

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора **М.К. Марахтанова** на диссертацию **О.А. Митрофановой** «Влияние величины и топологии магнитного поля на интегральные характеристики стационарных плазменных двигателей» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Рецензируемая диссертация состоит из 147 страниц текста, включающего в себя 18 таблиц и 124 рисунка. Список литературы содержит 117 наименований. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным Министерством образования и науки Российской Федерации. Результаты диссертации опубликованы в 9-ти статьях и докладах (в том числе в 4-х журналах из списка ВАК) и в одном патенте РФ.

**Актуальность избранной темы.** Электроракетные двигатели и, в частности, стационарный плазменный двигатель (СПД) стали в наше время широко применяться для космических полетов. Магнитное поле, его индукция и распределение в канале влияют на основные (интегральные) характеристики двигателя: ресурс, удельный импульс и КПД. Конечной целью рецензируемой работы является оптимизация геометрии или топологии магнитного поля, для того чтобы двигатель лучше работал. В этом, на мой взгляд, и заключается актуальность диссертации.

**Научные положения диссертации, её выводы и рекомендации** надежно обоснованы в обзоре исследований других авторов и теоретическим анализом экспериментального материала, полученного самой Ольгой Александровной.

**Научная новизна работы** заключается в том, что соискательница предложила оригинальную систему уравнений, позволяющую определить распределение магнитной индукции как внутри канала СПД, так и на его границах. Сопоставила результаты решения с распределением параметров плазмы в канале. Затем она совместила распределение магнитной индукции и параметров плазмы с профилем и глубиной уноса материала изолятора. Данные относительно последних величин получены в экспериментах, проведенных с участием Ольги Александровны. Новым является предложение и частичное решение комплексной задачи (магнитная индукция – параметры плазмы – унос изолятора СПД), детальное решение которой имеет существенное значение для конструирования и производства электроракетных двигателей типа СПД–ДАС.

Диссертация написана соискательницей самостоятельно, несет черты внутреннего единства, содержит новые научные результаты и положения, которые убедительно аргументированы.

В диссертации приведены сведения о практическом использовании данных, полученных в работах ОКБ «Факел» с участием соискательницы.

**Практическая ценность диссертации** состоит в том, что, пользуясь данными из её содержания, можно улучшить параметры СПД на этапе как проектирования, так и изготовления двигателя, предназначенного для космических операций.

**Публикаций и докладов** о данной работе сделано автором вполне достаточно для её защиты в качестве кандидатской диссертации.

По установившейся традиции диссертация состоит из введения и четырех глав.

**Во введении** кратко определены объект исследования, обоснованы постановка задачи и актуальность решаемой проблемы, область практического приложения материалов диссертации. Названы возможности компьютерных программ, использованных в диссертации, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы и все вопросы, необходимые для «введения».

**В первой, обзорной, главе** изложен полезный материал об исследованиях известных ЭРД различных типов (преимущественно СПД, выпускаемых ОКБ «Факел»). Здесь, например, дана таблица 1, материал которой будет весьма полезен для аналитических обобщений любознательных читателей. Фотографии двигателей, прошедших ресурсные испытания, также поучительны формами и профилем износа изоляторов и катодных узлов. Анализируя только этот материал, можно наметить пути новых исследований СПД. В первой главе наглядно показана роль магнитного поля в формировании потоков плазмы в канале двигателя, а также в уносе массы конструктивных узлов СПД, включая катод-нейтрализатор. По материалам главы можно составить задание на основные задачи диссертации. Материал главы снабжен хорошими иллюстрациями и может стать полезным любому исследователю или разработчику СПД.

**Во второй главе** (36 стр. текста) изложена суть диссертации. Здесь даны основы расчета магнитного поля в СПД по методике, предложенной автором. Предварительно сделан обзор конфигураций магнитного поля в двигателях ОКБ «Факел». Считаю, что главу следовало бы начать с принципиальной схемы двигателя, как, например, на рис. 1, но проставить на ней основные размеры двигателя в буквенных обозначениях, взяв их из текста. Здесь же привести электросхему с диапазонами электрических параметров. Это поможет читателю представить себе суть математической модели, предлагаемой автором для расчета магнитной системы. Слишком подробно говорится о подготовке исходных данных – это дает представление о математической модели, но не проясняет физику магнитных потоков.

Отмечу, что расчет магнитного поля принято вести в символах вектора магнитной индукции  $B$ . При переходе к расчетам с использованием скалярного магнитного потенциала  $\varphi$  (вековая традиция) или, например, к оценке петли гистерезиса уместно обращение к вектору напряженности магнитного поля  $H$ . Но в двух написанных рядом законах, уравнения (2.2) и (2.3), следует использовать что-то одно, а именно, вектор  $B$ . Отмечу также, что в математической модели использованы  $\Omega$  — области и подобласти расчета. Они имеют свою геометрическую интерпретацию, схему которой следовало бы привести в диссертации для лучшего восприятия и для большего доверия к приведенной модели.

