

На правах рукописи

КРУГЛОВ КИРИЛЛ ИГОРЕВИЧ



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ**

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, академик РАН
Рыжов Юрий Алексеевич

кандидат технических наук
Абгарян Вартан Карленович

Официальные оппоненты: **Митрофанова Ольга Викторовна**
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», старший научный сотрудник кафедры «Теплофизика»

Бишаев Андрей Михайлович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», старший научный сотрудник кафедры физики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Защита состоится «22» декабря 2017 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/upload/iblock/825/Dissertatsiya-Kruglov.pdf>

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.08

доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) широко применяются для решения задач коррекции положения околоземных КА (космических аппаратов). Наиболее широко ЭРДУ используются в составе геостационарных КА и низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли. В последние годы ЭРДУ начали использовать в маневрах по довыведению геостационарных КА в точку стояния, включая длительные переходы с геосинхронной орбиты на геостационарную орбиту. Разнообразие народно-хозяйственных и специальных задач требует разработки КА различного назначения в широком диапазоне масс и энерговооруженности. Соответственно, для решения задач по их созданию необходима широкая номенклатура ЭРДУ, отличающихся по принципу действия, величинам мощности, тяги и удельного импульса тяги.

Тенденции развития космической техники требуют разработки и применения эффективных двигателей для обеспечения длительных сроков активного существования КА. Эти требования определяют перспективы применения ионных двигателей (ИД), обладающих по сравнению с широко используемыми в России и за рубежом стационарными плазменными двигателями (СПД) более высоким удельным импульсом тяги и ресурсом, определяя тем самым важность развития технологии ИД в Российской Федерации.

В настоящее время в России начата разработка двух типов ИД: ионных двигателей с разрядом постоянного тока (ИДПТ) (Ion Thrusters Development for a Transport and Power Generation Module Project / A.S. Lovtsov [et al.] // IEPС–2015–291, Proceedings of the 34th IEPС. Nyogo–Kobe. Japan. 2015. 12 p.) и высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД). Эти две конкурирующие технологии к настоящему времени за рубежом достигли примерно одинакового уровня. Сравнение характеристик лучших зарубежных ИДПТ: NEXТ, XIPS-25 и T6 с характеристиками таких ВЧИД, как: RIT-10, RIT-15 и RIT-22 показывает их близость. Следует отметить, что по объему применений ИДПТ, составляющие в течение длительного времени основу технологии ИД в США и ряде других стран, намного опережают ВЧИД.

Работы по разработке и исследованию ВЧИД различной размерности начались в НИИ ПМЭ МАИ с 2010 года под руководством ведущего ученого профессора Х. Лёба, являющегося автором схемы ВЧИД, в рамках Мегагранта (первая волна). Сейчас ведутся работы по созданию ВЧИД с диапазоном мощности от 10 Вт до 20 кВт при промышленном партнерстве АО КБХА, ФГУП ОКБ «Факел» и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Интерес к развитию технологии ВЧИД обусловлен рядом потенциальных технологических и эксплуатационных преимуществ перед ИДПТ:

1) Ионизация рабочего тела во ВЧИД осуществляется в ВЧ-разряде индукционного типа. Поэтому внутри газоразрядной камеры (ГРК) нет электродов, в том числе катода для испускания

электронов, который является наиболее критическим элементом конструкции ИДПТ. Катод требует длительной отработки в связи с необходимостью подтверждения большого ресурса.

2) Отсутствует необходимость в создании внешнего магнитного поля, что ведет к упрощению конструкции двигателя и системы его электропитания.

3) Не требуется высокая очистка рабочего газа (ксенона), так как ВЧ-разряд не чувствителен к наличию примесей кислорода и других химически активных газов.

