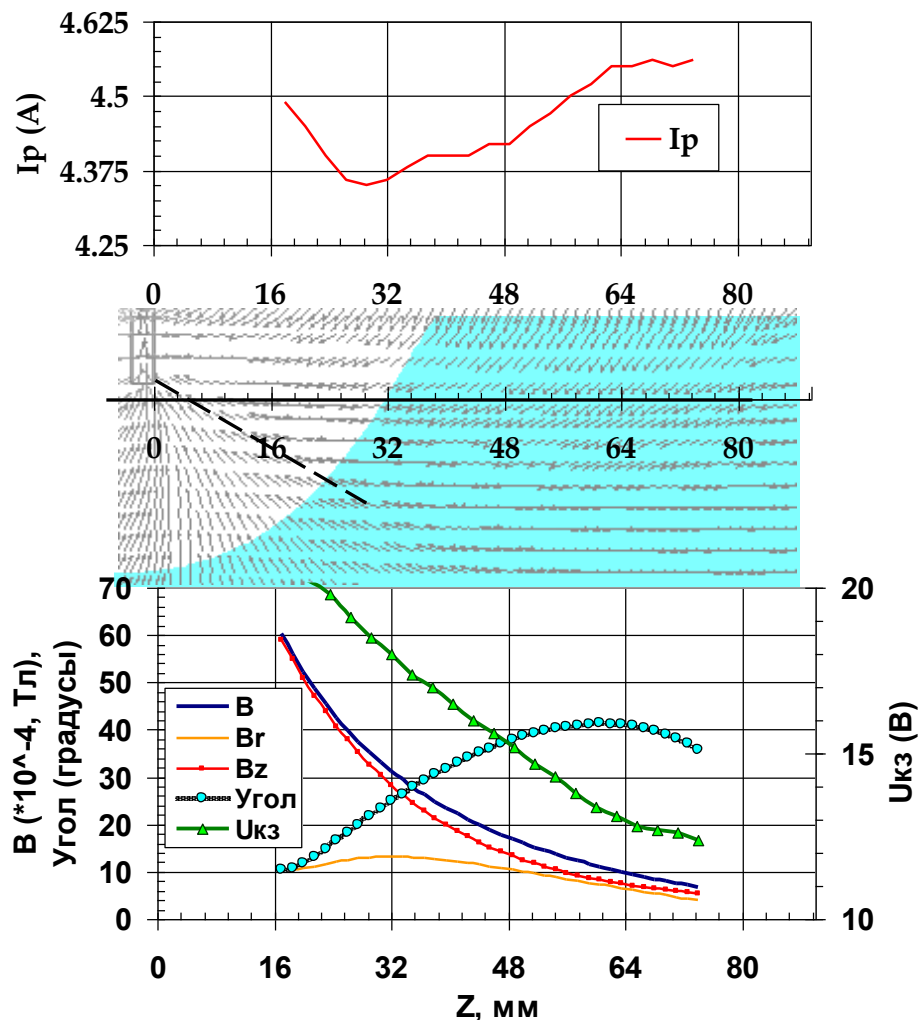


Рис. 81 Результаты исследований в положении А

Результаты расчетов и экспериментов при перемещении катода в положении В показаны на рисунках 82 и 83. При экспериментах в этом положении катод находился как в рабочей, так и в периферийной зонах магнитного поля. По мере перемещения от точки с максимальным удалением в направлении, противоположном направлению истекающей из двигателя струи плазмы, $U_{кз}$ сначала увеличивается, а затем уменьшается.

Максимум $U_{кз}$ находится в плоскости расположения наружного полюса. В этой же области наблюдается и максимум индукции магнитного поля. Отметим, что в обоих случаях при перемещении катода в области в противоположном к выходной части двигателя

направлении на монотонно возрастающей кривой U_{K3} наблюдается выброс, выражающийся в уменьшении U_{K3} на 1..2 В.

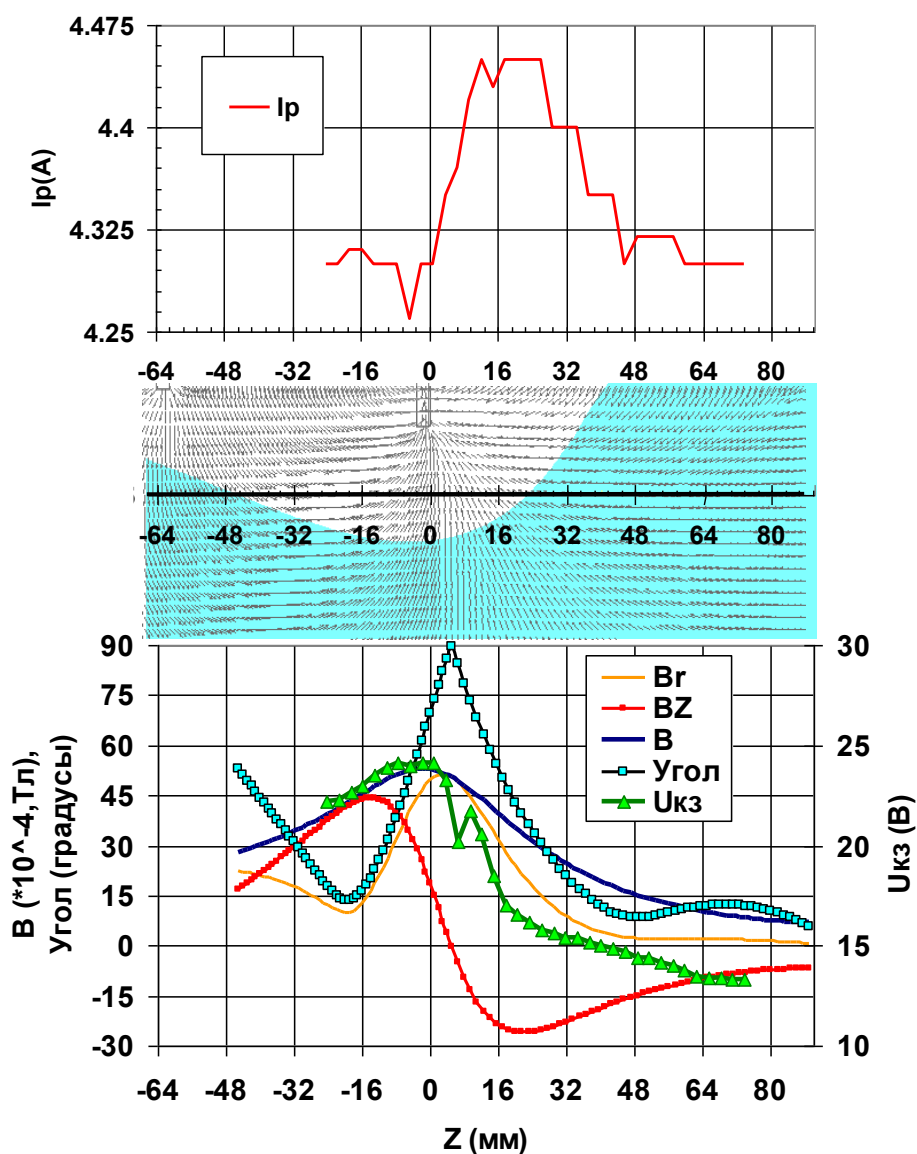


Рис. 82 Результаты исследований при перемещении катода в положении В при токе в катушках намагничивания 4,9 А

Сопоставление места расположения этого выброса с характером изменения кривой, описывающей изменение угла наклона силовых линий, показывает, что координаты места регистрации выброса совпадают с координатами точки, в которой силовые линии магнитного поля перпендикулярны оси двигателя, т.е. природа выброса связана с топологией магнитного поля в этой точке. Силовые линии имеют практически радиальное направление, в связи с чем создаются благоприятные условия для продвижения электронов к ускорительному каналу.

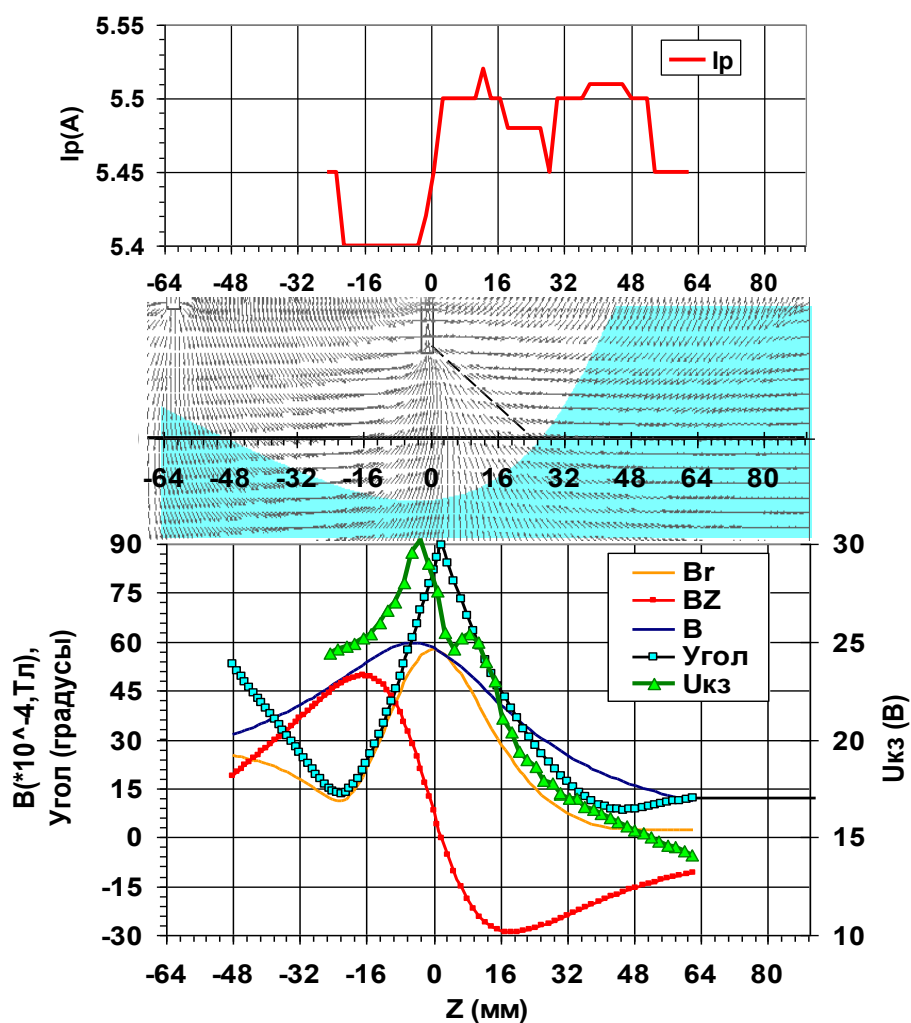


Рис. 83 Результаты исследований при перемещении катода в положении В при токе в катушках намагничивания 5,5А

Изменения, наблюдаемые на зависимостях величины тока разряда от места расположения К-К, однозначно могут быть связаны с положением К-К относительно наружного полюса – момент начала нарастания тока разряда при движении вдоль струи совпадает с моментом выхода оси выходного отверстия катода за плоскость наружного полюса. Это положение катода обозначено на рисунке 79 как положение В3. В этом положении катода выходящий из него ксенон начинает попадать в рабочую зону двигателя. Часть попадающего в рабочую зону ксенона может ионизоваться, что и приводит к увеличению тока разряда. В осевом направлении область влияния катодного расхода не превышает 50 мм.

Следует отметить влияние на разрядный ток угла наклона оси катода к оси двигателя – в положении В (угол 60°) оно больше, чем в положении А (угол 45°). Это можно объяснить тем, что в положении В количество атомов ксенона, поступающих из катода в рабочую зону, имеет направление к оси двигателя.

Исходя из полученных зависимостей изменения U_{K3} от индукции магнитного поля $|\vec{B}|$, была сделана попытка обобщения полученных результатов для нахождения количественной

зависимости $U_{КЗ}$ от индукции магнитного поля в периферийной зоне двигателя. С этой целью все полученные результаты сведены в один график, представленный на рисунке 84.

Несмотря на то, что при построения этого графика использованы результаты экспериментов при различном расположении катода относительно оси АБ, а также при различных режимах работы двигателя и токах в магнитных катушках, все они имеют одну и ту же зависимость – при нарастании индукции магнитного поля растет и величина $U_{КЗ}$. В области значений магнитной индукции до 3,5-4,0 мТл зависимость между $U_{КЗ}$ от магнитной индукции $|\vec{B}|$ близка к линейной: при приращении магнитной индукции на 0,1 мТл, напряжение $U_{КЗ}$ возрастает на 0,18...0,20 В. При этом для всех исследованных случаев $U_{КЗ}$ меньше 20 В при магнитной индукции $|\vec{B}| \leq 3$ мТл.

На рисунках 81-83 области, в которых магнитная индукция не превышает 3 мТл, выделены голубым цветом.

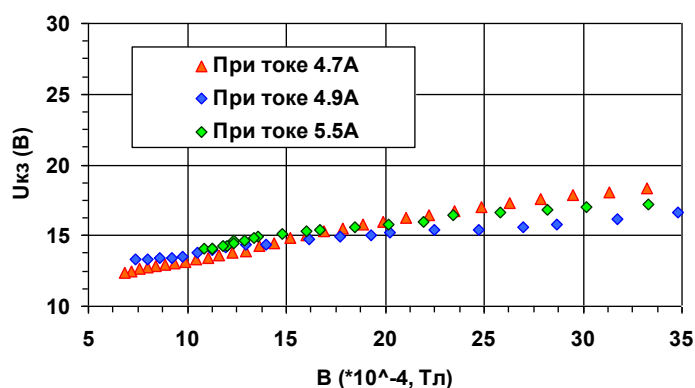


Рис. 84 Зависимость $U_{КЗ}$ от индукции магнитного поля в месте расположения катода с учетом изменения тока в катушках намагничивания

Полученные в ходе проведенных исследований результаты могут быть использованы для выбора места установки катодов при создании новых конструкций двигателей. Предварительно это место может быть определено после разработки расчетных моделей магнитных систем двигателей и определения границ областей с магнитной индукцией $|\vec{B}| \geq 3$ мТл. Катод должен располагаться вне этих границ, и его место установки будет определяться уже критериями обеспечения его ресурсных характеристик. Предварительно выбранное место установки катода следует впоследствии уточнить в процессе огневых испытаний двигателей.

Таким образом, анализ результатов экспериментов и расчетов параметров $U_{КЗ}$ магнитного поля позволил не только выявить влияние конфигурации магнитного поля на, но и уточнить количественные соотношения между величиной индукции магнитного поля и $U_{КЗ}$ –

при увеличении индукции на 0,1 мТл, напряжение U_{K3} возрастает на 0,18...0,20 В. При этом следует отметить, что полученные данные достаточно хорошо согласуются с данными полученными Р. Хофером для двигателя NASA-173, для которого уменьшение индукции магнитного поля приводит к уменьшению U_{K3} с темпом 1...2 В/мТл [23].

Проведенное исследование не является полным, так как были измерены только U_{K3} и I_p , однако в дальнейшем планируется более подробный анализ с измерением всех параметров работы двигателя и температуры электронов в струе.

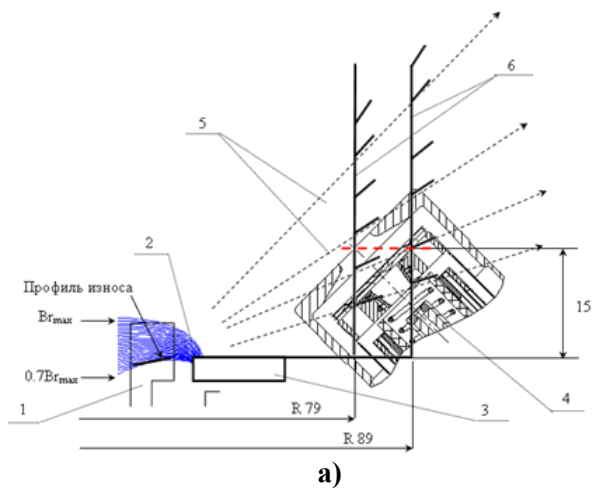
3.4.5 Результаты ускоренных испытаний по оптимизации местоположения катода-компенсатора

По представленным выше результатам исследований определено, что распыление торцевой части поджигного электрода и торцевого теплового экрана К-К в М100 носит закономерный характер и связано с его неоптимальным расположением относительно анодного блока. Поэтому была проведена серия ускоренных сравнительных испытаний с целью оптимизации местоположения К-К М-100 путем изменения места его установки. Методика проведения ускоренных испытаний приведена в п. 3.3 настоящей главы.

