

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата технических наук, доцента

Духопельникова Дмитрия Владимировича

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 избранной темы диссертации

Интерес к малым космическим аппаратам (МКА) для решения целого ряда прикладных задач использования космического пространства определяется с коммерческой привлекательностью, которая связана с сокращением сроков производства и вывода аппарата на целевую орбиту. В качестве двигательной установки для МКА часто рассматривается электроракетная двигательная установка (ЭРДУ).

Основными задачами при создании ЭРДУ для МКА являются: обеспечение высокого удельного импульса двигателя ($> 35\ 000$ м/с), относительно высокой тяги (> 10 мН), малого электропотребления и большой длительности работы. Например, при эксплуатации низкоорбитальных МКА выдвигается требование поддержания положения на орбите в течении 5-15 лет в условиях постоянного аэродинамического торможения в верхних слоях атмосферы Земли.

Для применения ЭРДУ МКА в последние годы проявляется интерес к высокочастотным ионным двигателям (ВЧИД). В данном типе двигателя ионизация рабочего тела осуществляется в индукционном высокочастотном разряде, а ускорение полученных ионов производится в зазоре сетчатых электродов электрическим полем – в так называемой ионно-оптической системе (ИОС). При этом ионизация в ВЧИД происходит при значительных



потерях энергии и образовавшихся ионов, что снижает конкурентоспособность данного типа двигателя. Пути повышения эффективности ВЧИД лежат через исследования и совершенствование рабочих процессов в нем, в частности, механизмов ионизации рабочего тела.

В рамках своей работы диссертант рассматривает научную проблему, связанную с диагностикой локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД малой мощности. Учитывая потенциальное применение данного двигателя в составе МКА, автор проводит исследование на модели двигателя, удовлетворяющую следующим требованиям: потребляемая мощность < 300 Вт; тяга > 8 мН; удельный импульс $> 35\ 000$ м/с; к.п.д. > 50 %. Направление исследования и выбранные параметры двигателя делают рассматриваемую автором тему работы актуальной для применения на МКА.

Содержание работы

Текст диссертационной работы Кожевникова В.В. включает введение, три главы содержательной части, заключение, а также список литературы, содержащий 98 наименований. Текст достаточно проиллюстрирован схемами, фотографиями и таблицами.

Во введении автором рассмотрена актуальность темы диссертации, перечисляются объект и предмет исследования, ставится цель и задачи исследования. Автор обозначает научную новизну, практическую значимость и приводит научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит сведения о состоянии разработки и применения ВЧИД, принципе его работы, особенностях и методах его исследований. Формулируются основные задачи диссертационного исследования:

- разработка методики зондовой диагностики локальных параметров плазмы (температуры и концентрации электронов) тройным электростатическим зондом в разрядной камере лабораторной модели ВЧИД малой мощности;

- получение двумерных распределений локальных параметров плазмы в объеме разрядной камеры и сравнение их количественных значений с результатами других авторов;
- создание математической модели для анализа распределений концентрации частиц в плазме разрядной камеры ВЧИД.

Вторая глава содержит схемы и описания лабораторной модели ВЧИД (объекта исследования) и испытательного стенда. Подробно описана методика измерения локальных параметров плазмы ВЧИД тройным электростатическим зондом, приведён расчёт геометрических параметров зонда. Описана методика обработки данных, собираемых зондом, представлены результаты исследований интегральных параметров исследуемого ВЧИД и локальных параметров плазмы в его разрядной камере.

В третьей главе проведено сравнение полученных экспериментальных данных с данными других исследователей, описана инженерная модель процесса плазмообразования в разрядной камере ВЧИД. Рассмотренная модель верифицирована с использованием двумерных распределений локальных параметров, представленных во второй главе.

Заключение содержит основные результаты и выводы диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Степень обоснованности определяется чёткими границами, поставленных в работе задач и их решением с использованием современных измерительных средств и апробированных методик измерений и расчетов. Автор использовал известные ранее и доверенные методики исследования интегральных параметров электроракетных двигателей и локальных параметров плазмы, модифицируя их для конкретной задачи в характерных условиях ВЧИД малой мощности. Автор в достаточной мере учёл приборные и физические погрешности, вносимые в результаты измерений параметров ВЧИД, а все полученные экспериментальные и численные результаты

сравнивал с результатами для близких случаев из опубликованных работ других авторов. Поэтому выводы, полученные Кожевниковым В.В. можно назвать обоснованными и достоверными.

Научную новизну представляют, полученные в диссертационной работе двухмерные распределения локальных параметров в разряде ВЧИД. Для диагностики температуры электронов и концентрации заряженных частиц в плазме разряда автором была разработана автоматизированная методика диагностики, использующая тройной электростатический зонд. Диссертант обосновывает применимость данного зонда в условиях разряда в ВЧИД малой мощности без дополнительных элементов аппаратной фильтрации сигнала зонда. Используя такой зонд, Кожевников В.В. получил распределения температуры и концентрации в разряде ВЧИД малой мощности для нескольких режимов работы двигателя при разных расходах ксенона, в том числе с ускорением ионного пучка и без ускорения. Исследования в режиме с ускорением ионного пучка в двигателях подобной конфигурации и мощности проводились впервые. Методика численного моделирования концентрации заряженных частиц в разряде ВЧИД, разработанная автором, достаточно проста и позволяет сделать расчёт двумерного распределения концентрации. Данную методику вполне можно рекомендовать для оценок при разработке новых моделей двигателей.