Одним из проблемных научно-технических вопросов создания ВЧИД является разработка тепловой схемы двигателя в соответствии с требованиями надежного функционирования ВЧИД и его интегрирования с системами КА. Сложность проблемы заключается в необходимости создания надежных расчетных моделей различных по своей природе теплофизических процессов во ВЧИД: плазменных, обусловленных ионизацией рабочего тела в самостоятельном индукционном разряде с учетом особенностей тепловыделения при взаимодействии плазмы с элементами конструкции, и, собственно, тепловых с учетом разнородного характера используемых в конструкции ВЧИД материалов.

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.

По результатам расчетных и экспериментальных исследований должны быть получены распределения температур в разрабатываемых ВЧИД, на основе которых выполняются расчеты термических деформаций критических элементов конструкции. Кроме того, полученные значения температур элементов конструкции ВЧИД позволят сделать выбор того или иного материала для изготовления узлов конструкции ВЧИД и определить предельные режимы работы двигателя по достижению критических значений температуры. На основе расчетов могут быть получены исходные данные для производителей КА для интеграции ВЧИД различной размерности в тепловую схему КА.

С учетом вышеизложенного 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.

Диссертационная работа посвящена разработке модели тепловых процессов во ВЧИД, проведению численных и экспериментальных исследований распределения температур в образцах ВЧИД различной размерности. Выбор направления исследования основан на недостаточной изученности тепловых процессов, протекающих во ВЧИД, и значительном влиянии нагрева элементов конструкции ВЧИД на технические характеристики двигателей.

Объектом исследования являются тепловые процессы в высокочастотном ионном двигателе.

Целью работы является разработка модели тепловых процессов в ВЧИД.

Основные задачи диссертации - для достижения поставленной цели в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

1. Произвести оценку состояния разработки ВЧИД, анализ режимов работы ВЧИД и интегральных характеристик в зависимости от размерности.
2. Произвести анализ тепловых процессов в ВЧИД.
3. Разработать модель тепловых процессов в ГРК с учетом тепловыделения в элементах конструкции ВЧИД при взаимодействии с ВЧ электромагнитным полем.
4. Выполнить расчетное исследование ВЧИД различной размерности с вариацией применяемых материалов и режимов работы.
5. Разработать методику экспериментального исследования температурных распределений в конструкциях ВЧИД.
6. Исследовать температурные распределения в конструкциях ВЧИД разработки НИИ ПМЭ МАИ и провести сравнение экспериментальных и расчетных температур.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель плазменных процессов в ГРК ВЧИД.
2. Тепловая модель ВЧИД, допускающая последовательное ее усложнение путем повышения уровня детализации расчетной модели конструкции двигателя.
3. Результаты расчетного теплового моделирования ВЧИД различной размерности.
4. Методика экспериментального определения радиационных параметров материалов, необходимых для численного расчета температурных распределений в элементах конструкции ВЧИД различных мощностей.
5. Методика экспериментального измерения температурных распределений во внешних элементах конструкции ВЧИД с использованием тепловизора.
6. Результаты экспериментального исследования температурных распределений в двигателе малой мощности ВЧИД ММ и лабораторном образце двигателя ВЧИД-16 средней мощности.
7. Рекомендации по использованию материалов и возможному применению специальных покрытий для снижения температуры в критических элементах конструкции ВЧИД на заданных режимах работы.

Методы исследования

В работе применены экспериментальные и расчетные методы исследования. Измерения температур проводились с помощью тепловизора и термопар. Численные расчеты были выполнены с помощью программного комплекса ANSYS.