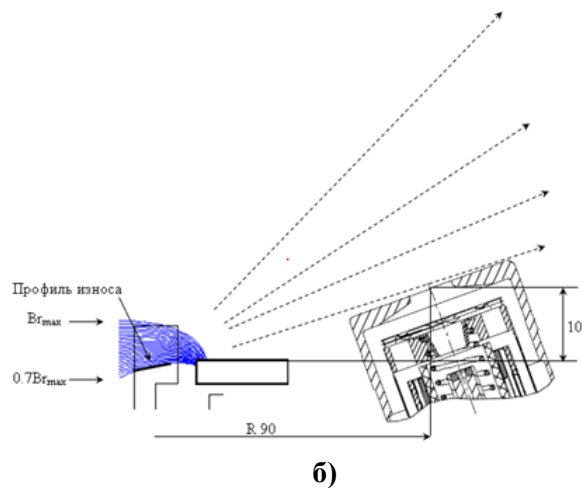
Краткое описание и наглядное изображение положений штатных К1 и К2 (на всех этапах испытаний одинаковое) и выбранных более предпочтительных положений дополнительных К3 с магнитным ПЭ и К4 с немагнитным ПЭ катодов, которые были представлены в таблице 10, наглядно показаны на рисунке 85.

Исследовалось влияние расположения К-К относительно АБ, угла наклона, ориентации, а так же материала ПЭ на скорость его эрозии.

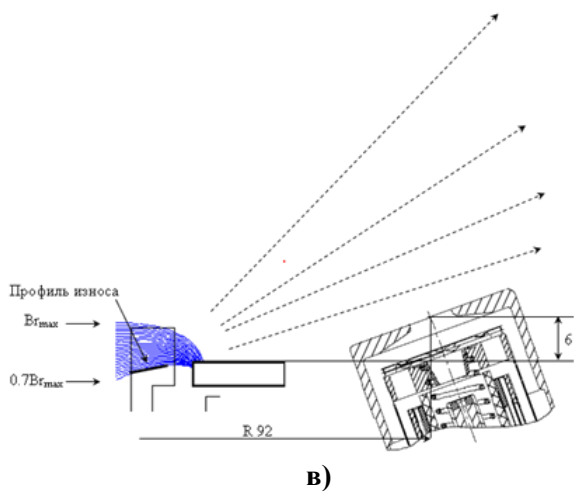
Уменьшение угла наклона катода к оси двигателя должно повлиять на уменьшение площади поверхности ПЭ, подверженной воздействию ускоренного ионного потока, а так же существенно снизить долю катодного расхода, выпадающего на срез РК, что само по себе является благоприятным фактором. Что касается ориентации, то в двигателе М100 оси катодов (К1 и К2) пересекают продольную ось двигателя. Из основного катода истекает ионный ток порядка 1 мА, что соответствует массовому расходу ионизированного ксенона на уровне 0,001 мг/с. То есть практически весь расход ксенона покидает катод в виде нейтральных атомов.



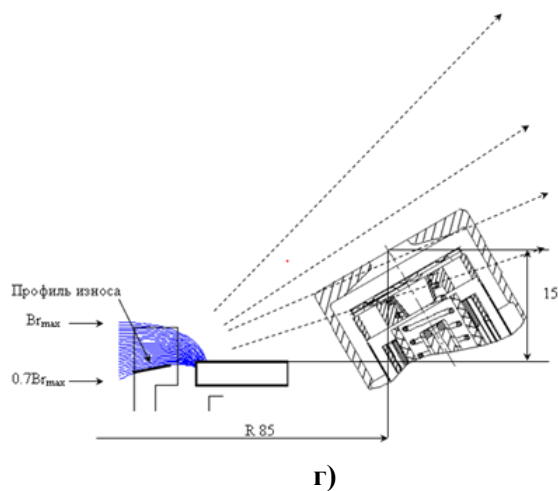
а)
Катоды К1 и К2 - штатное положение: 79 мм от продольной оси и 15 мм от наружного полюса. Угол наклона 45°



б)
1-й этап испытаний Катоды К3 и К4 – 90 мм от продольной оси и 10 мм от наружного полюса. Угол наклона 20°



в)
2-й этап испытаний Катоды К3 и К4 – 92 мм от продольной оси и 6 мм от наружного полюса. Угол наклона 20°



г)
3-й этап испытаний Катоды К3 и К4 – 85 мм от продольной оси и 15 мм от наружного полюса. Угол наклона 30° (положение близкое к положению в PPS-1350)

Рис. 85 Исследованные положения К-К в М100

Предполагается, что при их попадании в область среза РК произойдет ионизация нейтралов с последующим ускорением, при этом не исключено, что часть образовавшихся ионов выпадет на катод, вызвав распыление элементов конструкции. Если же ось катода не будет проходить через ось двигателя, образовавшиеся ионы ускорятся в радиальном

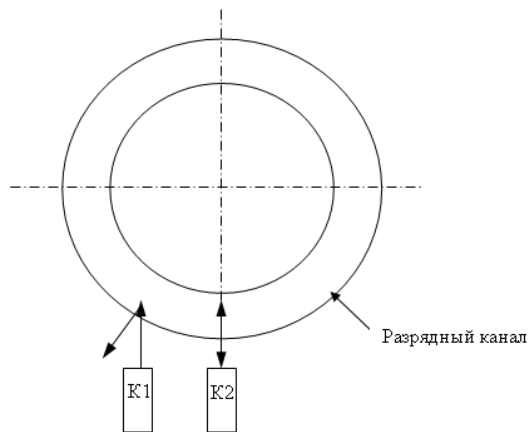


Рис. 86 Влияние ориентации катода на направление эрозионных потоков

направлении, минуя катод (см. рис. 86).

Учитывая, что К-К при установке в новые более предпочтительные с точки зрения ресурса положения относительно АБ М100 могут оказаться в неоптимальных магнитных полях, была так же проведена оценка конфигурации и величины магнитного поля в месте их размещения.

На рисунке 87 представлены результаты расчета векторной топологии и индукции магнитного поля М100 в области планируемых положений катодов. Из рисунка видно, что в штатном положении катод располагается на границе рабочей и периферийной зон поля, а индукция в зоне его размещения составляет приблизительно 4 мТл. Однако в данном случае граница расположена таким образом, что К-К оказывается под воздействием ускоренного ионного потока, что подтверждается его значительным износом. В планируемых для испытаний положениях катод будет располагаться уже в менее оптимальной с точки зрения эффективности К-К периферийной зоне магнитного поля, однако индукция там так же не будет превосходить 4 мТл. Кроме того в положении К-К 1 и 2 силовые линии имеют практически радиальное направление, что по сути благоприятно для продвижения электронов в истекающую из двигателя струю плазмы.

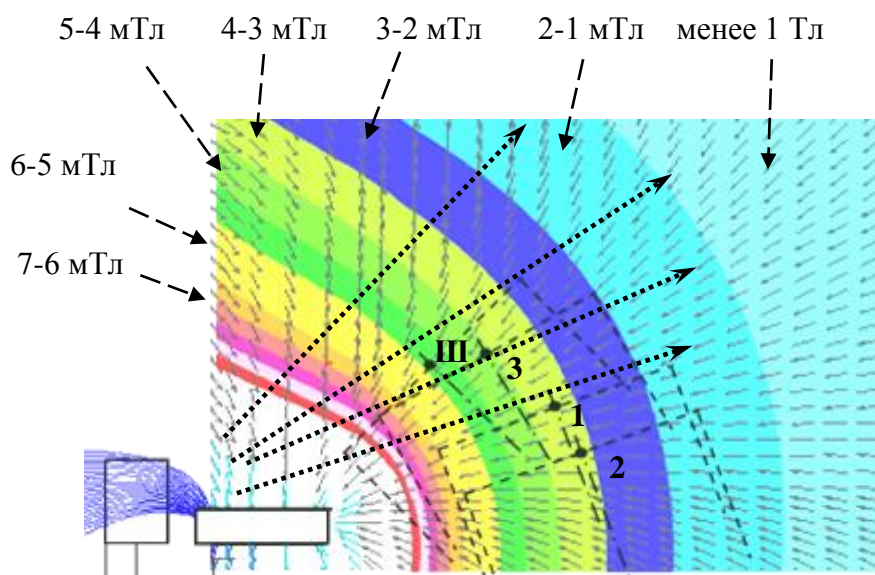


Рис. 87 Векторная топология и величина магнитного поля в зоне размещения катодов:
Ш – штатное положение К-К; **1** – положение на 1-м этапе испытаний;
2 – на 2-м этапе; **3**- на 3-м этапе

Испытания по оптимизации выполнялись на номинальном режиме: 4,5А, 300В. На каждом этапе испытаний наработка катодов К3 и К4 составляла по 10 ч. Отклонений в работе двигателя на всех этапах испытаний выявлено не было. Выходные параметры двигателя при работе на катодах К3 и К4 сопоставимы со штатными параметрами. Параметр $U_{К3}$ при работе на катоде К3 для всех вариантов находился в диапазоне 12,9.. 16,0 В, при работе на К4

14,0...17,8 В, что допустимо. В таблице 13 представлены результаты взвешивания контрольных образцов.

Каких-то особенностей при визуальном осмотре работающего двигателя на первом этапе замечено не было. На всех 4-х образцах были видны следы эрозии. На образцах 1 и 2, установленных на катодах К3 и К4, заметны царапины и следы обработки, а у образцов 3 и 4 на катодах К1 и К2 поверхность гладкая, что свидетельствует о бóльшей эрозии образцов. Из приведенных данных видно, что на 1-м этапе испытаний эрозия образца, установленного на титановом катоде К4, снизилась в 4,2..4,7 раза по сравнению с катодами К1 и К2. Эрозия же образца, установленного на коваровом катоде К3, снизилась в 6,4..7,2 раза по сравнению со штатными катодами. Таким образом, эрозия торца поджигного электрода, изготовленного из магнитного материала, примерно в 1,5 раза меньше, чем у катода из немагнитного материала.

Таблица 13

Результаты взвешивания образцов после проведения трех этапов испытаний

Этап испытаний	Номер катода	Материал	Масса образца, г		Дефект массы	
			Исходная	В конце	г	%
1	К1	Ti	1,12756	1,07391	0,05365	4,76
	К2	Ti	1,11139	1,06343	0,04796	4,32
	К3	Ковар	1,09593	1,0885	0,00743	0,68
	К4	Ti	1,14472	1,13337	0,01135	0,99
2	К1	Ti	1,08850	1,04580	0,04270	3,92
	К2	Ti	1,13337	1,08878	0,04459	3,93
	К3	Ковар	1,07391	1,06526	0,00865	0,81
	К4	Ti	1,06343	1,05501	0,00842	0,79
3	К1	Ti	1,02113	0,97567	0,04546	4,45
	К2	Ti	1,05983	1,01771	0,04212	3,97
	К3	Ковар	1,04326	1,02610	0,01716	1,64
	К4	Ti	1,05287	1,03298	0,01989	1,89

На втором этапе при работе двигателя в его задней полусфере наблюдалось интенсивное фиолетовое свечение, которое свидетельствует о наличии в объеме вакуумной камеры возбужденных нейтральных атомов. На всех 4-х образцах так же были видны следы эрозии. Поверхность образцов 1 и 2, установленных на К1 и К2, оказалась более светлой и блестящей, чем у образцов 3 и 4, что свидетельствует о бóльшей эрозии образцов 1 и 2. По данным таблицы 17 видно, что скорость эрозии катода К4 в 5...5,3 раза ниже, чем скорость износа катодов К1 и К2 в штатном положении, что аналогично износу К4 на 1-м этапе испытаний. Скорость же эрозии катода К3 в 4,9...5,15 раза ниже по сравнению со скоростью распыления штатных катодов. Таким образом, на 2-м этапе испытаний влияния материала торца поджигного электрода на скорость эрозии не обнаружено.

На третьем этапе ускоренных испытаний были проведены испытания М100 с положением дополнительных катодов, аналогичном положению катодов PPS-1350, так как мероприятия, направленные на снижение эрозии элементов конструкции К-К, осуществленные

для двигателя PPS-1350, позволили увеличить ресурс катодов, как минимум, на порядок (см. рис. 6 и рис. 88). Расчетный ресурс катодов PPS-1350 указывается как 15000 часов [27].



а) M100



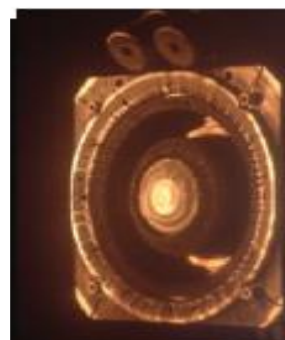
б) PPS-1350

Рис. 88 Общий вид двигателей после наработки 9000 часов

При этом в работе [113] представленные Snesma результаты ресурса PPS[®]1350-G свидетельствует о том, что даже после испытаний длительностью 10530 часов К-К практически не подвергаются эрозии (см. рис. 89).



а) 2000 часов



б) 6000 часов



в) 10530 часов



г) общий вид К-К после наработки 10530 часов

Рис. 89 Общий вид двигателя PPS[®]1350-G после наработки

При детальном сравнении представленных результатов можно заметить, что положение катодов в PPS[®]1350-G несколько отличается от положения в PPS-1350 – возможно, катоды стоят ближе к наружному магнитному полюсу (см. рис. 90).



а)



б)

Рис. 90 Общий вид двигателей: а) - PPS[®] 1350-G (Снежа), б) - PPS-1350 (Факел)

На третьем этапе при визуальном осмотре работающего двигателя отмечен одинаковый вид при работе на разных катодах и такой же, как и на предшествующем (втором) этапе испытаний: присутствовала зона фиолетового свечения – сегмент сферы с телесным углом 90° за срезом двигателя, выступающий на 150 мм от магнитного полюса.

Оказалось, что катод К4 с немагнитным ПЭ изнашивается в 2,1...2,3 раза медленнее штатных катодов К1 и К2, катод же с магнитным ПЭ – в 2,45.. 2,65 раза. То есть, катод К3 изнашивается на 15% медленнее К4, что говорит о влиянии материала, но в данном случае не столь значительном.

Положение К3 и К4 является более приемлемым по сравнению со штатным положением, что подтверждается и при сравнении рисунков 85 а) и г), так как они оказываются под меньшим воздействием ионного потока в силу изменения угла наклона катодов, что ведет, кроме того, к снижению доли катодного расхода, выпадающего на срез РК и к смещению от продольной оси двигателя, однако для М100, в отличие от PPS-1350, не является оптимальным. Полученные результаты не объяснили причину повышенного ресурса катодов PPS-1350, поэтому дополнительно были проведены расчеты магнитного поля для данного двигателя.

При измерении фактического положения катодов в PPS-1350 выяснилось, что они расположены на расстоянии 13 мм от плоскости наружного полюса и (86 ± 1) мм от продольной оси двигателя. Согласно расчету структура плазменного потока на периферии АБ PPS-1350 значительно отличается от М100 (см. рис. 91).

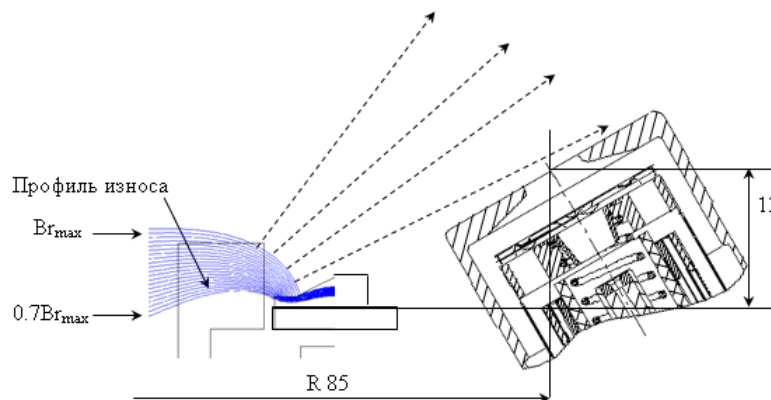


Рис. 91 Структура плазменного потока на периферии анодного блока PPS-1350

К-К в рассмотренном положении в PPS-1350 находится в области, менее подверженной ионному распылению в отличие от M100. В этом двигателе торцевой тепловой экран не поврежден, хотя торцевая поверхность поджигного электрода проэродировала. Это связано, во-первых, с расположением катода, и, во-вторых, с самой конфигурацией силовых линий магнитного поля в области формирования ионного потока. За счет иной формы наружного полюса, а именно, увеличения внутреннего диаметра на 1 мм и добавления кромки, изменяется угол наклона силовых линий в области наружного изолятора РК, что и ведет, в свою очередь, к изменению нормалей, следовательно, и траектории движения ионов. В данном случае ионной бомбардировке будет подвержена так же кромка полюса. Этот факт подтверждается при анализе имеющихся по ресурсу PPS-1350 результатов (см. рис. 92).

