



«УТВЕРЖДАЮ»

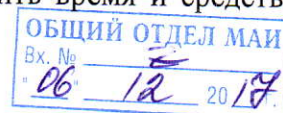
Первый заместитель директора  
Центра по научной работе  
Р.А. Санду

### ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертацию Круглова Кирилла Игоревича  
"МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ  
ИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ",  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»"

Разработка высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) – новое направление в развитии технологии электрических ракетных двигателей (ЭРД) в Российской Федерации. Технология ЭРД, развитие которой началось в конце 50-х годов прошлого века в Институте атомной энергии (в настоящее время НИЦ «Курчатовский институт»), оказалась чрезвычайно плодотворной. В ее развитие большой вклад внесли советские ученые и инженеры. В настоящее время электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) широко применяются для решения задач коррекции орбиты отечественных околоземных космических аппаратов (КА). Без их использования было бы невозможно поддержание космических систем связи, образованных геостационарными КА. Тенденции развития космической техники требуют разработки и применения двигателей с более высоким удельным импульсом тяги, чем у современных СПД, для обеспечения длительных сроков активного существования КА. Эти требования определяют перспективы применения ионных двигателей (ИД), в разработке которых принимает участие соискатель. Работы по созданию ВЧИД начались в Российской Федерации в НИИ ПМЭ МАИ относительно недавно – в 2010 и сразу охватили разработку двигателей мощностью от нескольких сотен Ватт до 15-20 кВт.

На данном этапе разработки ВЧИД большое значение имеет моделирование. Создание надежных физико-математических и расчетных моделей, описывающих различные процессы во ВЧИД, их апробация и применение на стадии проектирования позволяет снизить риски при разработке конструкции, сэкономить время и средства на



разработку. Диссертация посвящена разработке и апробации методики расчета теплофизических процессов во ВЧИД - созданию тепловой модели ВЧИД различной размерности. В свете изложенного, решаемая в диссертации задача чрезвычайно актуальна.

Сложность, стоящей перед соискателем задачи, обусловлена необходимостью в рамках тепловой модели создания надежных расчетных моделей теплофизических процессов во ВЧИД: плазменных, обусловленных ионизацией рабочего тела в самостоятельном индукционном разряде, тепловыделения при взаимодействии плазмы с элементами конструкции, и, собственно, тепловых с учетом разнородного характера используемых в конструкции ВЧИД материалов. Уже это подчеркивает новизну проведенного исследования.

Диссертантом совершенно обосновано утверждается, что положительный результат в решении указанных проблем может быть достигнут на основе экспериментально-расчетного исследования, включающего разработку моделей тепловыделения в элементах конструкции ВЧИД, взаимодействующих с плазмой, и обобщенной модели теплофизических процессов в конструкциях ВЧИД различной размерности, а также разработку методик экспериментального определения температурных распределений в образцах ВЧИД. В диссертации этот подход к решению указанных проблем реализован. Автор обосновал основной подход к определению потока мощности на стенки газоразрядной камеры (ГРК) и электроды ВЧИД через задаваемый на этапе проектирования двигателя и надежно измеряемый при испытаниях параметр – ионный ток пучка, и, как следствие, плотность ионного тока, выпадающего на границы плазменного объема. Задание при расчетах второго важного параметра, задающего удельные потоки мощности, электронной температуры, менее обосновано, так как не опирается на какие-либо измерения и здесь приходится основываться на литературных данных.

Следует отметить при этом, что тепловая модель двигателя создается, как правило, на этапе разработки эскизного проекта, в связи с чем экспериментальная проверка и доказательство эффективности и достоверности модели может быть проведена только после реализации двигателя «в железе». Диссертанту удалось такую проверку осуществить на двух ВЧИД разной размерности и показать достоверность получаемых при численном моделировании результатов.

Расчеты проведены автором для трех двигателей разной мощности: до 0,3 кВт, 3 кВт и 20 кВт. Расчетные модели двигателей рассчитаны на использовании программного комплекса ANSYS, который хорошо зарекомендовал себя при решении подобных задач.

Следует подчеркнуть особое место в диссертации экспериментального исследования температурных полей в конкретных образцах ВЧИД. Проведение этих исследований потребовало разработки методики измерения температурных полей с использованием тепловизора. С одной стороны, было необходимо определить радиационные параметры применяемых в конструкции ВЧИД материалов, по которым в литературе наблюдается значительный разброс, а с другой - условия предельных режимов работы ВЧИД по температурному нагружению критических элементов конструкции, исходя из реальной технологии изготовления двигателей. Кроме того, при измерениях температур в условиях испытаний в вакууме было необходимо решить технические задачи, позволившие проводить измерения в инфракрасном диапазоне спектра. Тщательность методической проработки измерений подчеркивает, например, тот факт, что автор исследовал экспериментально и показал, что индикатриса теплового излучения, выходящего с поверхности керамической газоразрядной камеры, с большой точностью допускает описание косинусоидальной зависимостью. Расчетные и экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии.

