

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Меркурьева Дениса Владимировича

«Способы повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

1. Актуальность темы исследований. Стационарные плазменные двигатели (СПД) используются в космической технике, начиная с 70-х годов прошлого столетия, для коррекции и стабилизации орбиты искусственных спутников Земли (ИСЗ). В СССР и России наибольшее распространение получили двигательные установки на основе СПД, так как этот тип двигателей обладает наименьшей ценой тяги (электрическая мощность, потребляемая двигателем, отнесенная к величине тяги). По мере развития космической техники мощность источников электрической энергии на борту КА возрастает. В настоящее время она достигает 20 кВт на так называемых тяжелых ИСЗ и прогнозируется дальнейший ее рост до 50-100 кВт. Для коррекции и стабилизации орбиты таких ИСЗ электрические ракетные двигатели должны обладать высоким удельным импульсом (25 - 30 км/с).

В последнее десятилетие электрические ракетные двигатели (ЭРД) стали применяться в качестве основного источника тяги для межпланетных перелетов и полетов в дальний космос. В этом случае удельный импульс тяги ЭРД должен быть (30 -50) км/с и более. Кроме того, современные ЭРД должны обладать высоким коэффициентом полезного действия (КПД) и большим ресурсом. К настоящему времени время в ОКБ «Факел », исследовательском центре имени М.В.Келдыша и НИИ ПМЭ МАИ накоплен многолетний опыт по разработке ЭРД на основе СПД. Поэтому разработка СПД, обладающими высокими удельными импульсами, является весьма актуальной задачей. С учетом того, что опыт по разработке двигательных установок на основе других типов ЭРД, таких как ДАС и ионные двигатели,

в России существенно меньше – создание ЭРД с высоким импульсом тяги на основе СПД является экономически обоснованным для нашей страны.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. На основании тщательного анализа работ, направленных на увеличение удельного импульса СПД, автор диссертационной работы пришел к выводу, что необходимо исследовать возможность создания СПД с необходимым ресурсом и КПД, стабильно работающем при напряжениях разряда до (800 - 1000)В и выше путем улучшения конфигурации магнитного поля в канале двигателя, увеличения максимального значения индукции магнитного поля и максимального сужения и выдвижения максимума магнитного поля за срез магнитных полюсов двигателя при соответствующем этому сужению и выдвижению увеличении плотности расхода рабочего газа через ускорительный канал. Эти способы увеличения удельного импульса СПД в рассматриваемой диссертации выносятся на защиту. Для обоснования этих способов были разработаны модели двигателей СПД-100П, СПД-85П, СПД-100ПМ, СПД-140ПМ с магнитным экраном, выполненным из пермендюра, расположенным внутри разрядной камеры двигателя. Это позволило создать магнитную систему с необходимыми характеристиками, уменьшить площадь поперечного сечения разрядной камеры и дало возможность использовать двухступенчатую систему питания разряда. Все перечисленные модели прошли параметрические испытания, при проведении которых снимались вольт-амперные характеристики, зависимости тяги и КПД от величины расхода рабочего тела, магнитного поля и напряжения разряда. Эти измерения проводились на стенде У-2В-1 в НИИ ПМЭ МАИ, оснащенным современной криогенной системой откачки производительностью 100000л/с. Система измерения позволяет определять электрические параметров с точностью $\pm 1\%$. и магнитные параметры с точностью $\pm 3\%$. Оценка ресурса моделей проводилась по разработанной в НИИ ПМЭ МАИ поэтапной методике. Эта методика предполагает краткосрочные до 50 часов испытания модели с измерением профиля износа кромок разрядной камеры под

воздействием потока ионов. В результате измерений, проведенных на моделях СПД-100П и СПД-85П, было показано, что перенос магнитного экрана в разрядную камеру позволяет получить необходимые параметры магнитного поля и удельный импульс двигателя на уровне 30км/с. Однако при проведении краткосрочных ресурсных испытаний было обнаружено резкое ухудшение характеристик двигателей и неравномерный прогрев разрядной камеры. Эти эффекты происходили из-за увеличенной ширины зоны эрозии камеры и загрязнения магнитного экрана распыленными частицами выходных керамических вставок. На основании полученных результатов были разработаны модели СПД-100ПМ и СПД-140ПМ. В этих моделях ширина канала разрядной камеры была уменьшена, конструкция керамических вставок разрядной камеры позволила закрыть от разряда выходные кромки магнитного экрана. Благодаря проведенным расчетам магнитных полей удалось увеличить градиент магнитного поля по оси разрядной камеры и вынести максимум магнитного поля максимально за срез магнитных полюсов системы. Проведенные параметрические и ускоренные ресурсные испытания этих моделей показали устойчивую работу модели СПД-100ПМ при «анодном» удельном импульсе на уровне 30км/с, а для модели СПД-140ПМ удалось получить «анодный» удельный импульс 40км/с. Проведенные измерения и расчеты, представленные в диссертации, являются надежным обоснованием выводов сформулированных в заключении диссертации.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Новизна работы состоит в том, что в диссертации доказана возможность получения в СПД с магнитным экраном, расположенным внутри разрядной камеры, удельного импульса до 40км/с при высоком КПД и приемлемом ресурсе работы за счет согласованной оптимизации магнитного поля и плотности расхода в ускорительном канале. Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов измерений, полученных на различных моделях СПД, а также совпадением результатов испытаний