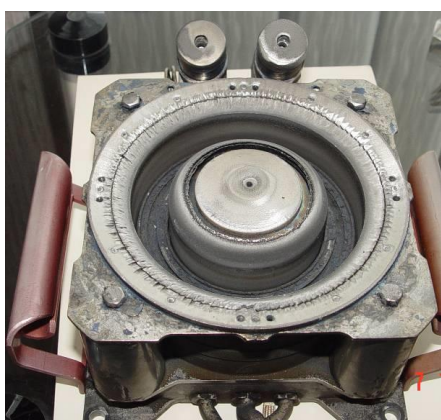


Рис. 92 Общий вид двигателя PPS-1350 после наработки 9000 часов

Кроме того в PPS-1350 поджигные электроды катодов выполнены из магнитного материала, что оказывает влияние и на параметры и конфигурацию магнитного поля в зоне его размещения.

Принимая во внимание результаты расчетов магнитного поля PPS-1350, были проведены дополнительные – 4-й и 5-й этапы испытаний, и проверено влияние формы наружного полюса на скорость распыления катодов компенсаторов M100. Для этого на двигателе M100 был установлен наружный полюс от двигателя PPS-1350.

На 4-м этапе испытаний катоды К3 и К4 находились в положении, определенном на 3-м этапе испытаний, а на 5-м – в положении, аналогичном 1-му этапу испытаний (см. Таблица 11). Краткое описание и наглядное изображение представлены в таблице 14 и на рисунке 93.

Испытания проводились по программам, аналогичным первым трем этапам испытаний.

Результаты 4-ого этапа испытаний приведены в таблице 15. Из таблицы 15 видно, что скорость распыления всех катодов, как штатных, так и дополнительных, без их смещения, только за счет изменения формы наружного полюса двигателя оказалась сниженной в 1,5-1,8 раза. При этом, если сравнить скорость распыления дополнительных катодов со скоростью

распыления штатных, то она по-прежнему, как и на третьем этапе испытаний для М100 со штатным полюсом, в 2 раза ниже.

Таблица 14

Условия проведения испытаний и распыление контрольных образцов

Номер эксперимента	Номер катода	Материал ПЭ	Положение катодов			Дефект массы, %	Полюс
4 [13, 14]	K1	Титан	79	15	45	2,55	PPS-1350
	K2	Титан				2,26	
	K3	Ковар	85	15	30	1,11	
	K4	Титан				1,37	
5 [15, 16]	K1	Титан	79	15	45	3,41	PPS-1350
	K2	Титан				3,27	
	K3	Ковар	89	10	20	0,26	
	K4	Титан				0,42	

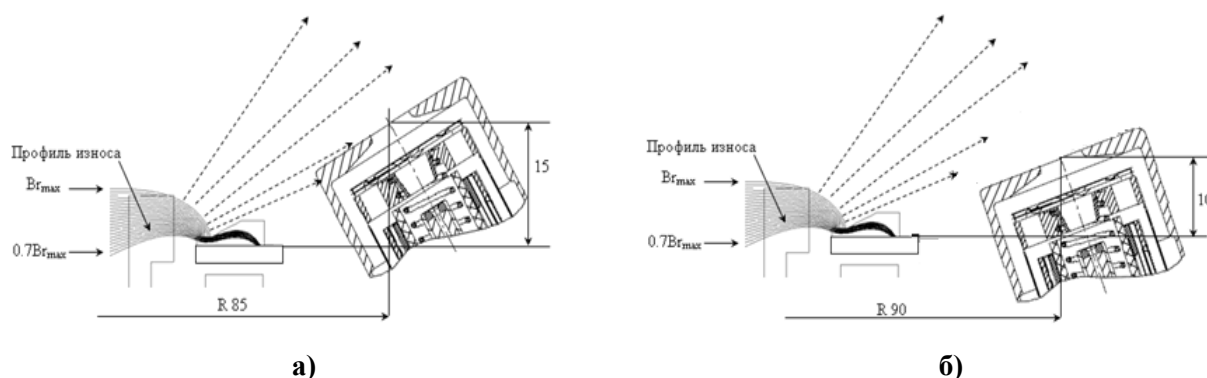


Рис. 93 Исследованные положения К-К в М100:

- а) 4-й этап испытаний – положение К3 и К4 как на 3-м этапе, но наружный полюс PPS-1350,
 б) 5-й этап испытаний – положение К3 и К4 как на 1-м этапе, но наружный полюс PPS-1350

Таблица 15

Результаты взвешивания образцов после проведения 4-го этапа испытаний

Этап испытаний	Номер катода	Материал	Масса образца, г		Дефект массы	
			исходная	в конце	г	%
4	K1	Ti	0,97568	0,95084	0,02484	2,545917
	K2	Ti	1,01771	0,99472	0,02299	2,258993
	K3	Ковар	1,03304	1,02161	0,01143	1,106443
	K4	Ti	1,02603	1,01200	0,01403	1,367406
5	K1	Ti	0,95087	0,91843	0,03244	3,41
	K2	Ti	0,99473	0,9622	0,03253	3,27
	K3	Ковар	1,02162	1,01899	0,00263	0,26
	K4	Ti	1,01202	1,00773	0,00429	0,42

Полученные результаты на всех этапах испытаний обобщены в таблице 16. Из представленных результатов видно, что на скорость распыления катодов влияет не только их тип, расположение, ориентация и наклон, но и конструктивные особенности магнитной системы, в том числе – форма наружного магнитного полюса.

Дефекты массы исследованных образцов

Катоды	Дефект массы, г				
	1-й этап испытаний	2-й этап испытаний	3-й этап испытаний	4-й этап испытаний	5-й этап испытаний
K1 (Ti)	0,05365	0,04270	0,04546	0,02484	0.03244
K2 (Ti)	0,04796	0,04459	0,04212	0,02299	0.03253
K3 (Ковар)	0,00743	0,00865	0,01716	0,01143	0.00263
K4 (Ti)	0,01135	0,00842	0,01989	0,01403	0.00429

На всех этапах испытаний образцы, установленные на штатных катодах М100, подвергались более интенсивному распылению, чем образцы на дополнительных катодах. На первых двух этапах испытаний, когда дополнительные катоды были поставлены под углом наклона 20° в положение, более удаленное от продольной оси двигателя и приближенное к наружному магнитному полюсу, чем штатные катоды, то есть, в положение, менее подверженное воздействию ускоренного ионного потока, получены более оптимальные результаты. Скорость их износа по сравнению со штатными катодами оказалась снижена приблизительно в 5 раз. При этом на 1-м этапе заметно значительное влияние материала поджигного электрода на скорость распыления катодов. Эрозия дополнительного катода (К3) с магнитным ПЭ происходит в 7 раз медленнее по сравнению с эрозией штатных катодов и в 1,5 раза медленнее эрозии катода К4 с немагнитным ПЭ, установленного в аналогичное К3 положение. Замена же штатного наружного полюса М100 на полюс от двигателя PPS-1350 (4-й этап испытаний) привела к снижению износа всех катодов, как штатных, так и дополнительных, примерно в 2 раза. Следовательно, форма наружного магнитного полюса является одним из ключевых факторов, влияющих на конфигурацию силовых линий в области формирования ускоренного ионного потока, вызывающего эрозию катодов. На 5-м этапе испытаний при изменении как положения катода, так и магнитного полюса, удалось получить наиболее существенные результаты (см. таблицу 16).

3.5 Рекомендации по определению оптимального места размещения катода на периферии анодного блока СПД

По результатам проведенных исследований расчетного и экспериментального характера можно сформулировать рекомендации по оптимизации периферийного положения К-К относительно анодного блока двигателя, при котором обеспечиваются высокие выходные параметры СПД и необходимый срок его безотказной работы .

В соответствии с полученными результатами установлено, что источник ускоренного потока плазмы, вызывающего эрозию катода, локализован в области, примыкающей к

наружному полюсу и наружной стенке разрядной камеры, где магнитные силовые линии имеют форму четверти тора. Поэтому с точки зрения обеспечения ресурсных характеристик К-К необходимо устанавливать под таким углом и в той зоне, где он будет менее подвержен действию этого потока. 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.

С точки зрения обеспечения эффективности работы двигателя, К-К рекомендуется устанавливать в рабочей зоне магнитного поля, где магнитные силовые линии замыкаются между магнитными полюсами, или, по меньшей мере, на границе раздела замыкания силовых линий рабочей и периферийной зон поля, а индукция в зоне его размещения не должна превышать 3 мТл. В случае необходимости размещения катода в периферийной зоне вблизи наружного полюса МС, для обеспечения его ресурсных характеристик рекомендуется использовать катоды с магнитным ПЭ, так как при этом конфигурация поля становится более способствующей транспортировке электронов в струю плазмы, а индукции магнитного поля в зоне отверстия в ПЭ близкой к нулевой. Данный факт является значимым и для многорежимных двигателей. Так как при переходе на высоковольтный режим для оптимальной работы двигателя обычно требуется обеспечение более высокого уровня магнитного поля в канале разрядной камеры, что достигается увеличением тока в катушках намагничивания и приводит к увеличению величины магнитной индукции в зоне размещения К-К. Увеличение индукции сопровождается, в свою очередь, ростом параметра $U_{КЗ}$, т.е., нежелательными затратами на транспортировку электронов к аноду.

Кроме того, выбор работающего катода двигателя следует делать с учетом направления азимутальной закрутки ускоренных ионов, которое зависит от полярности магнитного поля в ускорительном канале двигателя и определяется направлением протекания электрического тока в катушках намагничивания. Работающий (основной) К-К должен располагаться первым в направлении закрутки, а резервный катод – вторым. На рисунках 94 и 95 показан оптимальный с точки зрения приведенного критерия выбор катодов. Для наглядности изображены схемы СПД, на которых условно отмечено направление азимутальной закрутки ускоренных ионов и «плазменный мост», образующийся при взаимодействии выбранного работающего К-К, обозначенного как К1, с анодом при его работе, а так же направление протекания тока в катушках (внутренняя обозначена ВК, наружные – НК), при учете, что направление обмотки катушек совпадает с направлением тока. Так, на рисунке 94 приведена МС с закруткой по часовой стрелке. Для такой МС ток в ВК протекает так же по часовой стрелке, при этом радиальная составляющая магнитной индукции B_r положительна.

Таким образом, исходя из того, что оптимальность положения К-К относительно анодного блока определяется параметрами магнитного поля СПД. Оптимального положения можно добиться либо выбором места установки К-К, 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.

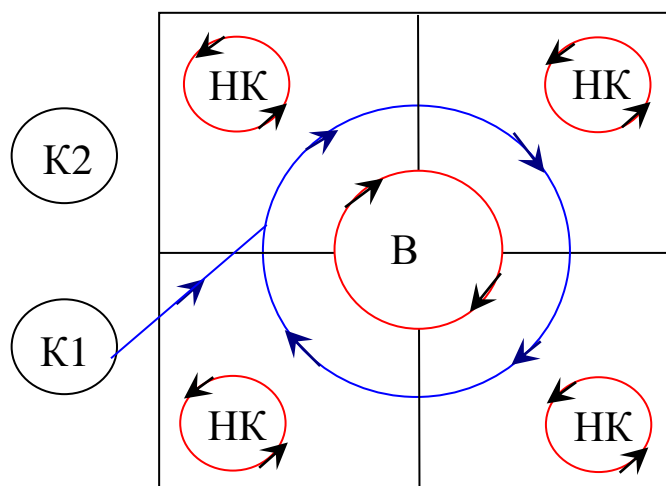


Рис. 94 Схема МС СПД (вид сверху) и положения К1 и К2 при положительной радиальной составляющей поля – $V_r > 0$

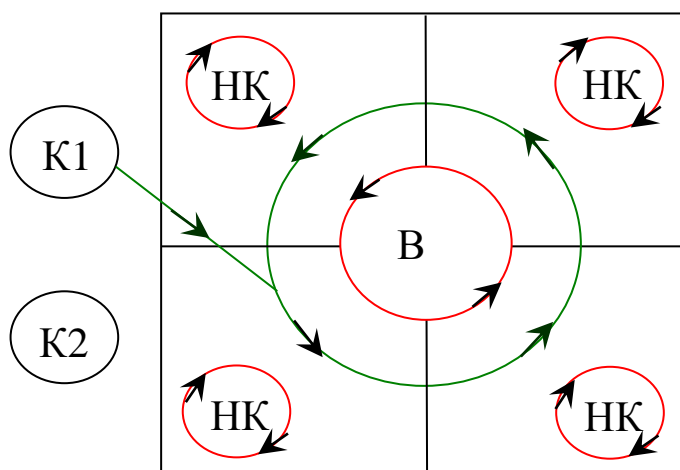


Рис. 95 Схема МС СПД (вид сверху) и положения К1 и К2 при отрицательной радиальной составляющей поля – $V_r < 0$

Основным фактором, влияющим на конфигурацию силовых линий в области формирования ускоренного ионного потока и вызывающим эрозию катодов, является форма наружного магнитного полюса, в особенности форма его фаски. Она оказывает влияние на конфигурацию силовых линий магнитной линзы в области формирования боковых потоков, а, следовательно, и на конфигурацию нормалей к ним, т.е. на траектории движения ионов, сохраняя при этом параметры поля внутри УК.

Форма периферийной зоны поля определяется формой наружного магнитного полюса, что связано с распределением МДС наружных катушек по внешнему наружному контуру и генерацией соответствующей величины внешнего магнитного потока. Чем меньше величина внешнего потока, тем ближе к краю наружного полюса и под меньшим углом к нему проходит граница периферийной зоны поля.

На рисунке 96 показаны конфигурация силовых линий для квадратного магнитного полюса в двух сечениях. Из рисунка видно, что положение границы раздела и угол ее наклона к наружному полюсу значительно изменяется в зависимости от сечения. К-К в этом случае рекомендуется располагать не по диагонали, а в области, где полюс имеет меньшую ширину, так как граница в этой зоне проходит под более острым углом к полюсу, и поэтому К-К нужно поставить таким образом, чтобы он был менее подвержен разрушающему воздействию потока плазмы. Расчетная величина внешнего магнитного потока для сечения б) примерно на 20% ниже, чем в сечении а). При этом меньше и величина магнитной индукции в этой зоне, что благоприятно и с точки зрения выявленной зависимости между величиной поля и параметром $U_{кз}$.

В случае круглого наружного магнитного полюса экспериментальным путем определено, что наиболее предпочтительным является положение К-К в отверстии, выполненном в полюсе в области между наружными катушками намагничивания (см. рисунок 97). При этом плоскость ПЭ К-К должна находиться в плоскости полюса, в силу чего К-К будет располагаться заведомо в рабочей зоне поля и будет защищен от эрозионного действия струи плазмы.

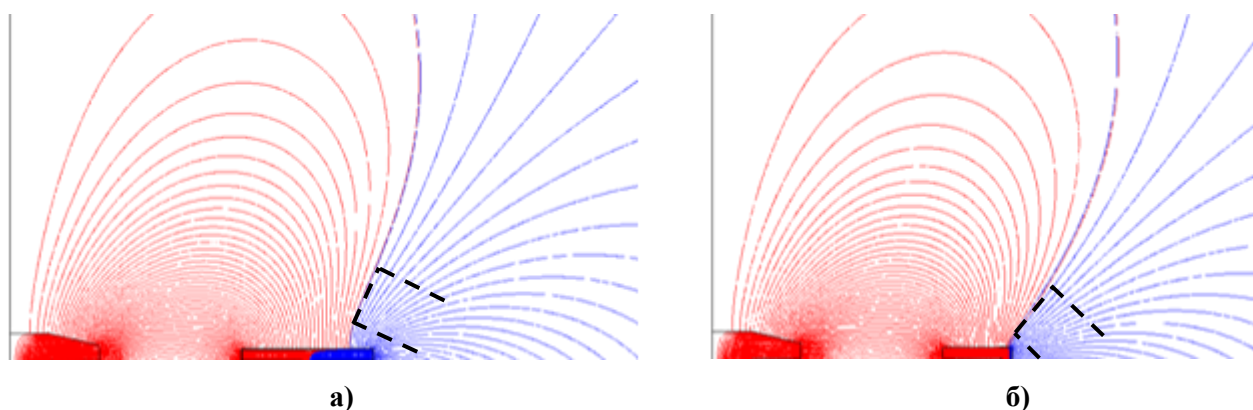


Рис. 96 Конфигурация магнитного поля СПД с квадратным наружным полюсом

Как вариант, возможно использование магнитной накладкой, прикрепляемой к наружному полюсу в зоне расположения К-К. На рисунке 98 показано ее влияние на конфигурацию силовых линий периферии двигателя. Магнитная накладка позволяет сместить границу раздела к кромке полюса (что наглядно видно при сравнении рисунков 96 и 98) и, тем самым, расположить К-К ближе к наружному полюсу, что должно привести и к повышению его ресурса.

