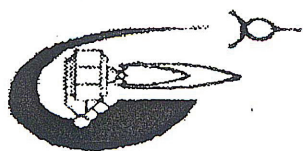


# ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ФАКЕЛ»  
ОКБ «ФАКЕЛ»



Россия 236001. г. Калининград обл., Московский проспект, 181,  
Факс: 8-(4012) 538-472. e-mail: info@fakel-russia.com  
ОКПО 07556982, ОГРН 1023901002927, ИНН 3906013389, КПП 392550001

УТВЕРЖДАЮ

ВрИО генерального конструктора

ФГУП ОКБ "Факел"



В. С. Жасан

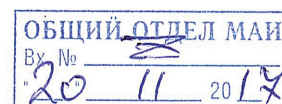
ноября \_\_\_\_\_ 2017 г.

## О Т З Ы В

на автореферат диссертационной работы Кожевникова Владимира Владимировича «Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук в диссертационный совет Д212.125.08 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (технические науки).

В России одним из основных эксплуатируемых электроракетных двигателей (ЭРД) является стационарный плазменный двигатель (СПД), за рубежом чаще применяется ЭРДУ с ионным двигателем (ИД). Данные типы ЭРД используют электростатический механизм ускорения пучка ионов: в объеме плазмы в СПД и в зазоре сетчатых электродов ионно-оптической системы (ИОС) ИД. Одним из перспективных типов ИД является высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД).

Проблемным научно-техническим вопросом создания ВЧИД является повышение КПД ВЧИД ММ при высокой цене иона 400...600 Вт/А, так как эти значения выше, чем у прочих типов летных ЭРД. С учетом этого актуальным является совершенствование процесса передачи энергии в плазму разрядной камеры (РК) ВЧИД ММ, с целью снижения затрат мощности на ионизацию. При реализации этой задачи необходимо проведение исследования локальных параметров плазмы в РК двигателя с использованием зондовой диагностики.



Поэтому актуальной и востребованной задачей является еще на этапе проектирования двигателей разработка расчетной тепловой модели ВЧИД. Разработка методики экспериментального измерения температур во ВЧИД важна при проведении исследовательских, доводочных и последующих испытаний ВЧИД.

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена исследованию локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности. Выбор направления исследования основан на недостаточной изученности процессов передачи энергии в плазму разрядной камеры (РК) двигателя, влияющих на затраты мощности на ионизацию и значительным влиянием геометрии РК новых моделей ВЧИД малой мощности, которые имеют разрядные камеры небольших размеров, на эффективность его рабочего процесса, и в конечном итоге характеристик тяги, удельного импульса тяги, ресурс работы двигателя..

**Научная новизна** данной работы заключается в том, что диссертантом разработана методика исследования локальных параметров плазмы в РК ВЧИД ММ с применением тройного электростатического зонда и специального алгоритма для обработки экспериментальных данных, позволяющая построить двумерные распределения локальных параметров плазмы в объеме РК; впервые проведено сравнительное экспериментальное исследование распределений локальных параметров плазмы в объеме РК ВЧИД в режимах с извлечением и без извлечения ионного пучка; предложена численная модель, позволяющая построить двумерные распределения локальных параметров плазмы в РК ВЧИД.

Стоит отметить разработанную автором инженерную модель для расчёта двумерных распределений концентрации заряженных частиц в индукционном ВЧ разряде. Данная методика позволяет оперативно оценивать основные параметры двигателя и отсеивать заведомо неудачные компоновочные решения его РК и индуктора и может быть рекомендована для оценки параметров индукционного разряда ВЧИД.

**Практическая значимость результатов работы.** Здесь стоит отметить разработанную при непосредственном участии автора лабораторная модель ВЧИД ММ, приспособленную для зондовой диагностики локальных параметров плазмы в разрядной камере двигателя. Лабораторная модель при токе ионного пучка 120 мА и ВЧ мощности 65 Вт обеспечивает следующие тяговые характеристики: тяга двигателя — 8,6 мН, цена иона — 490 Вт/А и коэффициент использования рабочего тела — 0,65, которые соответствуют параметрам летных образцов ВЧИД. Разработана методика автоматизированных измерений локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД ММ. Применение в методике тройного электростатического зонда позволило изучить распределения локальных параметров плазмы — температуры и концентрации электронов — в плазме РК на разных режимах работы двигателя. Обоснована достоверность и произведена верификация результатов измерений — погрешность определения значений локальных



параметров плазмы, как и для аналогичных плазменных образований, исследованных другими авторами, составляет не более 30 %. Экспериментальные результаты позволили впервые получить двумерные распределения локальных параметров плазмы в разрядной камере ВЧИД ММ при извлечении ионного пучка из ИОС двигателя. Сравнение с режимом без извлечения пучка показало, что происходит увеличение толщины аномального скин-слоя. Это повышает эффективность ввода энергии в разряд, о чем свидетельствует снижение потребляемой ВЧ мощности на 4...8 Вт. Разработана инженерная модель для расчёта двумерных распределений концентрации заряженных частиц в индукционном ВЧ разряде, которая может быть рекомендована для оценки параметров индукционного разряда в ВЧИД. Сравнение расчётных двумерных распределений параметров плазмы с экспериментальными данными свидетельствует об их качественном совпадении, количественное расхождение не превышает 20%.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается тем, что использована корректная методика измерений, основанная на апробированных ранее подходах; экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании; совпадением результатов численного моделирования с экспериментом, а также с данными других исследователей.

Результаты работы использованы при выполнении ОКР по Программе государственной поддержки по созданию высокотехнологичных производств, выполняемой с участием высших учебных заведений, проект «Создание высокотехнологичной производственно-испытательной базы для разработки, стендовой отработки и промышленного производства электроракетных двигателей нового поколения — высокочастотных ионных двигателей малой мощности» по договору № 02.G25.31.0072. Результаты работы использованы при выработке рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкций ВЧИД ММ

Личный вклад и апробация работы подтверждаются публикациями автора. По теме диссертации опубликовано: 3 научно-технических отчета, патент на полезную модель, тринадцать статей, в том числе шесть - в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, трех статьях в зарубежных рецензируемых изданиях, индексированных в реферативной базе данных Scopus. По результатам работы сделано 12 докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Результаты диссертационной работы имеют практическое внедрение.

В качестве замечаний стоит отметить, что в диссертации отсутствуют данные по прогнозным ресурсным характеристикам разработанной инженерной модели ВЧИД ММ при обосновании допустимых изменений при проектировании ВЧИД.

Тем не менее, сделанные замечания не снижают высокого научно-технического уровня выполненной работы.

Диссертационная работа «Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности» удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кожевников Владимир Владимирович, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв на диссертационную работу Кожевникова Владимира Владимировича утвержден на заседании НТС ОКБ «Факел» 13 ноября 2017 г. протокол № 13-11-2017с1.

Старший научный сотрудник отдела 301  
ФГУП ОКБ "Факел"

Гниздор Р. Ю.

Учёный секретарь НТС

ФГУП ОКБ «Факел»

Ведущий специалист

Подпись Гниздора Романа Юрьевича

удостоверяю

Начальник общего отдела

Нятин А.Г.



Шевченко Л.Г.

Полное название организации: Федеральное государственное унитарное предприятие «ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ФАКЕЛ»

Почтовый адрес: Россия 236001, г. Калининград обл., Московский проспект, 181

Телефон: 8(4012) 53-84-72

Официальный сайт:

Электронная почта: [info@fakel-russia.com](mailto:info@fakel-russia.com)