Научная новизна работы:

1. Создана балансовая модель плазмозифических процессов, обусловленных ионизацией атомов рабочего газа в самостоятельном индукционном разряде и включающих взаимодействие частиц-ионов, электронов и фотонов - с поверхностями элементов конструкции ВЧИД.
2. Разработана тепловая модель, определяющая связь тепловых потоков на поверхности ГРК, эмиссионного (ЭЭ) и ускоряющего (УЭ) электродов ионно-оптической системы (ИОС) с интегральными характеристиками ВЧИД, с большой точностью измеряемыми в эксперименте. Показано, что в качестве определяющего параметра теплового состояния во ВЧИД и значений тепловых потоков удобно использовать ток ионного пучка, близкий по значению току в электрической цепи ЭЭ.
3. Разработанная тепловая расчетная модель ВЧИД допускает последовательное ее усложнение путем повышения уровня детализации объекта с конечной целью максимального приближения компьютерного объекта к разработанной графической модели, а при создании лабораторной модели - и к реальному объекту.
4. Проведено расчетное тепловое исследование двигателя ВЧИД ММ размерности 8 см мощностью до 300 Вт, двигателя ВЧИД-16 размерности 16 см мощностью до 3 кВт, а также проектируемого двигателя ВЧИД- 49 М размерности 49 см и мощностью 15...20 кВт.
5. Разработана методика экспериментального измерения температурных полей во внешних элементах конструкции ВЧИД.
6. Проведены измерения температур и выполнены численные расчеты полей температур в проектируемых конструкциях ВЧИД различных мощностей. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных распределений температур.

Практическая значимость результатов работы:

1. Разработана расчетная тепловая модель ВЧИД.
2. Разработаны методики измерения температур во ВЧИД, включая методику измерения радиационных параметров исследуемых материалов, необходимых как для измерения температур с помощью тепловизора, так и для выполнения численных расчетов.
3. Проведен анализ влияния материалов на температуру в критических элементах ВЧИД.
4. Разработаны рекомендации по применению материалов (в том числе перспективных) для использования в последующих разработках ВЧИД.

5. Выполнены расчеты распределений температур во ВЧИД, в том числе и в критических узлах, а именно в электродах ИОС. Полученные профили по радиусу температур электродов были использованы в качестве исходных данных в термомеханических расчетах деформации электродов ионно-оптических систем двигателей ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД-49 М.
6. Определены предельные режимы работы моделей двигателей ВЧИД-16 и ВЧИД-49 М по достижению критических температур электродов ионно-оптической системы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов проведенных исследований обуславливается использованием известных физических моделей плазменных процессов, определяющих тепловые потоки на элементы конструкции ВЧИД, значительной детализацией тепловых моделей ВЧИД различной размерности, использованием сертифицированного программного комплекса ANSYS, проведением необходимого объема предварительных измерений по определению степени черноты и индикатрисы теплового излучения для элементов конструкции ВЧИД, применением аттестованной измерительной аппаратуры: тепловизора и вспомогательных элементов для измерений температур в условиях вакуумного стенда, хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных результатов.

Личный вклад соискателя

Соискателем был выполнен весь комплекс экспериментальных работ по измерению температур в двигателях ВЧИД ММ и ВЧИД-16. Соискатель построил расчетные модели двигателей ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД-49М, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ. Принимал непосредственное участие в разработке методики расчета тепловых потоков во ВЧИД. Все компьютерные расчеты температур в тепловых моделях указанных ВЧИД были также выполнены соискателем.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по созданию ВЧИД ММ, при разработке тепловой модели и проведении экспериментальных исследований лабораторного образца ВЧИД-16 по опытно-конструкторской работе (ОКР) «ЭРДНП». В настоящее время на стадии проектирования ВЧИД мощностью 15-20 кВт методика тепловых расчетов проходит апробацию в рамках ОКР «ВЧИД».

