

Отзыв

официального оппонента

доктора технических наук **Ходненко Владимира Павловича**

на диссертационную работу **Кожевникова Владимира Владимировича** «Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы работы

Создание долгоживущих малых космических аппаратов (МКА) массой до 1000 кг вынуждает разработчиков использовать электроракетные двигатели (ЭРД) в составе двигательных установок (ДУ) для решения задач орбитальной коррекции. Применение ЭРД позволяет заметно снизить массу ДУ за счёт сокращения запасов рабочего тела, необходимого для выполнения маневров. Для электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) МКА необходимы двигатели, отличающиеся низким энергопотреблением (до 300 Вт), длительным ресурсом работы (до 20000 часов) и достаточной величиной тяги.

В представляемой работе рассматривается высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД). Он состоит из следующих основных узлов: разрядной камеры (РК) с расположенным на её внешней стенке высокочастотным индуктором, ионно-оптической системы (ИОС) для извлечения ионов из плазмы РК и нейтрализатора заряда ионного пучка электронами.

Керамическая стенка РК и относительно небольшое смещение потенциала эмиссионного электрода (порядка 20...25В) позволяет гарантировать в сравнении, например, с двигателем Кауфмана отсутствие распыления элементов РК в плазме ВЧИД, что обеспечивает ресурс свыше 20000 часов.

Диссертационная работа Кожевникова В.В. посвящена экспериментальному исследованию распределений локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД, разработке автоматизированной методики диагностики плазмы с

помощью тройного электростатического зонда, а также созданию упрощённой численной модели для оценки распределений локальных параметров в РК двигателя.

Получение двумерных распределений температуры и концентрации электронов в объеме плазмы в РК ВЧИД для разных режимов работы двигателя является необходимым для анализа особенностей ионизации рабочего тела (р.т.) и выбора оптимальной геометрии камеры при разработке новых моделей высокочастотных ионных двигателей, что и обуславливает актуальность темы диссертации.

Диссертация содержит введение, три главы содержательной части, заключение, а также список использованной литературы, содержащий 98 наименований. Текст диссертации на 139 страницах в достаточной мере проиллюстрирован.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

На основании анализа проблемных вопросов автором была сформулирована основная задача исследования — разработка экспериментальной методики для изучения распределений локальных параметров в плазме ВЧИД малой мощности и создана лабораторная модель двигателя, которая при токе ионного пучка 120 мА и ВЧ мощности 65 Вт обеспечивала тягу двигателя 8,6 мН, цену иона 490 Вт/А и коэффициент использования р.т. 0,65. Указанные характеристики соответствовали параметрам летных образцов ВЧИД.

Большая часть диссертационной работы посвящена описанию разработанной методики зондовой диагностики параметров плазмы. Автор, на примере результатов, полученных другими исследователями, обосновывает применимость метода тройного электростатического зонда для регистрации температуры и концентрации электронов в индукционном разряде ВЧИД. Основной отличительной чертой данного метода является проведение измерений без дополнительных средств аппаратной фильтрации в цепях регистрации, искажающих

сигнал, что повышает достоверность регистрируемых параметров и позволяет убедиться в аккуратности поставленного эксперимента. В тексте приводятся результаты экспериментальных измерений в объеме РК ВЧИД в виде набора двумерных распределений температуры электронов и их концентрации для пяти уровней массового расхода р.т. - ксенона. Причём для каждого из набора параметров исследовались два режима работы двигателя: с извлечением ионного пучка и без него. Анализ полученных данных показал, что режим с извлечением ионного пучка является более эффективным режимом для данной модели ВЧИД. Возрастает эффективность ввода энергии в разряд, что связывается с увеличением толщины аномального скин-слоя в плазме. При этом в режиме с извлечением пучка наблюдается снижение потребляемой ВЧ мощности на 4...8 Вт при разных расходах рабочего тела.

Экспериментальные данные сравниваются автором с результатами других исследователей, при этом подтверждается качественное совпадение картины распределения параметров.

На основе полученных экспериментальных данных автором впервые была создана упрощённая инженерная модель, позволяющая рассчитать параметры заряженных частиц плазмы в РК ВЧИД в режиме без извлечения ионов. Рассчитанные по данной модели распределения качественно повторяют экспериментальные (количественное расхождение не превышает 20%).