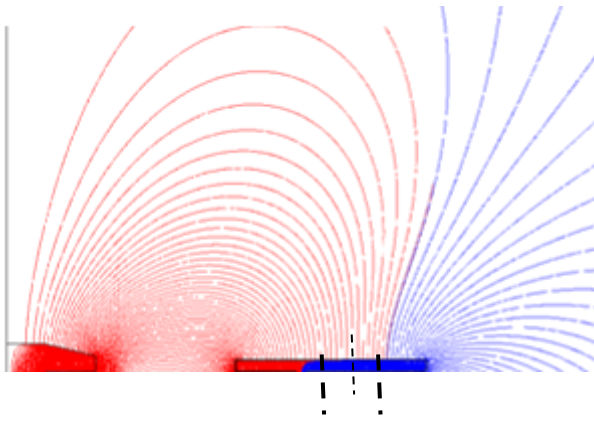


Рис. 97 Конфигурация магнитного поля СПД с круглым наружным полюсом

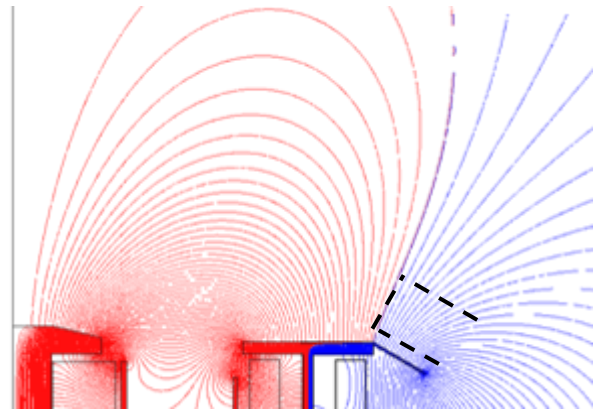


Рис. 98 Конфигурация магнитного поля СПД с дополнительной магнитной накладкой на квадратном наружном полюсе

Основание магнитопровода так же влияет на форму границы раздела. Влияние данного фактора отражено на рисунке 99. Из рисунка видно, что с увеличением наружного диаметра магнитопровода граница раздела смещается к оси двигателя и угол наклона становится близким к прямому, что связано с увеличением внешнего магнитного потока: так, для случая б) он возрастает на 15% по сравнению с а), а для случая в) – на 43%. Таким образом, уменьшая наружный диаметр магнитопровода, можно так же добиться более оптимальной конфигурации силовых линий.

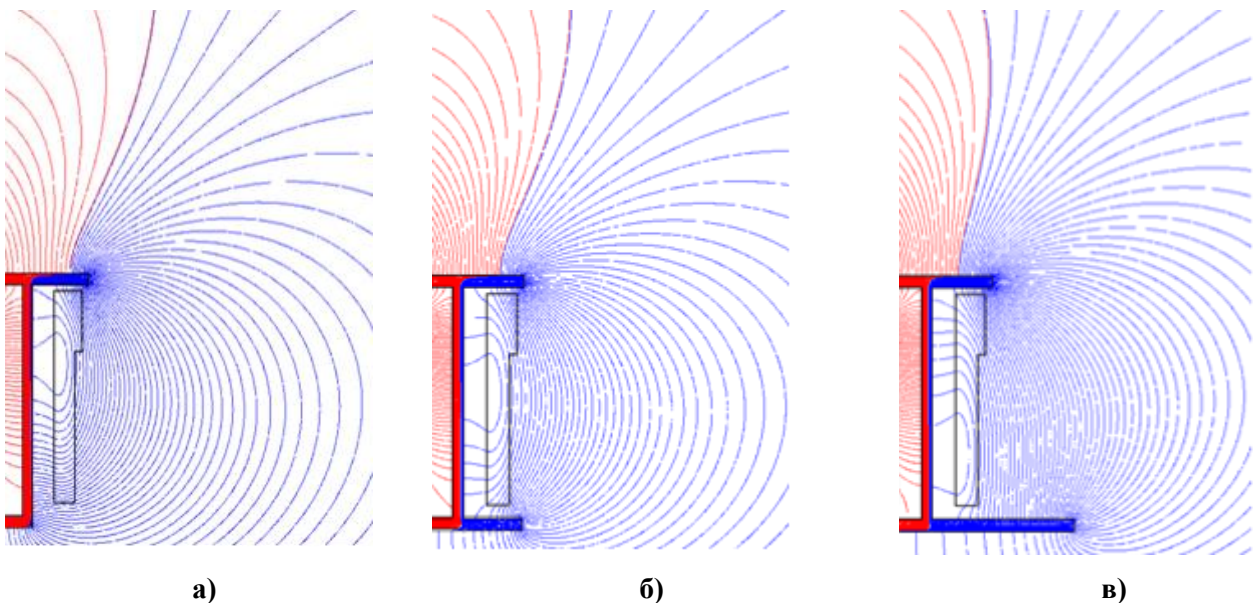


Рис. 99 Влияния формы основания магнитопровода на конфигурацию силовых линий на периферии двигателя

При введении дополнительной катушки намагничивания, примыкающей к наружному магнитному полюсу, изменением в ней тока можно воздействовать на положение границы раздела рабочей и периферийной зон поля, не изменяя величины и конфигурации поля в УК СПД. Аналогичного эффекта можно добиться и при введении дополнительной катушки, намотанной на наружный магнитный экран, подбирая соотношение ампервитков основных и

дополнительной магнитных катушек. На рисунке 100 показано влияние соотношения ампервитков основных и дополнительных катушек намагничивания. На рисунке 100 б) показано влияние дополнительной катушки на наружном магнитном экране. В этом случае МДС наружных катушек намагничивания должна быть снижена на величину МДС дополнительной катушки.

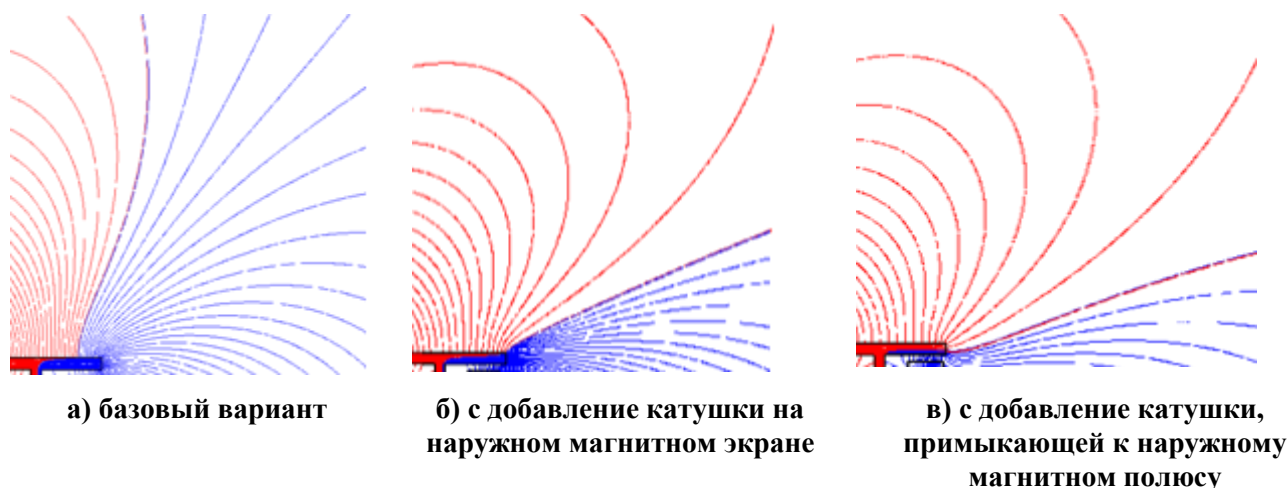


Рис. 100 Влияния соотношением ампервитков основных и дополнительных катушек намагничивания на конфигурацию силовых линий на периферии двигателя

При этом ток в дополнительной катушке должен протекать согласованно с током во внутренней. При использовании дополнительной катушки, примыкающей к наружному магнитному полюсу, ток в наружных катушках не меняется, выбирается только необходимая величина МДС дополнительной катушки, и при этом направление тока в ней должно быть согласованно с током во внутренней катушке при значительном внешнем потоке поля с целью его снижения (как это показано на рис. 100 в)), либо, напротив, противоположно в случае необходимости увеличения внешнего потока.

К сказанному следует добавить, что приведенные способы влияния на конфигурацию периферийной зоны поля не оказывают значительного воздействия на топологию поля в УК двигателя и позволят оптимизировать работу К-К как минимум без снижения выходных характеристик ускорителя. Однако в случае МС со значительно вынесенной над магнитными полюсами магнитной линзой при этом возможно изменение конфигурации силовых линий в области, примыкающей к наружному полюсу и наружной стенке РК. Поэтому при реализации указанных рекомендаций все же необходимым является проведение поверочного расчета магнитного поля СПД с целью оценки полученной топологии.

Таким образом, разработанные расчетные модели МС двигателей позволяют еще на этапе проектирования оценить возможные оптимальные варианты периферийного размещения К-К относительно АБ СПД, обеспечивающие как эффективность работы СПД, так и требуемый ресурс двигателя.

Глава 4. Разработка экспериментальных лабораторных моделей СПД с повышенными выходными и ресурсными характеристиками

Представлены результаты разработки и экспериментальных исследований лабораторных моделей двигателей с повышенными выходными и ресурсными характеристиками.

4.1 Разработка СПД с повышенными выходными и ресурсными характеристиками

В качестве основы для разработки лабораторных моделей СПД с повышенными рабочими характеристиками был взят двигатель СПД-100 [114]. Запуск первого космического аппарата с такими двигателями состоялся в 1994 году. С 1995 г. он успешно используется в системах коррекции серии связных геостационарных КА типа «Галс», «Экспресс», «Экспресс-А», Экспресс АМ, Sesat и др. разработки НПО прикладной механики и ОАО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева (г. Железногорск). С 2003 года двигатель SPT-100 (SPT-100B) применяется в составе зарубежных геостационарных КА типа Inmarsat, Intelsat-X, IPSTAR-II, Telstar-8 и других для решения задач приведения КА в «рабочую точку», стабилизации его положения в этой точке, изменения «рабочей точки» в случае необходимости и увода с «рабочей точки» по окончании эксплуатации. К настоящему времени в эксплуатации находилось или находятся более 200 двигателей на 18 российских и 14 западных КА.

Двигатель СПД-100 имеет существенные запасы по диапазону регулирования как по мощности, так и по напряжению разряда [63]. При напряжении разряда 300 В и мощности разряда 1,35 кВт СПД-100 развивает тягу около 83 мН при удельном импульсе тяги около 1600 с. Расходимость его струи – полуугол, в который выпадает 90% ионного тока – составляет 45°.

При разработке лабораторных моделей с повышенными выходными и ресурсными характеристиками на базе СПД-100 ставились следующие задачи по оптимизации конструкции:

1. Расчетно-экспериментальные работы по оптимизации МС с целью повышения выходных и ресурсных характеристик двигателя и обеспечения его функционирования в нескольких режимах, в том числе с высоким удельным импульсом тяги,
2. Разработка, изготовление и испытания (определение тяговых и удельных параметров, параметров струи) опытных образцов модернизированного двигателя (СПД-100М),
3. Повышение ресурсных характеристик.

Конструкция МС СПД-100 разрабатывалась в конце 80-х начале 90-х годов на основе представлений о рабочих процессах в двигателе, имевшихся на тот момент времени [5; 21; 115]. С тех пор в двигателе производились лишь незначительные доработки, не затрагивающие основных концептуальных моментов конструкции.

Модернизация проводилась 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 параметров магнитного поля и ресурсных характеристик двигателей типа СПД, представленных выше.

Основными целями модернизации МС являлись:

- обеспечение уровня магнитного поля в УК двигателя, соответствующего базовой модели при формировании дополнительно запаса 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 или даже отрицательной 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 УК, где $k = 0,6..0,8$.
- оптимизация положения К-К относительно анодного блока модернизированного двигателя.

Для реализации поставленных целей был проведен магнитный расчет согласно методике, приведенной в главе 2, в модуле EMAG пакета прикладных программ NISA/DISPLAY Version 18. Объектом расчета являлась МС двигателя СПД-100. Расчет был выполнен с использованием трехмерной линейной модели одной четверти МС (см. рисунок 101) в связи с симметрией конструкции и уточненной двумерной осесимметричной модели МС, которая для начала была верифицирована по полученным 3D результатам, а затем уже использована для расчета с заданием фактических свойств материала. Это позволило получить более точные детализированные результаты распределения магнитного поля в элементах конструкции и УК двигателя, а также определить влияние формы наружного полюса на распределение и конфигурацию поля на периферии анодного блока (см. глава 4).

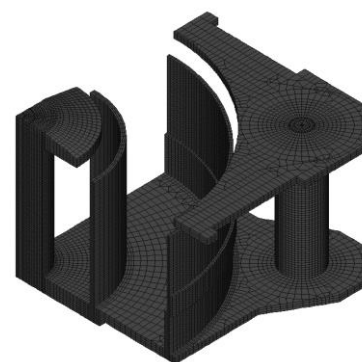


Рис. 101 Расчетная модель МС СПД-100М

Затем была проведена серия магнитных расчетов для нескольких возможных вариантов конфигурации МС модернизированного двигателя, по результатам которых был выбран вариант конструкции МС, удовлетворяющий всем определенным в целях модернизации требованиям.

Конфигурации силовых линий магнитного поля в УК базовой модели СПД-100 и модернизированной модели СПД-100М показаны на рисунке 102, где красным цветом выделены силовые линии, проходящие через значения $B_{r \max} - 0,7 \times B_{r \max}$ посередине УК.

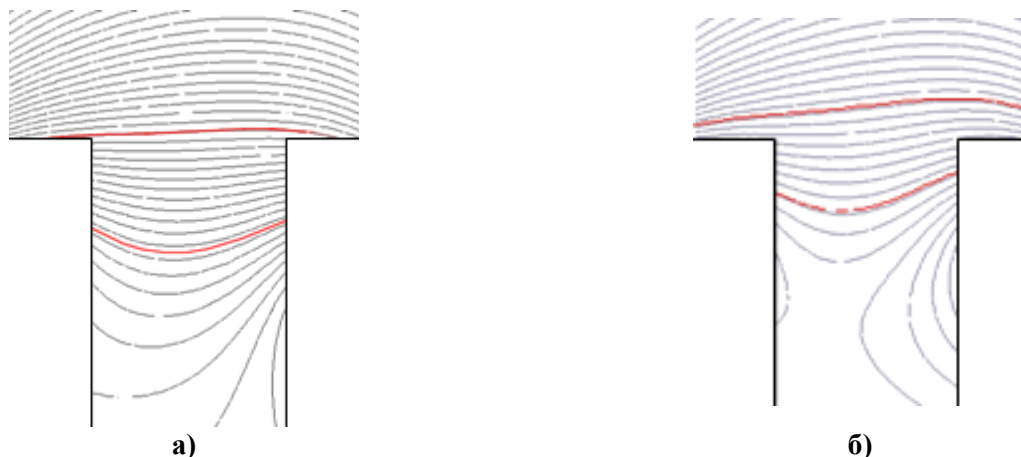


Рис. 102 Конфигурация силовых линий в канале двигателя: а) – СПД-100, б) – СПД-100М

Величина максимальной магнитной индукции в УК модернизированного двигателя сопоставима с величиной для базового варианта. Распределение нормированных к максимальным расчетных значений радиальной индукции посередине разрядного канала для СПД-100 и СПД-100М представлено на рисунке 103. За «ноль» отсчета на графике принят срез РК. Из рисунка видно, что по сравнению с СПД-100 у СПД-100М 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 снизилась примерно в 3 раза и стала принимать отрицательные значения.

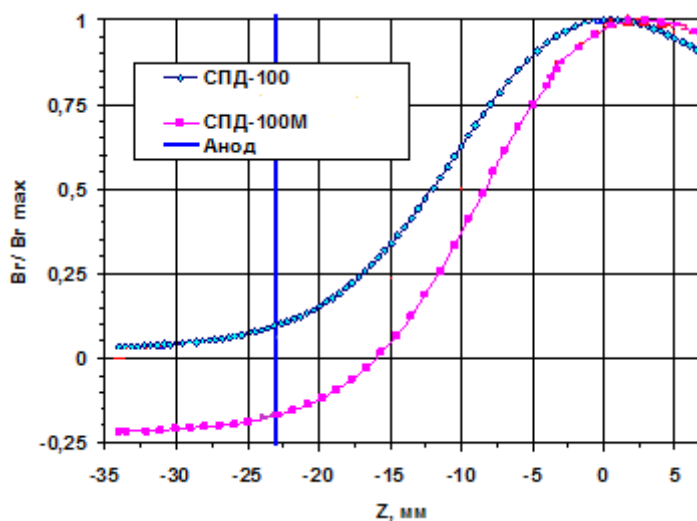


Рис. 103 Распределение нормированной к максимальным значениям величины радиальной составляющей магнитного поля

Результаты расчетов радиального и осевого нормированного к максимальному значению распределения магнитного поля по центру канала, а так же по внутренней и наружной стенкам РК для базовой и модернизированной моделей приведены на рисунках 104, 105.