Апробация результатов

Основные результаты работы опубликованы в двух научных статьях в рецензируемых изданиях, обсуждались на семинарах НИИ ПМЭ МАИ, а так же докладывались на российских и международных конференциях: 1) 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-

2013» (Москва, Россия, 12 – 15 ноября 2013 года); 2) 6 International Workshop and Summer School on Plasma Physics (Kiten, Bulgaria, 30 June – 6 July, 2014); 3) 5 Russian – German Conference on Electric Propulsion and their Application (Dresden, Germany, September, 7 – 12, 2014); 4) 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2014» (Москва, Россия, 17 – 21 ноября 2014 года); 5) 10-я Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014) (Алушта, Крым, 25 – 31 мая 2014 года); 6) 19-я Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015) (Алушта, Крым, Российская Федерация, 24 – 31 мая 2015 года); 7) 22-я Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2015 (Москва, Российская Федерация, 20 – 24 августа 2015 года); 8) 34 International Electric Propulsion Conference, (Hyogo-Kobe, Japan, July, 4 – 10, 2015); 9) 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2015» (Москва, Россия, 16 – 20 ноября 2015 года); 10) 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2016» (Москва, Россия, 14 – 18 ноября 2016 года); 11) 11-я международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016) (Алушта, Крым, 25 – 31 мая 2016 года); 12) 5 International Conference «Space Propulsion 2016» (Rome, Italy, May, 2 – 6, 2016); 13) 67 International Astronautical Congress (Guadalajara, Mexico, September, 26 – 30, 2016); 14) 6-я Российско-Германская конференция «Электроракетные двигатели: их применение в космосе и перспективы развития» (Самара, Россия, 28 августа – 2 сентября 2016 года);

Структура и объем работы

Работа представляет собой рукопись объемом 143 страниц печатного текста, включая 74 рисунка, 16 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 85 наименований. Она включает в себя Введение, четыре раздела, Заключение, а также список использованных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении приводится обоснование актуальности тематики диссертационного исследования, краткое описание проблемы экспериментального и расчетно-теоретического исследования тепловых процессов, протекающих при работе ВЧИД. Описывается степень разработанности выбранной темы, формулируются цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, реализация и внедрение результатов работы, личный вклад соискателя, сообщаются сведения об апробации работы и публикациях автора, излагается объем и структура диссертации.

В первом разделе приводится принципиальная схема ВЧИД, см. Рисунок 1, описываются технические характеристики известных ВЧИД, их преимущества и недостатки по сравнению с

более распространенными ионными двигателями на постоянном токе (ИДПТ). Обосновывается необходимость разработки тепловой модели ВЧИД как одного из наиболее нагретого элемента в составе КА. Отмечается важность теплового моделирования для выбора материалов на этапе проектирования; для выявления критических элементов конструкции двигателя по предельной величине рабочей температуры, а также для решения вопроса теплового сопряжения ВЧИД с другими системами КА.