Несомненно, диссертация имеет большое практическое значение. В ней содержатся результаты не только методического характера, но и рекомендации по выбору предельных режимов работы ВЧИД различной размерности с учетом технологии их изготовления. Так, при использовании сплавов титана в качестве материала электродов, максимальная допустимая температура электродов (в первую очередь, эмиссионного) узла ионно-оптической системы не должна превышать 400-450 °С. На основе проведенного автором исследования в разрабатываемых двигателях плотность ионного тока в новых проектах ограничивается величиной 65-70 А/м<sup>2</sup>.

Полученные автором в диссертации результаты нашли применение в ряде ОКР и признаны разработчиками ВЧИД в промышленных организациях.

Следует отметить, логичность представленного автором в диссертации материала. Анализ, проведенный в Главе 1, позволил четко поставить задачу исследования. Глава 2, представляет собой обоснование для разработки тепловой модели на основе детального рассмотрения теплофизических процессов в самостоятельном индукционном ВЧ разряде. Исходя из особенностей конструкции ВЧИД, обосновываются допустимые упрощения. В главе 3 даны практические результаты апробации тепловых моделей в конкретных расчетных исследованиях. Делаются важные выводы по предельно допустимым режимам работы двигателей, практически реализованных в НИИ ПМЭ МАИ по заданиям промышленных организаций. Экспериментальная Глава 4 содержит важную информацию о методических основах измерений температурных полей в условиях работы двигателей в

вакууме с использованием тепловизора, демонстрирует хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Диссертация написана хорошим языком, позволяет легко ориентироваться специалисту в решаемых автором проблемах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Апробация работы проходила на российских и международных конференциях. Результаты работы опубликованы в двух научных статьях в рецензируемых изданиях.

В диссертации следует отметить следующие недостатки:

- в главе 2 не достаточно аргументированно указано, основываясь на каких исследованиях или предположениях, принято значение в 15 % от ВЧ мощности для мощности лучистого потока из плазмы;
- на стр.33 указано, что из экспериментов известно значение тока в цепи УЭ, равное 2-3 % от тока ионов пучка, однако ссылка на какие-либо публикации отсутствует;
- на стр. 39 для формулы (1.21) пропущено описание для одного из слагаемых;
- на стр. 60 в формуле (2.29) ток ионов перезарядки из области нейтрализации определяется равным 1 % от тока ионов пучка, однако не описано, по какой причине это значение отличается от экспериментальных данных, представленных выше.

Отмеченные недостатки не снижают высокой оценки диссертации.

В качестве развития исследований по теме диссертации можно высказать пожелание в проведении комплексного эксперимента с независимыми средствами измерения температуры электродов ИОС и определения параметров плазмы вблизи границ разрядной плазмы в ГРК.

Диссертационная работа Круглова К.И. «Моделирование теплофизических процессов в высокочастотном ионном двигателе» соответствует паспорту специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» по техническим наукам.

В целом, оценивая диссертацию Круглова К.И., можно сделать вывод о том, что выполненная работа имеет вид законченного исследования на актуальную тему, содержит новые научные результаты, имеет важное прикладное значение, ее результаты используются в новых проектных разработках ВЧИД. Диссертация полностью соответствует требованиям, Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор Круглов К.И. заслуживает присвоения искомой ученой степени.

Диссертация Круглова К.И. доложена и обсуждена 05.12.2017 на семинаре Отдела пучковых и импульсных технологий Отделения плазменных технологий Курчатовского

Комплекса физико-химических технологий "Прикладные задачи физики и химии плазмы и вопросы сопутствующих технологий". Основные положения и выводы отзыва одобрены в ходе обсуждения.

Адрес НИЦ «Курчатовский институт»: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1., Телефон: +7 (499) 1969539, Факс: +7 (499) 1961704, Электронная почта: [ngski@ngski.ru](mailto:ngski@ngski.ru)

Отзыв составил:

Начальник лаборатории магнитно-импульсных технологий ОПИТ ОПТ ККФХТ  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
к.ф. - м.н.

М.Н. Казеев

Начальник Отдела пучковых и импульсных технологий ОПТ ККФХТ НИЦ «Курчатовский институт»,  
проф., д.ф. - м.н.

В.С. Койдан.

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»

С.Ю. Стремоухов

11.12.2017 *Григорьев*

*Г.И.Д. Григорьев*