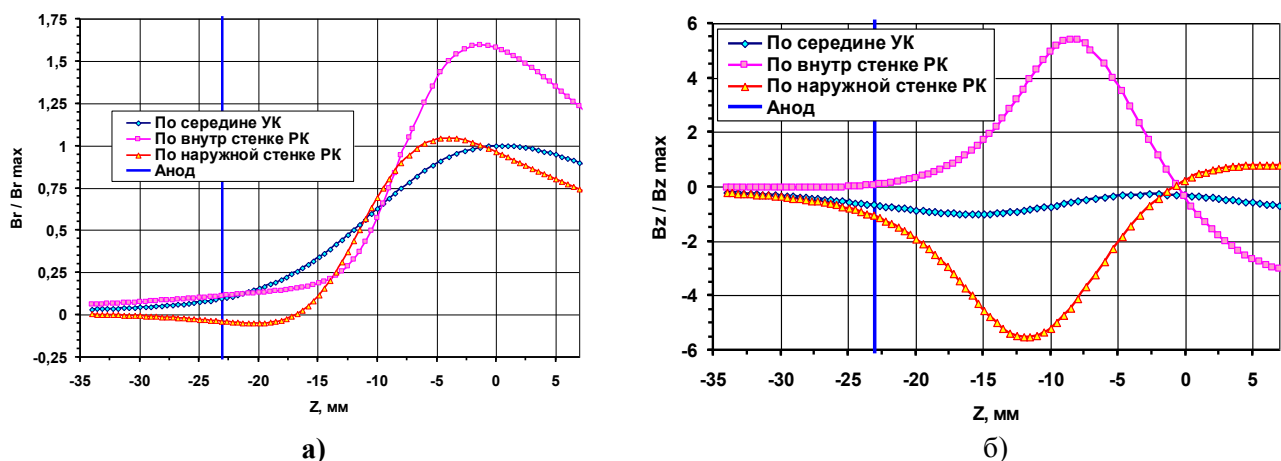


Рис. 104 Нормированное к максимальному значению по середине РК распределение индукции магнитного поля СПД-100
а) - радиальной б) - осевой

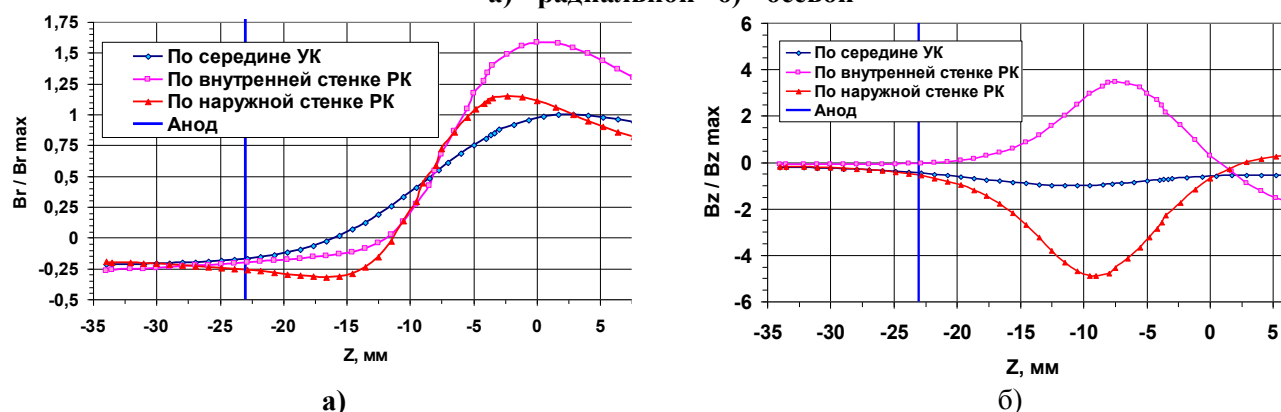


Рис. 105 Нормированное к максимальному значению по середине РК распределение индукции магнитного поля в РК СПД-100М
а) – радиальной б) – осевой

По представленным результатам расчета можно сказать, что для модернизированной конструкции отмечается увеличение радиальной индукции у наружной стенки РК. При этом на глубине от 5..7 мм до 11 мм от среза РК 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 РТ. Распределение осевой составляющей поля стало более симметричным относительно середины УК, уменьшилась разница между величиной посередине и стенкам разрядного канала. Для проверки параметров модернизированного двигателя СПД-100М были разработаны и изготовлены три опытных образца. Во всех образцах двигателя конфигурация МС соответствовала выбранному варианту. Общий вид первого образца (SPT-100М EM1) показан на рисунке 106. Этот образец использовался для предварительной проверки параметров двигателя с модернизированной МС. Второй и третий образцы (двигатель SPT-100М EM2 и SPT-100М EM3) отличались от SPT-100М EM1 механическим и тепловым интерфейсом и формами наружного полюса. Образец SPT-100М EM2 использовался для проверки параметров в расширенном рабочем диапазоне и при испытаниях по определению параметров струи, а образец SPT-100М EM3 – для определения ресурсных характеристик.

В конструкциях всех образцов было использовано не менее 85% квалифицированных ранее при производстве двигателя СПД-100 узлов и технологий.

С целью верификации соответствия расчетных моделей МС изготовленным конструкциям были проведены прямые измерения магнитной индукции по методике, приведенной в главе 2. Определено, что расчетные и экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются между собой и разница между ними не превышает 10 %. Для наглядности на рисунке 107 приведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов для одного из двигателей.



Рис. 106 Общий вид двигателя SPT-100M EM1

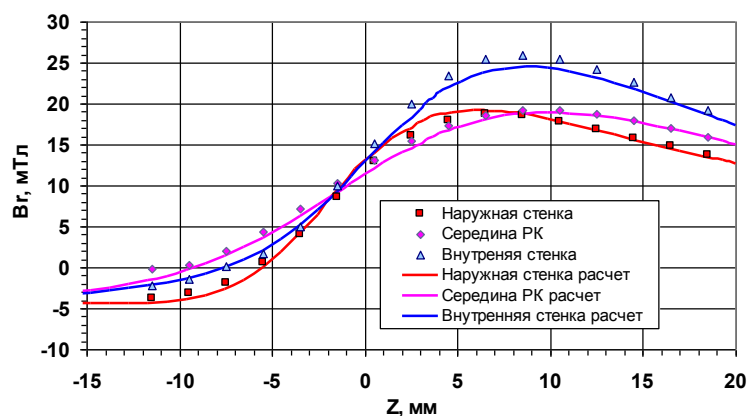


Рис. 107 Расчетные и измеренные распределения радиальной составляющей магнитного поля в УК SPT-100M

По результатам измерений азимутального распределения радиальной составляющей магнитной индукции на срезе РК, коэффициент неравномерности магнитного поля по внутренней стенке составил 1,3 %, а по наружной – 3,1 %, что находится в допустимых пределах. Локальные максимумы магнитного поля на наружной стенке совпадают с положением наружных катушек.

4.2 Экспериментальное оборудование и методики испытаний

Все испытания обоих опытных образцов SPT-100M по определению тяговых, удельных и ресурсных параметров, а так же параметров струи проводились на стендах ОКБ «Факел», предназначенных для испытаний СПД и ЭРДУ, созданных на их базе, при имитации условий близких к натурным условиям эксплуатации КА.

Основные технические характеристики стенда 1

Горизонтальная вакуумная камера (ВК) стенда 1 состоит из двух цилиндрических отсеков: откачного (камера №1) и двигательного (камера №2) с установленным между отсеками вакуумным затвором Ду1200.

Основные габаритные размеры ВК и схема размещения тягоизмерительного устройства приведены на рисунке 108.

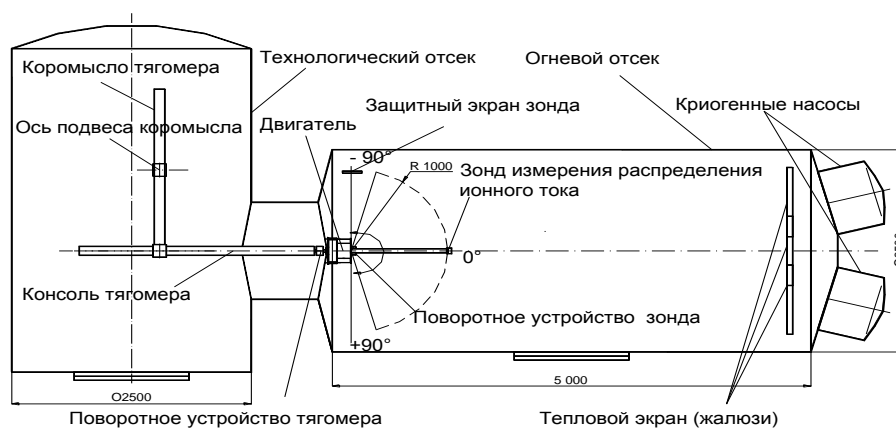


Рис. 108 Схема стенда 1

Общие виды ВК стенда и криогенных насосов показаны на рисунках 109 и 110.



Рис. 109 Вакуумная камера стенда

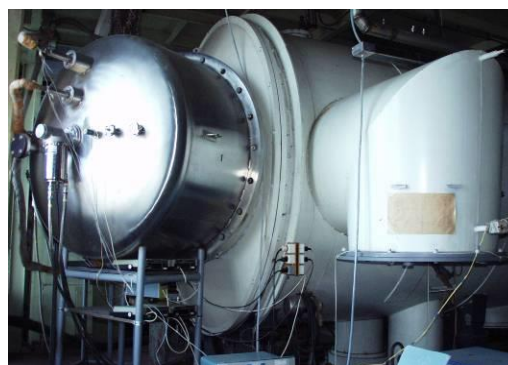


Рис. 110 Вид на крионасос

Объем камеры №1 с патрубками под крионасосы составляет $30,4 \text{ м}^3$. Объем камеры №2 составляет $14,8 \text{ м}^3$. В нижней части камеры №2 через вакуумные затворы Ду500 установлены два криогенных насоса типа НВК-400-6.5, которые служат для предварительной безмасляной откачки (до давления $1,0 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.). На торцевой крышке камеры №1 установлены два крионасоса типа ТМ-1200, а по бокам на угловых патрубках Ду900 (5 шт.) размещены два крионасоса типа НВК-630-20.

В камере №2 размещена подвеска тягоизмерительного устройства, на которой устанавливается испытываемое изделие. Стенд оснащен также устройством для сканирования струи плазмы истекающей из двигателя при испытаниях по измерению параметров струи.

Условия имитация натуральных условий в ВК:

- статическое давление в ВК - не хуже $2,0 \times 10^{-6}$ Тор;
- динамическое давление в ВК - не хуже $2,0 \times 10^{-4}$ Тор при расходе ксенона до 20 мг/с;
- скорость откачки по ксенону - не менее 100000 л/с;
- диапазон измерения температур - (-196 ... +250) °С.

Величина суммарного натекания (негерметичность) не превышает 20 л.×мкм рт. ст./с.

Измерения давления в ВК осуществляется датчиками ионизационного типа, которые располагаются в различных участках камеры. Один датчик - в отсеке, где расположено тягоизмерительное устройство, другой датчик - над двигателем и снабжен вакуумным затвором, что позволяет периодически заменять датчик.

Для измерения величины тяги, развиваемой изделием при испытаниях на стенде, применяется система измерения и регистрации тяги СИУ-2/209. СИУ-2/209 представляет собой тягоизмерительное устройство статического следящего уравнивания с силовой

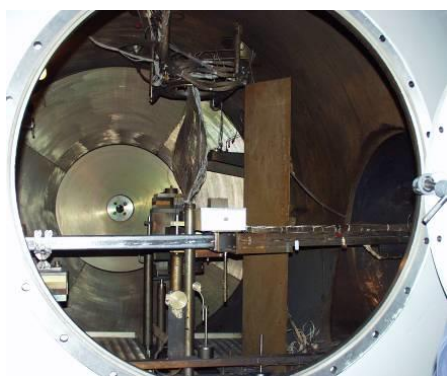


Рис. 111 Вид на тягоизмерительное устройство

показан на рисунке 111.

Перед началом испытаний выполняется весовая калибровка СИУ. В ходе испытаний при каждой паузе по циклограмме проводится токовая калибровка, что позволяет вести постоянный контроль точности измерения тяги.

Подача и измерение расхода РТ в двигатель или его узлы выполняется системой подачи, измерения и регистрации расхода (СИР). Система обеспечивает несколько рабочих диапазонов: от 0 до 1,5 мг/с, от 0 до 8 мг/с и от 0 до 20 мг/с с суммарной, приведенной к диапазону измерения погрешностью не хуже $\pm 3\%$, $\pm 3\%$ и $\pm 4\%$, соответственно. СИР разработана на основе тепловых расходомеров. Тепловые расходомеры основаны на принципе зависимости от скорости (расхода) измеряемого потока среды теплового состояния приемного преобразователя, включающего в себя посторонний источник энергии. В качестве расходомеров используются отечественные калориметрические неконтактные микрорасходомеры типа РРГ-3,6,9 в зависимости от величины измеряемого расхода.

Система позволяет выполнять как раздельную подачу и регулирование расхода в анод и катод двигателей, так и автономные измерения значений этих параметров.

Для питания и управления работой изделия на стенде используются приборы, собираемые в электрическую схему для каждого конкретного вида испытаний.

Основные технические характеристики стенда 2

Общий вид открытой ВК стенда 2 с размещенным в ней тягоизмерительным устройством показан на рисунке 112. Камера стенда состоит из двух горизонтально



Рис. 112 Общий вид стенда 2

расположенных цилиндрических отсеков. Один из отсеков – подвижной и может перемещаться в горизонтальном направлении, что позволяет производить монтаж испытуемых изделий на тягоизмерительное устройство. В неподвижном отсеке смонтированы три криогенных вакуумных насоса, позволяющих проводить испытания двигателей при суммарном расходе ксенона до 15 мг/с. Шибберные затворы насосов

позволяют выполнять вскрытие ВК без выключения вакуумных насосов.

Объем ВК составляет 20 м³.

Условия имитация натуральных условий в ВК:

- статическое давление в ВК - не более 2×10^{-6} Тор;
- динамическое давление в ВК - не более $2,0 \times 10^{-4}$ Тор при расходе ксенона в двигатель 15,0 мг/с;
- скорость откачки по ксенону - не менее 60000 л/с;
- диапазон измерения температур - (-200 ... +600) °С.

Для измерения тяги двигателя на стенде имеется тягоизмерительное устройство, работа

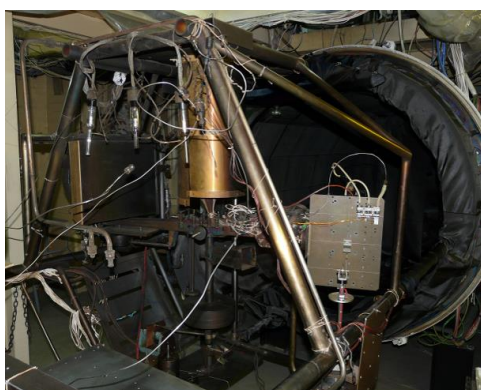


Рис. 113 Общий вид на тягоизмерительное устройство

которого основана на принципе крутильного маятника. Устройство смонтировано на раме и показано на рисунке 113. Пределы измерения устройства - от 0 до 10 гс. Суммарная приведенная погрешность тягоизмерительного устройства ± 2.5 % от предела измерения.

Стендовая система подачи РТ при использовании специальной оснастки позволяет выполнять отдельную подачу и регулирование расхода в анод и катод с проведением их измерений. Для измерения расхода в двигатель используется датчик расхода типа РРГ с пределами измерения от 0 до 4 мг/с с суммарной, приведенной к диапазону измерения погрешностью не хуже ± 3 %. Для уменьшения погрешности измерения расхода в рабочей точке двигателя при подготовке к испытаниям выполняется калибровка показаний расходомера.

