

Отзыв

официального оппонента
на диссертацию Митрофановой Ольги Александровны
ФГУП Опытное конструкторское бюро “Факел”

“Влияние величины и топологии магнитного поля на интегральные характеристики стационарных плазменных двигателей (СПД)”,

представленную на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 05.07.05

“Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки
летательных аппаратов”.

Стационарные плазменные двигатели СПД с удельным импульсом 1700 с., разработанные в СССР и в России, находят самое широкое применение для коррекции и стабилизации долгоживущих искусственных спутников ИС на геостационарной орбите Земли. В настоящее время появились новые проекты, создание ИС с ресурсом работы свыше 10 лет, создание двигателей для полётов на другие планеты. Для реализации этих проектов требуется создание СПД с более высоким удельным импульсом более 3000 с., ресурсом не менее 10000 ч. с более высоким полным КПД не менее 50%, уменьшением расходимости ионного потока, возможность обеспечения многорежимного работы двигателя по мощности, по тяге и величине удельного импульса.

Поэтому тема диссертации, направленная на создание именно таких СПД, является актуальной для реализации этих проектов.

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

Во введении автор диссертации обосновано делает вывод, что существующее состояние результатов исследований физических процессов определяющих работу СПД не позволяет проводить расчёты характеристик СПД и, следовательно, не даёт возможность оптимизировать параметры двигателя. Поэтому основное внимание автор уделяет изложению результатов экспериментальных исследований, которые влияют на формирование электрического поля, зоны ионизации, фокусировку ионов и на ресурс работы двигателя. Вывод о том, что конфигурация магнитного поля определяет эти характеристики не вызывает сомнения. Следовательно, цель работы на повышение выходных и ресурсных характеристик СПД посредством оптимизации величины и топологии магнитного поля в разрядной камере и за срезом двигателя в настоящее время является единственно правильным решением.

Для выполнения этих рекомендаций были сформулированы направления работы, отмечена научная новизна работы.

Во второй главе представлен анализ параметров, существующих и разрабатываемых ЭРД для космических аппаратов КА, в зависимости от выполняемых ими задач и приведён анализ требований, который предъявляются к выходным ресурсным характеристикам ЭРД. Делается вывод, какие направления являются перспективными.

Для выполнения этих задач обосновывается вывод - необходимость увеличения ресурса непрерывной работы двигателя, возможность менять режим работы двигателя для реализации нескольких задач, уменьшить расходимость плазменной струи для устранения распыления поверхности КА.

Для улучшения характеристик двигателей проведёно исследование влияния параметров магнитной системы на выходные и ресурсные характеристики СПД. Поскольку в настоящее время отсутствует модель формирования электрического поля в канале СПД, автор совершенно правильно использовал эмпирические зависимости, описывающее формирование электрического поля в зависимости от конфигурации магнитного поля, теоретические представления связи конфигурации магнитных силовых линий с эквипотенциалами электрического поля и формирование потока ионов в канале и за срезом двигателя.

Автор диссертации детально проанализировал возможные способы увеличения ресурса работы катода – компенсатора.

В параграфе 1.3 описаны схемы и параметры магнитных систем СПД. Эти знания важны для проведения работ по оптимизации параметров магнитных систем двигателей.

В параграфе 1.4 сформулированы задачи диссертационной работы.

Отработать методики расчёта двумерных и трёхмерных расчётных моделей магнитных систем.

Провести исследования между параметрами и топологией магнитного поля в канале РК и геометрическими характеристиками зон эрозии,

Выработать рекомендации для прогноза геометрических характеристик зон эрозии по результатам расчета магнитного поля.

Исследовать влияния магнитного поля в канале СПД на выходные характеристики двигателя.

Провести экспериментальные исследования по определению влияния параметров и топологии магнитного поля выходной зоны на характеристики катода – компенсатора.

Выработать рекомендации по оптимальному размещению катода – компенсатора для обеспечения требуемых выходных и ресурсных характеристик двигателя.

Во второй главе представлен анализ современных методик расчета магнитных систем СПД. Сформулированы требования к МС, исходя из

результатов экспериментальных исследований влияния конфигурации магнитного поля на характеристики двигателя и теоретических представлений, что силовая линия магнитного поля определяет конфигурацию эквипотенциалей электрического поля. Это позволило рассчитывать поля, которые обеспечивают фокусировку ионного потока в канале двигателя.

В этой главе подробно изложена методика расчёта магнитного поля СПД с помощью программы NISA. С целью упрощения моделирования и минимизации времени расчёта были рассмотрены некоторые допущения – задание условий симметрии, замена свойств материала МС, имеющую нелинейную зависимость $B(H)$, создание осесимметричного эквивалента МС.