Достоверность полученных автором результатов вполне обосновывается использованием корректной методики измерений; проведением экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании; совпадением результатов численного моделирования с экспериментом, а также с данными других исследователей.

Замечания и рекомендации

При детальном рассмотрении текста диссертационной работы Кожевникова В.В. можно сформулировать следующие замечания:

1. Расчёт геометрических параметров тройного электростатического зонда проведен только для обобщенных параметров плазмы ВЧИД,

полученных из работ других авторов в условиях, отличающихся от параметров в разрядной камере ВЧИД малой мощности (см. раздел 2.4.2 диссертации). Автором не проведена поверка погрешности зонда при измеренных в ходе эксперимента физических условиях. При оценке погрешности не учитывается входной ток усилителя осциллографа (и не обосновывается пренебрежение этим током). Данный ток является током зонда P2, который принимается за ноль.

2. Автором проведены исследования при ограничении уровня напряжения на эмиссионном электроде, вызванном возможным пробоем изоляции в разделительном трансформаторе. Следовало бы рассмотреть возможности модернизации системы зондовых измерений с тем, чтобы проводить эксперимент с номинальной разностью потенциалов в ИОС. Измерение параметров плазмы при номинальном режиме работы модели ВЧИД представляет большой интерес, поскольку в этом режиме количественные изменения локальных параметров плазмы в разрядной камере, очевидно, проявились бы ещё сильнее.

3. Предложенная численная модель имеет множество допущений, снижающих её точность, она позволяет только количественно судить о поведении концентрации плазмы. Необходимо было бы при её разработке учитывать характер поведения температуры электронов, полученный в экспериментальной части работы.

4. В тексте диссертации имеются ряд неточностей и недоработок, не снижающих ценность диссертационной работы. Так на рисунке 2.1 со схемой конструкции лабораторной модели ВЧИД отсутствует метка позиции «4» при этом метка позиции «3» повторяется два раза. Эта ошибка может усложнить восприятие схемы двигателя. На рисунках 2.25-2.29 указаны двумерные распределения температуры и концентрации электронов в плазме. Изменения параметров на графиках показано только цветом, для наглядности следовало добавить изолинии температур и концентрации, как это было сделано автором в одной из его предыдущих работ. На странице 73 ошибочно указано «Соотношение токов U_1+U_2 и $U_1+U_3 \dots$ » вместо «Соотношение токов I_1+I_2 и $I_1+I_3 \dots$ ». На странице 71 диссертации, а также в автореферате, указывается,

что тройной электростатический зонд «...обеспечивает измерение трёх точек на зондовой характеристике: точки плавающего потенциала φ_f (является опорной точкой системы) и двух точек токов насыщения». В действительности, измеряется точка плавающего потенциала φ_f , точка ионного тока насыщения и точка между плавающим потенциалом и электронной ветвью насыщения.

Несмотря на данные замечания, диссертационная работа Кожевникова В.В. выполнена на высоком научном и техническом уровне. Рассматриваемой работе можно дать положительную оценку, отметив, что результаты работы имеют практическую ценность, для разработки новых моделей высокочастотных ионных двигателей и создания упрощённых методик исследования плазменных образований низкого давления. Результаты работы можно рекомендовать использовать при разработке новых моделей электроракетных двигателей на профильных предприятиях космической отрасли, а также в ходе учебного процесса при подготовке специалистов ВУЗах.

В качестве практической значимости результатов исследования следует отметить, что методика диагностики ВЧ плазмы тройным электростатическим зондом, частично доработанная автором работы, применима не только для исследования плазменных образований в ионных двигателях, но и в процессах ионно-плазменной вакуумной технологии, в частности системах очистки поверхности, системах травления микроструктур. Экспериментальные результаты, полученные в работе, могут использоваться для теоретического описания рабочего процесса в разряде ВЧИД и верификации численных моделей данного разряда. Разработанная численная модель применима для предварительной оценки распределения концентрации плазмы в ВЧИД малой мощности.

Основные результаты работы были изложены автором в 6 научных статьях, опубликованных в журналах, из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, и в 3 статьях в рецензируемых иностранных изданиях, входящих в международные реферативные базы (SCOPUS), а также в одном патенте на полезную модель.

Отмечаю, что содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

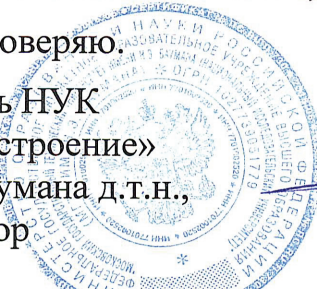
Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, изложенным в «Положении о порядке присуждения учёных степеней». В работе чётко показан личный вклад автора в полученный результат. Представленный в диссертации материал соответствует паспорту специальности 05.07.05 в пунктах 1, 2, 4, 10 и 13, а ее автор, Кожевников Владимир Владимирович, заслуживает присуждение степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Директор НОЦ «Ионно-плазменные технологии», доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук

Д.В. Духопельников

Подпись официального оппонента к.т.н., доцента Духопельникова Дмитрия Владимировича удостоверяю.

Руководитель НУК
«Энергомашиностроение»
МГТУ им. Н.Э. Баумана д.т.н.,
профессор



А.А. Жердев

Официальное название: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Почтовый адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон: +7 (499) 263-6043

Электронная почта: duh@power.bmstu.ru

07.12.2017 *Жердев*