Система измерения и регистрации температур при работе двигателя на подвеске тягоизмерительного устройства обеспечивает измерения температур на элементах двигателя и технологической оснастке. Система собрана на основе термопарных датчиков типа ТХК и регистрирующих приборов. Количество термопарных линий – 4.

Системы электропитания стенда позволяют проводить испытания двигателей с мощностью разряда до 5 кВт с напряжением разряда 800 В.

Для измерения параметров основного разряда используются приборы класса 0,2 (типа М1104 и М 1106), что обеспечивает среднюю ошибку измерения этих параметров порядка 0,5 %.

Для измерения параметров цепей накала К-К и токов подмагничивания используются приборы класса 0,5, что обеспечивает среднюю ошибку измерения ± 1 %.

Для измерения амплитуды колебаний в цепи разряда между катодом и анодом используются электронные вольтметры типа В7-26, класс точности которых - 1,5.

Основные технические характеристики стенда 3

ВК 3 стенда имеет Г-образный вид. Основные геометрические параметры камеры: диаметр - 0,9 м; длина каждого плеча камеры – 2,8 м.

Откачка ВК осуществляется двумя высоковакуумными паромасляными агрегатами АВС-ЭП. Агрегаты установлены на торцах камеры.

Объем ВК между шиберными затворами - ~ 4 м³. Объем ВК между ловушками агрегатов – 7 м³. Ловушки вакуумных агрегатов жидким азотом не охлаждаются.

Условия имитация натуральных условий в ВК:

- статическое давление в ВК - не более 1×10^{-5} Тор;
- динамическое давление в ВК - не более $2,5 \times 10^{-4}$ Тор при расходе ксенона в двигатель 6,0 мг/с.
- скорость откачки по ксенону - не менее 9000 л/с.

Система подачи и регулирования расхода РТ в двигатель позволяет выполнять раздельную подачу в анодный блок и катоды. Для этих целей используются два регулятора расхода: РРГ-3 с диапазоном регулирования расхода от 0 до 8 мг/с и РРГ-9-09 с диапазоном регулирования от 0 до 0,6 мг/с. Система измерения расхода в анодный блок и К-К, основанная на датчиках регуляторов расхода, имеет относительные погрешности по каждому из каналов не более $\pm 3,0$ %.

Система измерения и регистрации тяги имеет три диапазона измерения тяги: от 0 до 1, от 0 до 10 и от 0 до 15 гс. Относительная погрешность измерения тяги в каждом диапазоне измерения $\pm 2,5$ %.

Системы электропитания стенда позволяют проводить испытания двигателей с мощностью разряда до 3 кВт. Разрядное напряжение может плавно изменяться от 100 до 1000 В. Максимально возможное значение тока накала 30 А. Напряжение поджига – до 400 В. В цепях электрического питания имеются настраиваемые на требуемые пороги срабатывания токовые защиты.

4.3 Результаты испытаний по определению тяговых параметров разрабатываемого СПД

В качестве контрольных точек для определения эффективности проведенной модернизации двигателя СПД-100 использовались параметры разработанных лабораторных 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 17. Для удобства сравнения в таблице приведены также параметры номинальных режимов двигателей СПД-100 и PPS-1350.

При испытаниях всех образцов двигателей для подачи РТ использовалась инженерная модель XFC. Поэтому приведенные в таблице значения удельного импульса тяги учитывают суммарный расход в двигатель.

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

Таблица 17

Параметры СПД-100М EM2 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

Для оценки эффективности организации рабочего процесса было проведено и исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) усовершенствованного двигателя СПД-100М EM2 в широком диапазоне напряжений и токов разряда. Программа исследовательских испытаний предусматривала снятие ВАХ с измерением ионного тока и оптимизацией токов в катушках намагничивания по минимуму разрядного тока при 5 уровнях анодного расхода до мощности 2,2 кВт.

Полученные результаты измерений ВАХ приведены на рисунке 114. На рисунке 115 показана зависимость ионного тока I_i от разрядного напряжения и расхода. Зависимость от напряжения разряда и расхода электронного тока I_e (где $I_e = I_p - I_i$) представлена на рисунке 116.

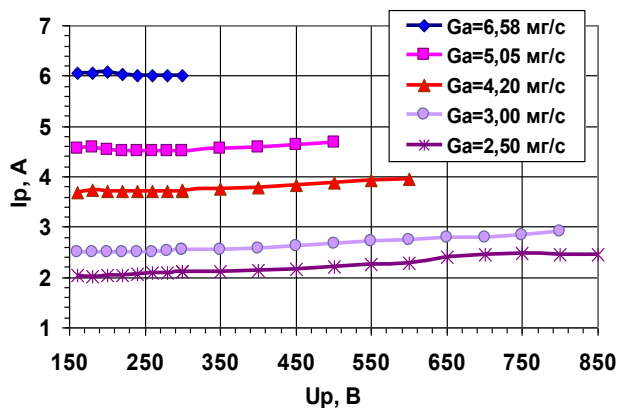


Рис. 114 ВАХ

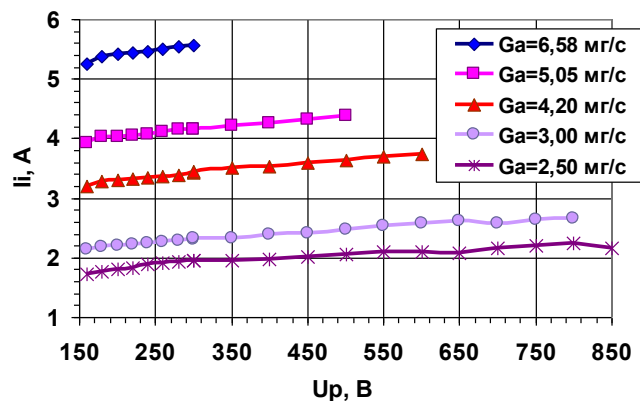


Рис. 115 Ионный ток двигателя

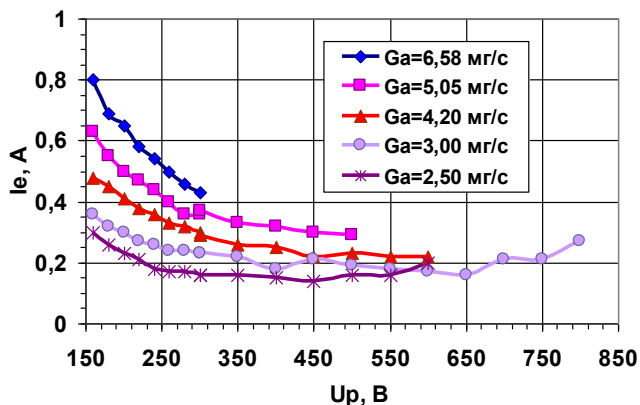


Рис. 116 Электронный ток двигателя

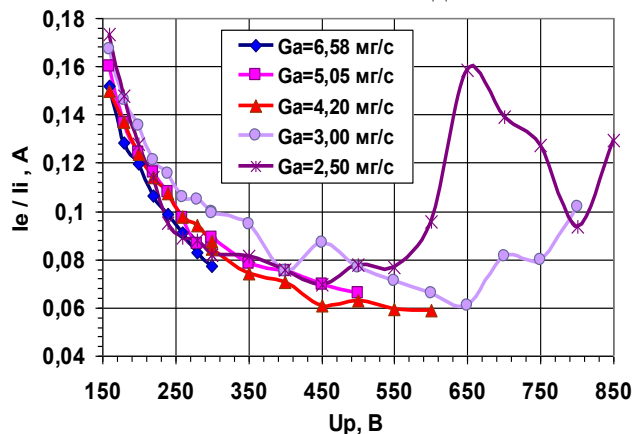


Рис. 117 Соотношение электронного и ионного токов

Из рисунков 114- 116 следует, что с увеличением разрядного напряжения ток разряда и ионный ток монотонно возрастают, а электронный ток снижается. На рисунке 117 показано отношение электронного тока к ионному току. Из графика видно, что кривые практически совпадают до напряжения 600 В.

На рисунках 118- 121 представлены, соответственно, графики зависимости тяги, анодного удельного импульса, энергетической цена тяги и анодного КПД двигателя. Из рисунка 118 видно, что тяга двигателя монотонно возрастает с увеличением разрядного напряжения. Аналогичный вид имеет и зависимость анодного удельного импульса тяги (см. рис. 119). Энергетическая цена тяги достигает минимума при напряжении разряда около 150 В, а затем возрастает с увеличением напряжения разряда, что следует из рисунка 120. Тяговый анодный КПД на высоковольтных режимах превышает 60 % (см. рис. 121).

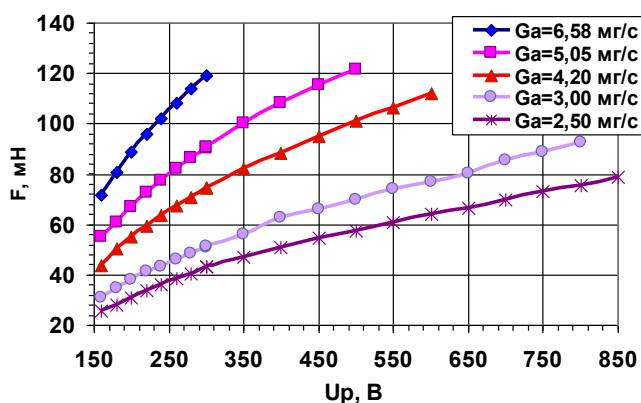


Рис. 118 Тяга двигателя

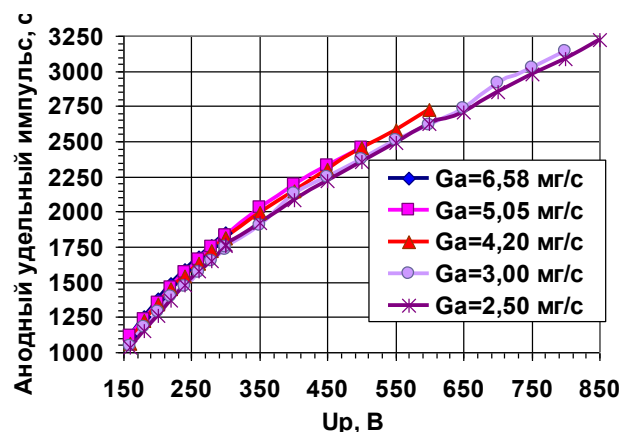


Рис. 119 Анодный удельный импульс тяги

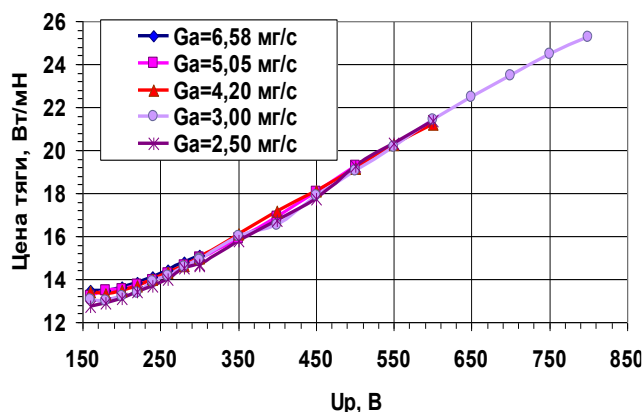


Рис. 120 Энергетическая цена тяги

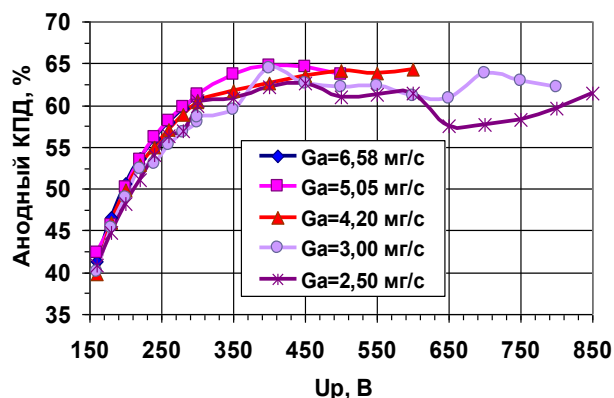


Рис. 121 Анодный КПД

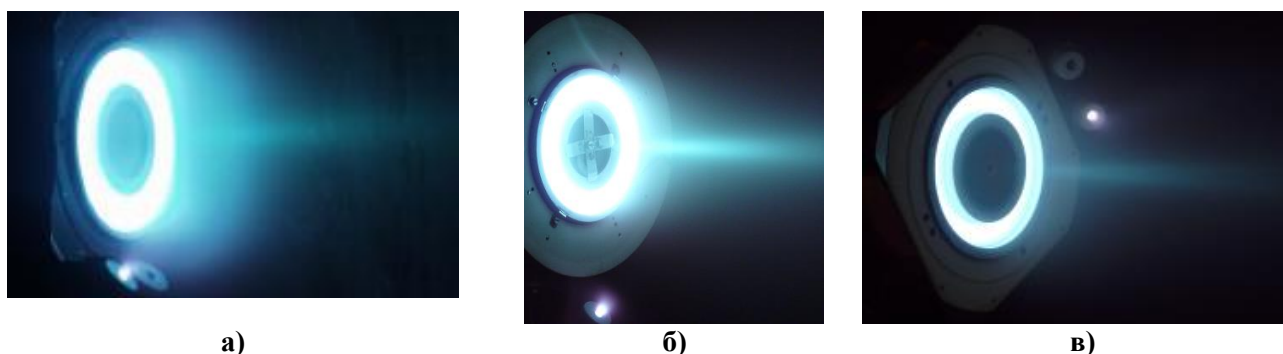
В целом, можно заметить, что при напряжении разряда менее 600 В практически все функции стабильны, а их изменение носит регулярный, монотонный характер. При малых расходах и напряжении разряда свыше 600 В отмечается аномальная работа двигателя, которая проявляется в уменьшении ионного тока (см. рис. 115), увеличении электронного тока (см. рис. 116) и доли его составляющей (см. рис. 117) и снижении тягового КПД (см. рис. 121). Отмеченные аномалии в работе могут быть связаны с недостаточным для эффективной работы уровнем удельного расхода в УК СПД

4.4 Исследование расходимости струи разрабатываемого СПД

Расходимость струи является одним из ограничивающих факторов при компоновке СПД на космический аппарат (КА) Периферийная часть струи может распылять элементы конструкции КА и солнечные батареи. Поэтому на эту характеристику обращают особое внимание [2;7].

Струя плазмы двигателей СПД-100М ЕМ1, СПД-100М ЕМ2 и СПД-100М ЕМ3 при их работе в номинальном режиме СПД-100 имеет более компактную конфигурацию по сравнению

со струей СПД-100. Общие виды работающих двигателей СПД-100, СПД-100М EM1 и СПД-100М EM2 показаны соответственно на рисунке 122 а), б) и в).



а) б) в)
Рис. 122 СПД-100 (а), СПД-100М EM1 (б) и СПД-100М EM2 (в) в работе

Для корректного сравнения параметров струй СПД-100М и СПД-100 последовательно были проведены исследования параметров струи двигателя СПД-100М EM2 и одного из образцов двигателя СПД-100. Оба двигателя работали в режиме с током разряда 4,5 А при напряжении разряда 300 В. Катушки намагничивания подключались к автономным источникам тока. Оптимизация магнитного поля выполнялась путем последовательного регулирования токов в катушках намагничивания по максимуму тяги и минимуму угла расходимости струи.

Исследования параметров струи выполнялись на 1 стенде с использованием зонда-энергоанализатора, установленного на поворотном механизме, позволяющем перемещать зонд по радиусу 0,97 м относительно линии проходящей через пересечение продольной оси двигателя со срезом РК. Зонд был изолирован от двигателя и все опорные напряжения подавались относительно «земли». Для отсечки электронов на первую сетку зонда подавался отрицательный потенциал 20 В. Для отсечки тепловых ионов на коллектор подавался положительный потенциал 30 В. При перемещении зонда измерялись распределения ионного тока. Регистрация ионного тока на коллектор выполнялась с использованием мультиметра GDM-8246 с ценой деления 0,01 мкА. Прибор был подключен к коммутатору «korinix», который выполнял измерения с частотой 1 Гц. Ионный ток на коллектор зонда регистрировался непрерывно в течение испытаний наравне с другими интегральными параметрами двигателя.

Распределение ионного тока для обоих двигателей показано на рисунке 123 а), где угол отсчитывался от продольной оси двигателя. Результат численного интегрирования значений ионного тока по сферической поверхности представлен на рисунке 123 б). Критерием расходимости струи считалась половина телесного угла, в которую попадает 90 % ионного тока. Сравнение результатов измерений распределений ионного тока двигателей показывает, что центральная область струи (до 20° от оси двигателя) у двигателя СПД-100М EM2 существенно больше по сравнению с той же областью двигателя СПД-100. Этот результат указывает на то, что расходимость струи СПД-100М EM2 существенно меньше, чем

расходимость струи СПД-100. Этот вывод подтверждается также и результатами численного расчета угла расходимости: полуугол расходимости (90 % ионного тока) струи двигателя СПД-100М EM2 составляет примерно 30° , а для двигателя СПД-100 - 45° .