В разделе 2.3 подробно изложена технология определения соответствия результатов расчёта топологии силовых линий с полученной топологией в изготовленной модели двигателя. Было показано, что разница между расчетными значениями магнитной индукции и измеренными экспериментально составляет приблизительно 3-6 %. Конфигурации силовых линий магнитного поля в УК СПД, полученные при расчетах, практически идентичны, полученным экспериментальным путем.

В разделе 2.4 содержится анализ массоэнергетических характеристик магнитных систем. Этот анализ представляет интерес, поскольку позволяет оптимизировать вес МС и энергетические затраты для обеспечения необходимой величины и конфигурации магнитного поля в рабочем зазоре. Основной вывод, который был получен, для обеспечения оптимальности массоэнергетических характеристик МС СПД является отсутствие в МС участков магнитного насыщения. Было показано, что критичными с точки зрения магнитного насыщения являются: сердечники катушек намагничивания, основание магнитопровода в области расположения наружных катушек намагничивания и магнитные экраны. Следовательно, элементы МС должны быть выбраны с некоторым запасом по индукции насыщения материала, чтобы обеспечить работу СПД в случае повышения температуры изделия при нагреве в процессе работы. Вместе с тем было отмечено, что в ненасыщенном состоянии в магнитных экранах МЭ наблюдаются потери ампервитков МДС. Однако было установлено, что магнитные экраны, позволяют создать оптимальную конфигурацию магнитного поля, что повышает ресурс работы и тяговые характеристики двигателя.

Рассматриваются другие варианты уменьшения массы МС - изменение конструкции магнитопровода, выбор количества катушек намагничивания.

Подробный анализ возможности уменьшения массоэнергетических характеристик магнитных систем дает возможность использовать этот анализ при создании новых моделей двигателей с улучшенными характеристиками.

В главе 3 автор диссертации рассматривает 1) зависимость ресурсных характеристик СПД от параметров и конфигурации магнитного поля, 2) результаты исследования влияния магнитного поля на рабочие характеристики катода-компенсатора и двигателя в целом.

Этот анализ основывается на рассмотрении структуры и расположения слоя ионизации и ускорения СИУ. Расположение слоя локализуется в области максимального значения радиальной индукции. Положение границы зоны эрозии связан с расположением СИУ. Анализ взаимосвязи между параметрами магнитного поля и характером эрозии был получен из результатов ресурсных испытаний двигателей СПД, проведенных в ОКБ "Факел". Было показано, что зоны эрозии на внутренней и наружной стенках канала находятся на пересечении со стенками канала одной силовой линии магнитного поля, проходящей через величину $k \times B_{\text{кгmax}}$ по срединной линии УК, численные значения коэффициента k для каждого случая различны. Ранее было показано, что на положение СИУ могут оказывать влияние как величина магнитной индукции в канале РК, так и режим работы двигателя, в частности, величина тока разряда, величина расхода. Для оценки длины СИУ автор использовал соотношение длины слоя ускорения, полученное Жариновым А.В. для двигателя с анодным слоем. Длина этого слоя зависит от плотности нейтралов (расхода газа) в канале двигателя. Для подтверждения этой идеи автор диссертации провёл анализ результатов исследований границы эрозии для нескольких моделей СПД. Было показано, что коэффициент k зависит от расхода газа и меняется в пределах от 0.4 до 0.9, т.е. граница эрозии с уменьшением расхода увеличивается в направлении расположения анода.

Чтобы подтвердить связь между топологией магнитного поля и формой профилей эрозии были проведены сопоставления профиля эрозии с профилем магнитного поля, полученным численно для СПД 100.

Автор подтвердил вывод: 1) 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. Эта «граничная» силовая линия определяется величиной $k \times B_{\text{кгmax}}$ по срединной линии УК, где коэффициент k может принимать различные значения, а также зависит от удельного расхода РТ в выходной зоне канала двигателя. 2) Увеличение длительности работы СПД смещает глубину зоны эрозии к аноду, 3) Предельные профили эрозии стенок канала близки к силовым линиям.

Автор делает обоснованный вывод, что можно прогнозировать положение зон эрозии по результатам магнитных расчетов еще на этапе проектирования и анализировать влияние различных конструктивных изменений МС и канала двигателя на эрозионные характеристики.

В главе 3.2 представлен анализ влияния параметров магнитного поля на рабочие характеристики катода-компенсатора. Очевидно, что от его

ресурсных характеристик зависят, надежность работы и характеристики двигателя в целом.

Автором приведены данные, что расположение катода-компенсатора относительно среза ускорителя определяет потенциал пучка, который влияет на тяговые характеристики двигателя и ресурс работы, который зависит от тока ионов пучка, попадающих на элементы конструкции катода – компенсатора КК.