Расчет магнитной системы построен на переходе от вектора магнитной индукции к магнитному потенциалу. По методике расчета всё дано: от подготовки исходных данных до анализа полученных результатов. Одна группа результатов показана в виде диаграммы распределения магнитной индукции в элементах магнитной системы СПД, рис 25, 26 в диссертации и рис.1 в реферате. Это интересно и полезно для конструкторов СПД. Хорошо представлены сведения о существующих магнитных материалах в таблицах 3–5.

Практически интересна, а методически характеризует соискательницу как пытливого исследователя, экспериментальная проверка результатов математического расчета. Они подтвердили локализацию точек или сечений насыщения магнитопровода. Полученные знания необходимы, во-первых, для оптимизации геометрии и массы магнитной системы, а также затрат электроэнергии на её питание. Во-вторых, они помогают организовать эффект магнитоплазменной линзы, контролирующей истечение ионов из канала СПД. На мой взгляд, вторая глава дает отличные результаты работы, выполненной в рамках кандидатской диссертации.

Третья глава (49 стр. текста) посвящена изучению зависимости ресурса СПД от величины и конфигурации магнитной индукции в двигателе. Исследована работа катода-компенсатора в связи с его положением в магнитном поле двигателя. Метод оценки эрозии элементов двигателя состоит в том, что вначале составляют карту границ эрозии на основании расчетных данных (расчет по предложенной математической модели). Затем полученные результаты сравнивают с результатами натуральных испытаний. Для анализа использовались двигатели различных типоразмеров. Результаты моделирования близки к экспериментальным. Практически весьма полезна работа с различными катодами-компенсаторами, помещаемыми в плазменные потоки различной структуры. Её результатом явились рекомендации по оптимальному положению катода в СПД. Что касается аббревиатур и других сокращений, то, по-моему, автор злоупотребляет ими. Например, она часто пользуется значком  $U_{кв}$ , см. уравнение (3.1), обозначая им важный

потенциал, присущий стендовым испытаниям двигателя. Но таким значком обозначают напряжение (а также ток) короткого замыкания в электротехнике, которая появилась задолго до первых ЭРД. Богатый экспериментальный материал, вошедший в третью главу, следует использовать, на мой взгляд, для широкой научной публикации.

**Четвертая глава** называется «разработка экспериментальных лабораторных моделей СПД с повышенными выходными и ресурсными характеристиками». Это название не совсем верное, поскольку, использованное в диссертации, оно подразумевает, что автор самостоятельно разработала несколько новых моделей двигателей и испытала их на стенде. В действительности здесь дано описание стендов, на которых испытывались СПД. Автор проверяла выводы своей расчетной модели по их влиянию на параметры и геометрию двигателей, прошедших стендовые испытания, описанные в данной главе. Здесь проанализированы основные параметры двигателей, в основном модели СПД-100М. Автор связала их со своей математической моделью, по крайней мере, на сопоставлении профилей эрозии стенок канала со структурой магнитной линзы. Данные, приведенные в главе, послужат надежным экспериментальным материалом для проектировщиков СПД. Отмечаю, как недостаток следующее: температуру, объемы, давление следует измерять в системе СИ. Хотелось бы, таблицу давлений видеть измеренными в Па (система СИ – обязательна в СССР и РФ, хотя американцы любят измерять «вакуум» в миллиторах).

Результаты исследования О.А. Митрофановой, представленные в виде методик и рекомендаций, внедрены в ОКБ «Факел» при разработке новых СПД с повышенными удельными параметрами. Это является, на мой взгляд, высокой оценкой «основных научных результатов диссертации и их практического значения».

В заключение должен сказать, что текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

**Недостатки** бывают в любой работе, и некоторые из них я отмечу по традиции.

1. О базовых уравнениях. В тексте диссертации, в формулах на стр. 13, пропущена величина ускорения свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  в уравнениях с удельным импульсом (в тексте автореферата этих формул нет). В уравнениях (2.2) и (2.3) должно быть однообразие использованных векторов: или магнитная индукция  $B$ , или напряженность магнитного поля, см. уравнения (1) и (22) в автореферате.
2. В начале второй главы требуются графические схемы для наглядной оценки достоверности предложенной математической модели. Такими же схемами следовало бы изобразить векторы поля на поверхности магнитпроводов с простыми и сложными границами (граничные условия).



3. В тексте много аббревиатур, трудно читать. Все аббревиатуры следовало бы вынести на первые страницы диссертации, чтобы читатель не терялся в догадках об их смысле по ходу текста.

4. «Пониженная дисциплина» в использовании технических терминов: следует говорить не о нагреве конструкции СПД, а называть её температуру, стр. 49; стендовые испытания двигателя не следует называть огневыми и т.д.

В целом считаю, что данная квалификационная работа весьма полезна. Она соответствует положению о порядке присуждения ученых степеней, а её автор, Ольга Александровна Митрофанова, заслуживает ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Плазменные энергетические  
установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана

01 ноября 2015 года.

М.К. Марахтанов.

Подпись профессора М.К. Марахтанова заверяю,  
директор НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана



В.И. Крылов