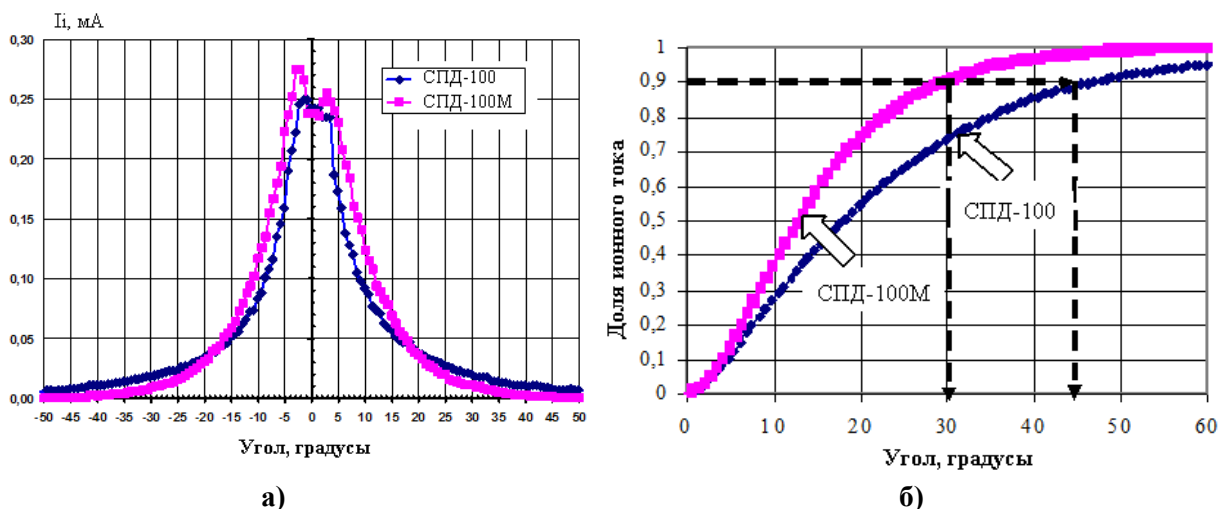


Рис. 123 Распределение ионного тока (а) и суммарного значения ионного тока(б) в струе СПД-100М EM2 и СПД-100

Для проверки стабильности параметров были проведены испытания с уширением разрядного канала путем конического профилирования РК, имитировавшего наработку 500 и 1000 часов для СПД-100. При проведении испытаний, параметры работы двигателя оставались стабильными и перехода в режим пониженной расходимости струи не произошло.

4.5 Исследование ресурсных характеристик разрабатываемого СПД

Ресурсные характеристики двигателя СПД-100 подтверждены на нескольких образцах двигателей [34; 116; 117]. Наибольшая наработка СПД-100 по времени составляет 9066 часов. При этом выработанный суммарный импульс тяги составляет 2,67 кН·с.

Для определения ресурсных характеристик модернизированного двигателя СПД-100М были проведены испытания образца СПД-100М EM3 длительностью 1000 часов в номинальном режиме работы СПД-100 при напряжении разряда 300 В и токе разряда 4,5 А. Двигатель работал при неизменных выбранных для него при оптимизации по минимуму тока разряда значениях токов в катушках намагничивания. В течение проводимых испытаний выходные параметры двигателя были достаточно стабильными.

Учитывая определенную взаимосвязь ресурсных характеристик и параметров и топологии магнитного поля в УК СПД измеренные после проведения испытаний профили эрозии СПД-100 EM3 на рисунке 124 показаны на фоне полученной по результатам расчета магнитной линзы двигателя, на которой выделены зоны соответствующие $(1...0,95)B_{r max}$, $(0,95...0,9)B_{r max}$, $(0,9...0,8)B_{r max}$, $(0,8...0,7)B_{r max}$, $(0,7...0,6)B_{r max}$ по срединной линии УК.

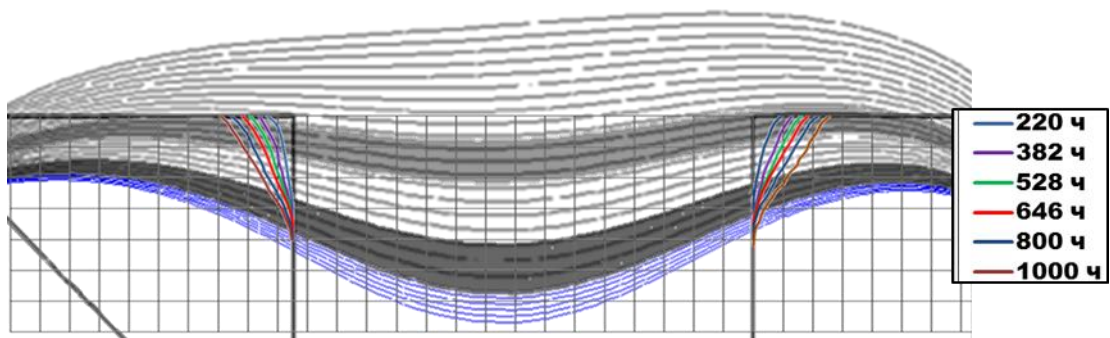


Рис. 124 Профили эрозии и магнитная линза СПД-100М ЕМЗ

Из рисунка видно, что границы зон эрозии на внутренней и наружной стенках РК СПД-100М со стороны анода после 220 часов находятся на пересечении со стенками канала одной силовой линии магнитного поля, проходящей через величину примерно $0,8 \times B_{r \max}$ по срединной линии УК (средние значения глубины эрозии на внутренней и наружной стенках РК после 220 ч составляют 3 мм и 3 (2,6) мм соответственно). По мере увеличения работы СПД наблюдается смещение зоны эрозии к аноду. Так для 1000 часов границы эрозии находятся на пересечении со стенками канала силовой линии, проходящей уже через величину $0,6 \times B_{r \max}$. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований, представленными в главе 3 п.3.1. Величина эрозии на срезе РК после 1000 часов одинакова для обоих изоляторов и составляет 2,5 мм.

Для наглядности сравнения ресурсных характеристик СПД-100 и СПД-100М в таблице 18 еще раз показаны измеренные профили эрозии после наработки 1000 часов для обоих двигателей, конфигурация силовых линий магнитного поля, а также отмечены соответствующие значения коэффициента k по средней линии УК.

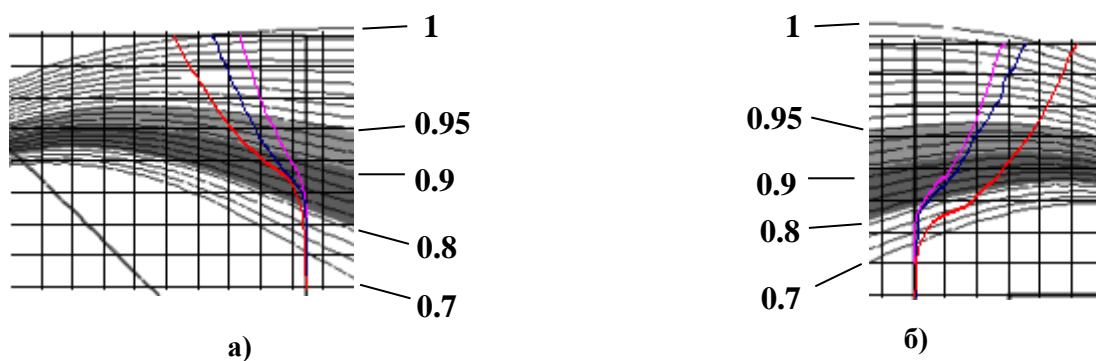
Глубина поясков эрозии модернизированного двигателя, как и предполагалось, оказалась меньше, чем наблюдалась в СПД-100. После 960 часов средняя глубина эрозии внутренней стенки РК СПД-100 составляет примерно 7 мм, а наружной - 6,5 мм, что практически в 2 раза больше глубины эрозии РК СПД-100М после проведения испытаний длительностью 1000 часов. Ширина эрозии серийного СПД-100 после 960 часов также практически в 2 раза больше, чем в СПД-100М после 1000 часов испытаний и составляет 4,5 мм и 5 мм для внутренней и наружной стенок РК соответственно.

Стоит отметить, что с целью повышения ресурсных характеристик СПД-100 были проведены не только работы по оптимизации конструкции МС на основании представленных выше результатов исследований взаимосвязи магнитного поля СПД и геометрических характеристик зон эрозии изоляторов РК (см. глава 3 п.3.1), но и цикл исследований новых материалов изоляторов РК. В связи с этим в образцах модернизированного двигателя

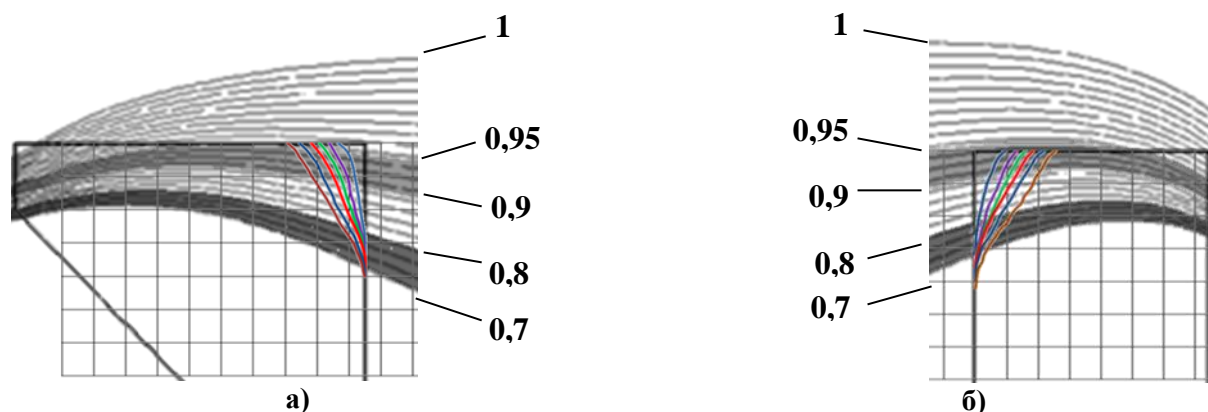
СПД-100М для изготовления РК был использован материал, эрозионная стойкость которого, по меньшей мере, в 1,3 раза выше, чем у БПП-10, используемого в настоящее время в СПД-100.

Таблица 18

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



Профили эрозии изоляторов РК СПД-100 (363 ч, 561 ч, 960 ч): а) – внутренний, б) - наружный



Профили эрозии изоляторов РК СПД-100М ЕМЗ (220 ч, 382 ч, 528 ч, 646 ч, 800 ч, 1000 ч): а) – внутренний, б) – наружный

Таким образом, начальная скорость эрозии стенок РК усовершенствованного двигателя оказалась примерно в 2 раза ниже, чем у серийного. Так у серийного СПД-100 скорость эрозии на срезе наружной стенке после наработки примерно 360 ч составляет примерно 8,3 мкм/ч, на внутренней стенке – 7,2 мкм/ч [27], для СПД-100М после 220 ч – примерно 4,3 мкм/ч и 3,8 мкм/ч соответственно. На глубине 0,6 мм от среза РК скорость эрозии наружной стенки СПД-100 достигает величины 5,8 мкм/ч, внутренней стенке – 5,5 мкм/ч, в СПД-100М – примерно 2,5 мкм/ч и 1,9 мкм/ч соответственно.

Кроме того сама конфигурация профилей эрозии СПД-100М значительно отличается от конфигурации в СПД-100. В отличие от СПД-100 профили СПД-100М близки к линейным, что можно объяснить изменением параметров и конфигурации силовых линий в УК двигателя.

Следует отметить также, что после проведения оптимизации положения К-К на периферии анодного блока СПД-100 скорость эрозии поджигных электродов катодов, оказалась

снижена на порядок. Таким образом, можно предположить, что СПД-100М будет иметь существенно более высокие ресурсные характеристики, чем серийный СПД-100.

4.6 Рекомендации по проектированию магнитных систем СПД с требуемыми выходными и ресурсными характеристиками

При проектировании МС СПД следует учитывать следующие рекомендации:

1. МС не должна содержать элементы с магнитным насыщением;
2. должен обеспечиваться требуемый уровень магнитной индукции в УК согласно типоразмеру и режиму работы двигателя;
3. создана фокусирующая конфигурация силовых линий магнитного поля в разрядном канале с некоторым наклоном к внутренней стенке РК;
4. магнитная линза, определяемая силовыми линиями, проходящими через величины $B_{r\max}$ и $k \times B_{r\max}$ посередине УК, где коэффициент k зависит от величины удельного расхода согласно рисунку 53, должна быть вынесена над магнитными полюсами;
5. должен обеспечиваться как можно более высокий градиент магнитного поля;
6. значения магнитной индукции у стенок РК должны превышать значения по средней линии УК;
7. индукция в зоне расположения анода должны быть близкой к нулевой;
8. должна быть обеспечена высокая азимутальная равномерность распределения магнитного поля в УК;
9. МС должна стремиться к оптимуму с точки зрения массовых и энергетических характеристик;
10. оптимальное местоположения К-К на периферии анодного блока должно быть выбрано согласно рекомендациям, представленным в п.3.5 данной работы.

Заключение

По результатам представленной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ конструкций существующих МС СПД и предложен вариант их классификации;
2. Определены и обоснованы возможные допущения при построении расчетных моделей МС СПД. Отработана 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 слоя ионизации и ускорения 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.

Список используемой литературы

1. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. - 2-ое изд. испр. и доп.// М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 616 с.
2. Модель космоса: Научно информационное издание: В 2-х т. / Под ред. М.М. Панасюка, Л.С. Новикова// М.: КДУ, 2007. 1144 с.
3. Квасников Л.А., Латышев Л.А., Пономарев-Степной Н.Н., Севрук Д.Д., Тихонов В.Б. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов// М.: Изд-во МАИ, 2001. 480 с.
4. Попов Г.А. Современные электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их применение. Научный семинар НИИПМЭ МАИ, 1997.
5. Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б. Стационарные плазменные двигатели // Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. 316 с.
6. Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов / под ред. Академика РАН А.С. Коротева// М.: Машиностроение, 2008. 280 с.
7. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова// М.: Изд-во МАИ, 2012. 292 с.
8. Ермошкин Ю.М. Основы теории и расчета электрореактивных двигателей и двигательных установок: Учеб. Пособие// СибГАУ, Красноярск, 2003. 158 с.
9. Killinger R., Bassner H., Leiter H., Kukies R. RITA Ion Propulsion for Artemis. AIAA-2001-3490// Proc. of 37th Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, USA, July 8–11, 2001.
10. Establier D., Koppel C. The Smart-1 Hall Effect Thruster Around the Moon: In Flight Experience. IEPC-2005-119// Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, New Jersey, USA, October 31 – November 4, 2005.
11. Ray J. Patience required as AENF 1 recovery begins new mode // Space flight now, october 17, 2010. <http://www.spaceflightnow.com/atlas/av019/110814oneyear.html>.
12. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели// М.: Машиностроение, 1975. 272 с.
13. Гусев Ю.Г., Пильников А.В. Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе// Электронный журнал «Труды МАИ», 2012. Выпуск № 60. www.mai.ru/science/trudy/
14. Kim V., Kozubsky K.N., Murashko V.M., Popov G.A. et al. Alexey Morozov – Leader of the SPT development in USSR. IEPC-2009-098// Proc. of 31th International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Michigan, USA, September 20-24, 2009.