моделей в НИИ ПМЭ МАИ с результатами испытаний этих моделей в ОКБ «Факел».

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

В работе показана перспективность схемы СПД с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры, для создания двигателей с высоким удельным импульсом. Определены характеристики двигателей такой схемы в расширенном диапазоне рабочих напряжений от 800 до 1400В. Разработаны способы повышения тягового КПД СПД при работе на режимах с высокими удельными импульсами тяги; рекомендации по выбору схемы питания разряда в двигателе такой схемы и параметров его конструкции, обеспечивающие возможность достаточно эффективной работы двигателя с мощностью до 5 кВт на режимах с удельным импульсом тяги до 35км/с. Созданы лабораторные модели двигателей СПД-100ПМ и СПД-140ПМ, способные работать как в одноступенчатом, так и в двухступенчатом режимах с удельными импульсами тяги до 30км/с и 35км/с, соответственно, и тяговым КПД более 50%. Эти модели могут быть использованы в качестве прототипов при разработке опытных образцов СПД с высоким удельным импульсом тяги.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты работы рекомендуется использовать при разработке летных образцов ЭРД на основе СПД с удельным импульсом выше 30км/с в ОКБ «Факел» и исследовательском центре имени М.В. Келдыша.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенности. Работа представляет собой рукопись объемом 138 страниц печатного текста, включая 63 рисунка, 15 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 94 наименований. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Во введении раскрыта цель данной работы, ее новизна, практическая значимость. Приводятся основные положения, выносимые на защиту. Первая глава посвящена обзору работ по данной проблеме. На основе обзора сформулированы конкретные задачи

исследований. Во второй главе приводятся результаты исследования моделей с магнитным экраном, расположенным внутри разрядной камеры. Третья глава посвящена результатам исследования модернизированных моделей СПД. В четвертой главе рассмотрены способы защиты катода от распыления энергичными ионами, которые характерны для разработанных моделей СПД. Диссертация является вполне законченным исследованием, показывающим возможность создания СПД с высоким удельным импульсом. Диссертация написана хорошим литературным языком. Следует отметить, что основные результаты диссертационного исследования в необходимом количестве опубликованы в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК, и докладывались на международных конференциях. Автореферат с достаточной полнотой отражает основное содержание диссертации.

7. Замечания по работе. В качестве замечаний и недостатков можно отметить следующее:

1. Отсутствие ресурсных испытаний моделей СПД 100ПМ и СПД 140ПМ несколько снижает степень достоверности сделанных выводов.
2. При изложении материала допущены неопределенности. Например, стр. 100. "Моделирование магнитного поля показало, что при выбранных размерах разрядной камеры и магнитного экрана и при максимально выдвинутом положении разрядной камеры и экрана...". Куда все это двигается максимально и относительно чего максимально не ясно. Такие неопределенности есть почти при каждом описании конструкции.
3. На рисунках не обозначены защитные экраны (козырьки) для уменьшения осаждения распыленных частиц на магнитном экране.

8. Заключение

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости работы и носят рекомендательный характер. Диссертационная работа Меркурьева Дениса Владимировича «Способы повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с

высокими удельными импульсами тяги», является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых внесет значительный вклад в развитие экономики и повышение обороноспособности РФ. Считаю, что представленная к защите работа по своей актуальности, научной новизне, научно-техническому уровню и практической значимости полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ о присуждении учёных степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов", а её автор Меркурьев Денис Владимирович заслуживает присуждение учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры физики Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА), 119454, Москва, Проспект Вернадского, д.78, тел. 89260835007, E-mail: bishaev@mirea.ru

А.М. Бишаев
6. 11. 15

Бишаев Андрей Михайлович

Подпись Бишаева А.М. удостоверяю

У.О. Кагамышева *Управление*

Дата

Гербовая печать



С.В. Кагамышева