С целью определения оптимального расположения катода - компенсатора были проведены работы по исследованию: механизма распыления элементов КК, влияния материала поджигного электрода на параметры работы двигателя, структуры ускоренного ионного потока в зоне размещения КК, влияния параметров магнитного поля в зоне размещения КК на выходные параметры работы и ресурс двигателя.

На основании этих исследований были выработаны рекомендации по определению оптимального места размещения катода за срезом СПД. Для обеспечения ресурсных характеристик КК необходимо устанавливать его под таким углом и в той зоне, где он будет менее подвержен действию потока ионов из СПД. Это можно реализовать 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, КК рекомендуется устанавливать в 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, 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. Кроме того были выработаны рекомендации по расположению основного и резервного КК с учетом направления азимутальной закрутки ускоренных ионов.

Эти рекомендации позволили разработать экспериментальные модели СПД с повышенными выходными и ресурсными характеристиками, которые содержатся в гл. 4.

Основное внимание было уделено модернизации магнитной системы базовой модели СПД-100, которая обеспечивала: формирование дополнительного запаса по индукции с целью обеспечения возможности функционирования двигателя в широком диапазоне регулирования, создание фокусирующей конфигурации магнитной линзы с большим градиентом магнитного поля при близкой к нулю или отрицательной индукции в зоне размещения анода и смещение её ближе к срезу, оптимизации положения КК относительно анодного блока двигателя. Эта задача была выполнена при расчёте МС двигателя. Результаты расчёта МС сравнивались с измерением магнитной индукции модернизированной

модели СПД-100М. Установлено, что разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 10 %.

Сравнительный анализ параметров СПД-100 с параметрами СПД-100М в контрольных точках (ток разряда 4,5 А, напряжение разряда 300 В) показало, что значение тяги и удельного импульса модернизированного двигателя возросли на 6 - 8 %.

Исследование распределения потока ионов из СПД-100М по сравнению с СПД-100 показало, что расходимость потока ионов из СПД-100М стало существенно меньше, полуугол расходимости (90 % ионного тока) струи двигателя СПД-100М ЕМ2 уменьшилось до 30° , а для двигателя СПД-100 – 45° .

Исследования ресурсных характеристик показали, что начальная скорость эрозии стенок РК усовершенствованного двигателя оказалась примерно в 2 раза ниже, чем у серийного.

После проведения оптимизации положения КК, скорость эрозии поджигных электродов уменьшилось на порядок.

В разделе 4.6 представлены рекомендации по проектированию магнитных систем СПД с требуемыми выходными и ресурсными характеристиками.

В заключении автор диссертации представляет основные результаты, полученные при модернизации магнитной системы, и отмечает, что методики и рекомендации внедрены при разработке перспективных двигателей и могут быть использованы при создании СПД нового поколения с повышенными ресурсными и выходными характеристиками.

Следует отметить, что проделанная работа имеет практическую ценность при разработке двигателей с улучшенными тяговыми и ресурсными характеристиками. Основные положения, которые выносятся на защиту обоснованы и не вызывают сомнения.

Достоверность, полученных в результате расчёта магнитных систем двигателя, увеличение ресурса двигателя, влияние топологии магнитного поля на характеристики двигателя подтверждена экспериментальными результатами.

Результаты работы докладывались на конференциях и опубликованы в статьях. В конце диссертации приведён список работ в количестве 117 работ, которые были использованы в процессе работы над диссертацией.

Вместе с тем следует отметить и недостатки. Известно, что из-за наличия изменения плотности плазмы по радиусу канала двигателя вдоль магнитной силовой линии появляется градиент электронного давления. Это приводит к тому, что вдоль магнитной линии устанавливается некоторая постоянная величина, которая называется термализованным потенциалом. Эквипотенциальность магнитной силовой линии нарушается. Известно, что это ухудшает формирование потока ионов в канале СПД. Хотя это явление отмечается в работе, однако в какой степени оно оказывает влияние на характеристики двигателя, не обсуждается.

При рассмотрении эрозии канала при столкновении ионов пучка со стенками канала не были использованы исследования по катодному распылению. Известно, что катодное распыление носит пороговый характер (распыление начинается при фиксированной энергии ионов), получены зависимости скорости распыления от параметров ионного пучка и состояния поверхности. Эти данные могли бы дополнить исследования эрозии канала двигателя.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне. Рекомендации, изложенные в диссертации, будут способствовать созданию лётных моделей плазменных двигателей с более высокими техническими характеристиками.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Представленная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор, Митрофанова Ольга Александровна заслуживает присвоения степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов.

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»
адрес 125284 Москва, Беговая ул. д. 28-30 кв.82.
т. 499- 196 9027,
электронная почта Smimov_VA@nrcki.ru

Смирнов В.А.

подпись СМИРНОВА В.А удостоверяю
Заместитель директора по научной работе
–главный научный секретарь,
доктор физико-математических наук



Ильгисонис В.И.

30.10.15.