Достоверность полученных автором результатов диссертации обусловлена использованием корректной методики измерений, основанной на апробированных ранее подходах, проведением экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании. Автором проведено сравнение экспериментальных результатов работы с экспериментальными данными других исследователей. Разработанная методика численного моделирования параметров разряда верифицировалась по результатам экспериментальных исследований.

Научная новизна результатов исследования

В рамках диссертационной работы проведена серия экспериментальных исследований локальных параметров плазмы ВЧИД малой мощности, в ходе которых применялась разработанная автором автоматизированная методика зондовой диагностики. Проанализированы различные режимы работы двигателя (разные уровни расхода р.т. с извлечением и без извлечения ионного пучка ИОС). Показано существенное изменение распределений температуры и концентрации электронов при переходе из режима индукционного разряда в РК в режим ускорения ионного пучка. Исследование параметров плазмы в РК ВЧИД малой мощности с извлечением ионного пучка проведено впервые.

Практическая значимость результатов исследования

Автором была создана специальная лабораторная модель ВЧИД малой мощности, приспособленная для проведения экспериментальных исследований с применением тройного электростатического зонда, внедряемого сквозь отверстие в стенке РК двигателя. Разработана частично автоматизированная методика зондовой диагностики двумерных распределений температуры и концентрации электронов в разрядной плазме ВЧИД. Приведён анализ экспериментальных распределений локальных параметров для нескольких режимов работы двигателя (сравнивались разные уровни массового расхода ксенона в диапазоне 0,16...0,24 мг/с, при этом для каждого из расходов проводилась регистрация параметров плазмы, как для режима с извлечением пучка ионов, так и без него). С использованием экспериментальных результатов построена упрощённая численная модель для расчёта распределения концентрации плазмы ВЧИД малой мощности.

Результаты работы изложены в 6 научных статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК, и в 3 статьях в изданиях, индексированных в международной реферативной базе (Scopus), а также в одном патенте на полезную модель.

В диссертационной работе имеются и некоторые недостатки:

1. Ограничения условий проведения эксперимента не позволили автору провести измерения локальных параметров в номинальном режиме работы двигателя. В результате чего не удалось получить истинные количественные параметры, необходимые для моделирования рабочего процесса. Необходимо было бы попробовать обойти эти ограничения, чтобы результаты эксперимента точнее отражали реальный режим работы ВЧИД.

2. Предложенная автором упрощённая численная модель не предполагает возможность расчёта режима работы двигателя с извлечением ионного пучка, что ограничивает интерес к ней. С практической точки зрения следовало бы рассмотреть в модели именно процесс извлечения пучка в ходе работы двигателя.

3. Автору следовало бы привести больше случаев применения ВЧИД в составе реальных ЭРДУ. Например, самый первый запуск ВЧИД «RIT-10» на борту спутника EURECA в 1992 году.

4. Текст диссертации содержит ряд опечаток (например, на стр. 6 стоит запятая в словосочетании «наиболее оптимальные параметры», на стр. 81 искажён порядок букв в слове «зондодержатель», на стр. 98 пропущен предлог «на» перед «рис. 2.32 и 2.33»).

Отмеченные недостатки не снижают научной ценности проведенного исследования и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты работы Кожевникова В.В. могут быть использованы при разработке новых моделей высокочастотных ионных двигателей, а автоматизированная методика зондовой диагностики может найти применение при исследовании высокочастотных разрядов.

Диссертационная работа Кожевникова В.В. выполнена на достаточно высоком научном уровне, проведённое исследование отличается практической направленностью. Материал изложен грамотным техническим языком, отражён личный вклад автора в результат исследования. Автореферат отражает существо диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой.

Рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Изложенный в ней материал соответствует паспорту специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», а её автор, Кожевников Владимир Владимирович, заслуживает присуждение учёной степени кандидата технических наук.

Главный научный сотрудник отдела 21, АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и ВХ В.П. Ходненко электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», доктор технических наук, профессор

Подпись официального оппонента д.т.н., профессора Ходненко В.П. удостоверяю

Учёный секретарь АО «ВНИИЭМ» к.в.н., доцент

«Корпорация



А.В. Пинчук

Полное название организации: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна».

Почтовый адрес: 107078, РФ, г. Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1

Телефон: (495) 608-84-67, (495) 365-56-10

Электронная почта: vniiem@orc.ru, vniiem@vniiem.ru

05.12.2017 *Pinchuk*