-
15. Арцимович Л.А., Андронов И.М., Есипчук Ю.В., Барсуков Н.А., Козубский К.Н. , Левченко Ю.М., Михайличенко В.А., Морозов А.А., Петров Е.М. , Романовский М.К., Рылов Ю.П., Снарский Р.К., Тилинин Г.Н., Трифонов Ю.В. , Трофимов А.В., Ходненко В.П., Шаров Ю.А., Щепкин Г.Я. Разработка стационарного плазменного двигателя и его испытания на искусственном спутнике Земли «Метеор»// Космический исследования. 1974. Том 12, выпуск 3. С. 451-468.
 16. Лазуренко А.В. Моделирование процессов ионизации и ускорения рабочего тела в стационарном плазменном двигателе (СПД) с учетом 3-х мерных эффектов// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2002.
 17. Gavryushin V.M., Kim V., Kozlov V.I., Maslennikov N.A. Physical and technical bases of the modern SPT development. IEPC-1995-038// Proc. of 25th International Electric Propulsion Conference. Moscow, Russia, 1995.
 18. Kim V. The main physical features of the Morozov's type SPT and Electric Propulsion classification. IEPC-2011-007// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 19. Linell J.A., Gallimore A.D. Statistical Analysis of the Acceleration Zone Location in Hall Thrusters. AIAA-2008-4721// Proc. of 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, CT, USA, July 21 - 23, 2008.
 20. Ahedo E., Anton A. Simulation of wall erosion in Hall Thrusters. IEPC-2007-067// Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17 – 22, 2007.
 21. Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Капулкин А.М., Невровский В.А., Смирнов В.А. Влияние конфигурации магнитного поля на режим работы ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП)// Журнал технической физики, 1972. Том XLII, выпуск 3.
 22. Есипчук Ю.В., Левченко М.Ю., Михайличенко В.А., Морозов А.И., Петров Е.М. Ускоритель с замкнутым дрейфом (УЗДП) с большим продольным градиентом магнитного поля// II Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям, Минск, 2-5 октября, 1973.
 23. Hofer R.R. Development and Characterization of High-Efficiency, High-Specific Impulse Xenon Hall Thrusters// A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in The University of Michigan, 2004.
 24. Blinov N., Gorshkov O., Shagayda A. Experimental investigation of magnetic field topology influence on structure of acceleration layer and performance of hall thruster. IEPC-2005-033// Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, New Jersey, USA, October 31 – November 4, 2005.

-
25. Gildea S. R., Matlock T. S., Martinez-Sanchez M., Hargus W.A. Erosion Measurements in a Diverging Cusped-Field Thruster. IEPC-2011-149// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 26. Shagayda A.A., Gorshkov O.A., Tomilin D.A. The Effect of Wall Erosion on the Performance of Hall Thrusters. IEPC-2011-025// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 27. Приданников С.Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе// Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Калининград. 2003 г.
 28. Абгарян В.К. Моделирование ионной эрозии стенок канала разрядной камеры стационарного плазменного двигателя// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2009 г.
 29. Mikellides I.G., Katz I., Hofer R.R., Goebel D.M., de Grys K., Mathers A. Magnetic Shielding of the Acceleration Channel Walls in a Long-Life Hall Thruster. AIAA-2010-6942// Proc. of 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, TN, USA, July 25 - 28, 2010.
 30. Shmelev A.V., Lovtsov A.S. Investigation of Discharge Power Influence on Erosion Rate of SPT Discharge Chamber using Spectroscopic Method. IEPC-2011-024// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 31. McDonald M.C., Gallimore A.D. Cathode Position Orientation Effects on Cathode Coupling in a 6-kW Hall Thruster. IEPC-2009-113// Proc. of 31st International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, Michigan, USA, 20-24 September, 2009.
 32. Courtney D.G., Martinez-Sanchez M. Diverging Cusped-Field Hall Thruster (DCHT). IEPC-2007-39// Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
 33. Sommerville J. D., King L.B. Effect of Cathode Position on Hall-Effect Thruster Performance and Cathode Coupling Voltage. IEPC-2007-78// Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
 34. Arkhipov B., Bober A., Gnizdor R., Kozubsky K., Koryakin A., Maslennikov N., Pridannikov S. The Results of 7000 Hour SPT-100 Life Testing. IEPC-95-039// Proc. of 24th International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia, 1995.
 35. Biagioni L., Cesari U., Saverdi M. Development Status of the HT-100 Miniaturized Hall Effect Thruster System. AIAA-2005-3875// Proc. of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, USA, July 10-13, 2005.

-
36. Dignani D., Ducci C., Cifali G., Rossetti P., Andrenucci M. HT-100 Hall thruster characterization tests results. IEPC-2011-191// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 37. Oslyak S., Ducci C., Rossetti P., Andrenucci M. Characterization of an adjustable magnetic field, low-power Hall Effect Thruster. IEPC-2011-143// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 38. Matlock T.S., Hu F., Martinez-Sanchez M. Controlling Plume Divergence in a Cusped-Field Thruster. IEPC-2011-178// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 39. Warner N.Z. Theoretical and Experimental Investigation of Hall Thruster Miniaturization. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The Massachusetts Institute of Technology. 2007
 40. Tahara H. Research and Development of Hall-Effect Thrusters at Osaka Institute of Technology. AIAA-2008-5086// Proc. of 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, CT, USA, July 21 – 23, 2008.
 41. Ikeda T., Togawa K., Nishida T., Tahara H., Watanabe Y. Research and Development of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano-Satellites. IEPC-2011-039// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 42. Raitses Y., Gayoso J.C., Fisch N.J. Effect of Magnetic Shielding on Plasma Plume of the Cylindrical Hall Thrusters. IEPC-2011-175// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 43. Gayoso J.C., Raitses Y., Fisch N.J. Cathode Effects on Operation and Plasma Plume of the Permanent Magnet Cylindrical Hall Thruster. IEPC-2011-247// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 44. Spektor R., Diamant K. D., Beiting E.J., Swenson K.A., Goddard D.T., Raitses Y., Fisch N.J. Characterization of a Cylindrical Hall Thruster with Permanent Magnets. IEPC-2011-264// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 45. Гопанчук В.В., Сорокин И.Б., Безнос И.А., Козубский К.Н. Поликанальный плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов// Патент РФ № 2008525, кл. F03H1/00, H05H1/54, 28.02.1994.
 46. Valentian D., Klinger E., Lyszyk M. Propulseur a plasma a derive fermee d'electrons a vecteur pousse orientable// Патент Франции № 2 788 084 FR ,07.07.2000.

-
47. Liang R., Gallimore A. A 6-kW Laboratory Hall Thruster with Two Concentric Discharge Channels. Poster Presentation// Proc. of 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, MI, USA, September 20-24, 2009.
 48. Liang R., Gallimore A. Performance of a Laboratory Hall Thruster with Two Concentric Discharge Channels// Proc. of 57th Joint Army Navy NASA Air Force (JANNAF) Propulsion Meeting, Colorado Springs, CO, USA, May 3-7, 2010.
 49. Liang R., Gallimore A. Constant-Power Performance and Plume Measurements of a Nested-Channel Hall-Effect Thruster. IEPC-2011-049// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
 50. Polzin K.A., Markusie T.E., Stanoev B.J. et al. Performance of a Low-Power Cylindrical Hall Thruster. IEPC-2005-011// Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, New Jersey, USA, October 31 – November 4, 2005.
 51. Raitses Y., Fisch N.J. Parametric investigations of nonconventional Hall thruster // Phys. Plasmas, 2001. Vol. 8, No 5.
 52. Raitses Y., Fisch N.J. Cylindrical geometry Hall thruster// US Patent No 6,448,721, 10.09.2002.
 53. Smirnov A., Raitses Y., Fisch N.J. Parametric investigations of Miniaturized Cylindrical and Annular Hall Thrusters. IEPC-2001-038// Proc. of 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, California, USA, October 14-19, 2001.
 54. Cappaci M., Matticari G., Noci G.E., Siciliano P. et al. Development of a Double Stage Hall Thruster for Advanced Telecom, Remote Sensing and Scientific Space Missions. AIAA-2004-3771// Proc. of 40th AIAA Joint Propulsion Conference, Fort Lauderdale, FL, USA, July 11-14, 2004.
 55. 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/
 56. Antropov N.N., Kim V., Kozlov V.I. et al. Small Electric Propulsion Developed by RIAME MAI// Proc. of European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), Moscow, Russia, 2005.
 57. Ким В., Козлов В.И., Скрыльников А.В. и др. Разработка и исследование лабораторных моделей СПД-20 и СПД-25 // 2-я Международная конференция-выставка «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Королев, 2000.
 58. Kim V., Kozubsky K.N., Murashko V.M., Semenkin A.V. History of the Hall Thrusters Development in USSR. IEPC-2007-142// Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.

-
59. Бугрова А.И., Бугров Г.Э., Давыдов В.А., Десятков А.В., Козинцева М. В., Сафронов А.А., Смирнов П.Г., Харчевников В.К., Шапошников М.И., Пильников А.В. Стационарный плазменный двигатель малой мощности// Наука и образование, 2013. №10. <http://technomag.bmstu.ru/doc/640392.html>
60. Kapulkin A., Guelman M. Theoretical Modeling of Ionization Processes in Anode Cavity of CAMILA Hall Thruster. IEPC-2009-068// Proc. of 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Michigan, USA, September 20-24, 2009.
61. Kronhaus I., Kapulkin A., Guelman M., Natan B. Modeling Physical Processes in CAMILA Hall Thruster by PIC Method. IEPC-2011-043// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
62. Kapulkin A., Balabanov V., Rubanovich M., Behar E., Rabinovich L., Warshavsky A. CAMILA Hall Thruster: New Results. IEPC-2011-046// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
63. Manzella D.H., Jacobson D.T., Jankovsky R.S. High Voltage SPT Performance. AIAA-2001-3774// Proc. of 37th Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, USA, July 9-11, 2001.
64. Бардымов Н.А., Ивашкин А.Б., Лесков Л.В., Трофимов Гибридный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов// IV Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Тез. док.. Москва, 1978.
65. Гопанчук В.В., Сорокин И.Б. Ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2045134, кл. H05H 1/54, F03H 1/00, 15.03.93.
66. Гопанчук В.В. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2191487, кл. H05H 1/54, F03H 1/00, 30.10.00.
67. Potapenko M.Yu., Gopanchuk V.V. Characteristic Relationship between Dimensions and Parameters of a hybrid Plasma Thruster. IEPC-2011-042// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
68. User's manual for emag electromagnetic analysis. Engineering mechanics research corporation. Troy. Michigan, USA. 1998.
69. Зима Т.Е., Зима Е.А. Теоретические основы электротехники. Основы теории электромагнитного поля: Учеб. пособие// Новосибирск: Издательство НГТУ, 2005. 198 с.
70. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: – Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/ Олег Болеславович Буль// М.: Издательский центр «Академия», 2005. 336 с.
71. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин: Пер. с польск. // М.: Энергоатомиздат. 1986. 200 с.

-
72. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей// Л.: Энергия, 1974, 288 с.
73. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Пер. с англ.// Л.: Энергия, 1970. 376 с.
74. Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности// Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2011. 112 с.
75. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ.// М.: Мир, 1984, 215 с.
76. Деклу Ж. Метод конечных элементов: Пер. с франц.// М.: Мир, 1976. 96 с.
77. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике// М.: Мир, 1975. 543 с.
78. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ.// М.: Мир, 1986. 309 с.
79. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов// М.: Мир, 1979. 392 с.
80. Коннор Дж., Бреббиа К. Метод конечных элементов в механике жидкости: Пер. с англ.// Л.: Судостроение, 1979. 264с.
81. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ.// М.: Мир, 1981. 304 с.
82. Андреева Е.Г., Ковалев В.З. Математическое моделирование электротехнических комплексов: Монография / Под общ. ред. Ковалева Ю.З.// Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. 172 с.
83. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей// Киев: Изд-во «Техніка», 1974. 352 с.
84. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков// М.: Мир, 1986. 336 с.
85. Чигарев А.В, Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. Пособие// М.: Машиностроение-1, 2004 512 с.
86. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: – учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Олег Болеславович Буль// М.: Издательский центр «Академия», 2006. 288 с.
87. ELCUT ® Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. Руководство пользователя// Санкт-Петербург: Производственный кооператив TOP, 2010.
88. 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
89. Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп.// М.: Машиностроение, 1982. 528 с.

-
90. Vial V., Godard L., Cornu N., Coulaud E., Arrat D. PPS®1350-G Performance assessment with permanent magnets. IEPC-2011-119// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
91. Peterson P.Y. The development and characterization of a two-stage hybrid hall/ion thruster. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in The University of Michigan, 2004.
92. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия. ГОСТ 11036-75// М.: Издательство стандартов. 1993.
93. Панфилов В.А., Козубский К.Н., Тарасов А.Н., Жасан В.С., Тургенев С.Е., Гниздор Р.Ю., Приданников С.Ю. Анализ магнитных свойств стали 10880// Техническая справка 301.01.06 ТС.ФГУП ОКБ «Факел», 2001
94. Мишин Д.Д. Магнитные материалы// М.: Высшая школа, 1981. 142 с.
- 95 Говорков В.А. Электрические и магнитные поля// М.: Связьиздат, 1951. 341 с.
96. Kim V., Kozlov V. I., Skrylnikov A.I., Umnitsin L.N., Svtina V.V., Bouchoule A., Prioul M. Investigation of the Local Plasma Parameter Distributions in the SPT Accelerating Channel Under Increased Discharge Voltages. IEPC-2005-004// Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, New Jersey, USA, October 31 - November 4, 2005.
97. Беликов М.Б., Горшков О.А., Ловцов А.С., Шагайда А.А. Зондовые измерения в канале холловского двигателя номинальной мощностью 1,5 кВт // Прикладная физика, 2008. № 3. С. 59- 62
98. Шмелёв А.В., Ловцов А.С. Особенности эрозии изоляторов холловского двигателя при изменении расхода рабочего тела // Письма в ЖТФ, 2012. Том 38, вып. 11. С. 95-104.
99. Shmelev A.V., Lovtsov A.S. Investigation of Discharge Power Influence on Erosion Rate of SPT Discharge Chamber using Spectroscopic Method. IEPC-2011-024// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
100. 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
101. Ерофеев В.С., Жаринов А.В., Лесков Л.В. Ускорители с замкнутым холловским током // Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 54-60.
102. Архипов Б.А. Исследование и разработка катодов нового поколения для стационарных плазменных двигателей (СПД)// Диссертация на соискание степени доктора технических наук. Калининград. 1998 г.

-
103. Goebel D.M., Jameson K., Katz I., Mikellides I.G. Energetic Ion Production and Keeper Erosion in Hollow Cathode Discharges. IEPC-2005-266// Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 – November 4, 2005.
104. Gayoso J.C., Raites Y., Fisch N. J. Cathode Effects on Operation and Plasma Plume of the Permanent Magnet Cylindrical Hall Thruster. IEPC-2011-247// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
105. Гопанчук В.В., Гниздор Р.Ю., Козубский К.Н., Приданников С.Ю. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов// Патент РФ №2188521, кл. 6 H05H 1/54, F03H 1/00, 27.08.2002.
106. Farnell C.C., Brown D.L., Willis G.M., Braham R.D. Remote Diagnostic Measurements of Hall Thruster Plumes. IEPC-2009-031// Proc. of 31st International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, Michigan, USA, September 20-24, 2009.
107. Jameson K.K., Goebel D.M., Hofer R.R., Watkins R.A. Cathode coupling in Hall Thruster. IEPC-2007-278// Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
108. Hofer R.R., Johnson L.K., Goebel D.M., Fitzgerald D.J. Effects of an Internally-Mounted Cathode on Hall Thruster Plume Properties. AIAA 2006-4482// Proc. of 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, USA, July 9 -12, 2006.
109. Brown D.L., Reid B.M., Gallimore A.D., Hofer R.R., Haas J.M., Larson C.W. Performance Characterization and Design Verification of a 6-kW Laboratory Model Hall Thruster// Proc. of 54th JANNAF Propulsion Meeting, Denver, CO, USA, May 14-17, 2007.
110. Zurbach S., Cornu N., Lasgorceix P. Performance Evaluation of a 20 kW Hall Effect Thruster. IEPC-2011-020// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
111. Гопанчук В.В., Гниздор Р.Ю., Козубский К.Н., Приданников С.Ю. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов// Патент РФ № 2188337, кл. 7 F03H 1/00, H05H 1/54, 27.08.2002.
112. 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.
113. Cornu N., Marchandise F., Darnon F., Estublier D. The PPS[®]1350-G Qualification Demonstration: 10500 hrs on the Ground and 5000 hrs in Flight. AIAA 2007-5197// Proc. of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, USA, July 8-11, 2007.

-
114. O. A. Mitrofanova, R. Yu. Gnizdor, V. M. Murashko, A. I. Koryakin, A. N. Nesterenko New generation of SPT-100. IEPC-2011-041// Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.
115. Esipchuk Y.V., Tilin G.N. Drift instability in a Hall-current plasma accelerator// Technical Physics, 1976. Vol. 21, no 4. P. 417- 423.
116. Ragot X., Mattei N., Garnero P. Plasma propulsion subsystem lifetest – Alcatel// Proc. of 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion, Cannes, France, October 10-13, 2000.
117. Day M., Gnizdor R., Kozubsky K., Koryakin A., Maslennikov N., Pridannikov S. SPT100 Life Test with Single Cathode up to Total Impulse Two Million Nsec. AIAA-98-3790// Proc. of 34th Joint Propulsion Conference& Exhibit, Cleveland, OH, USA, July 13-15, 1998.