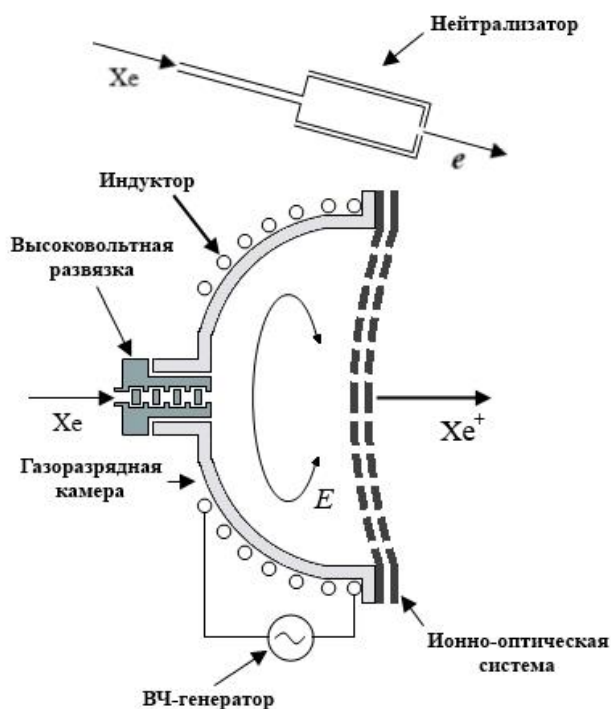


Рисунок 1 –Принципиальная схема ионного двигателя с индукционным ВЧ разрядом

Приводится описание теплофизических процессов, протекающих в различных узлах конструкции при работе ВЧИД. Проводится обзор существующих расчетных тепловых моделей и экспериментальных измерений температур во ВЧИД, выполненных в Германии, где технология ВЧИД была изобретена профессором Х. Лёбом (Loeb, H.W. Ein elektrostatisches Raketentriebwerk mit Hochfrequenzionquelle / H.W. Loeb // Astronautica Acta, Vol. 8, №. 1, 1962, pp. 49-62) и в России, где технология ВЧИД разрабатывается в настоящее время. Формулируется постановка задачи теплового моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов в ВЧИД.

Во втором разделе приводится описание тепловой расчетной модели. В модели принято, что перенос тепла в конструкции ВЧИД осуществляется лучистым и теплопроводным способом, а также через контактные сопротивления. Определяются выражения для входных тепловых потоков, идущих из плазмы разряда на поверхности различных элементов ВЧИД. Показано, что исходное уравнение теплопроводности может быть использовано в форме уравнения Лапласа, т.е.

$$\Delta T = 0 \quad (1)$$

Уравнение (1) решается численным методом с помощью пакета прикладных программ с учетом граничных условий I и II рода, которые определяют температуры окружающей среды, тепловые потоки, выделяющиеся на проводящих поверхностях под действием индукционных токов, а также входные тепловые потоки, идущие из плазмы разряда. На границе разделов элементов, принадлежащих разным узлам конструкции, вводятся контактные сопротивления.

Входные тепловые потоки приносятся из плазмы на поверхности, граничащие с разрядом, ионами, электронами и образующимися при их нейтрализации на поверхности ГРК и ЭЭ фотонами. Тепловые потоки в предлагаемой модели используются в виде, аналогичном приведенному в тепловой модели Ван Ноорда (Van Noord J.L. NEXT Ion Thruster Thermal Model. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2010), на основе которой построены все существующие тепловые модели ВЧИД (Dobkevicius M., Feili D. A coupled performance and thermal model for radio-frequency gridded ion thrusters // Eur. Phys. J. D. 2016. Т. 70. №. 11. С. 227; Waldemar G., Lotz B., Meyer B.K. 3D Thermal Simulation of a μ N-RIT // IEPC-2013-298, 33rd International Electric Propulsion Conference. Washington, D.C., USA. 2013. 6 p.). В данных тепловых моделях используется примерно одни и те же выражения для тепловых потоков в ВЧ ионных двигателях, либо соответствующие выражениям в модели Ван Ноорда, либо имеющие незначительные, с точки зрения физики процесса, отличия. Выражения для тепловых потоков, приносимых ионами и электронами, использованные в данной работе, следующие:

$$W_{\text{ГРК}} = I_{\text{ГРК}} \left(\Delta U_{\text{ГРК}} + \frac{5}{2} T_e + V_i \right) \quad (2)$$

$$W_{e\text{ЭЭ}} = I_{e\text{ЭЭ}} \left(\frac{5}{2} T_e + \varphi_{\text{ЭЭ}} \right) \quad (3)$$

$$W_{i\text{ЭЭ}} = I_{i\text{ЭЭ}} (\Delta U_{\text{ЭЭ}} + V_i - \varphi_{\text{ЭЭ}}) \quad (4)$$

$$W_{i\text{УЭ}} = I_{i\text{УЭ}} (U^- + V_i - \varphi_{\text{УЭ}}) \quad (5)$$

где $W_{\text{ГРК}}$ – тепловая мощность, приносимая на ГРК ионами и электронами из плазмы разряда;

$W_{i\text{ЭЭ}}$ и $W_{e\text{ЭЭ}}$ – тепловая мощность, приносимая на ЭЭ ионами и электронами соответственно;

$W_{i\text{УЭ}}$ – тепловая мощность, приносимая на УЭ ионами перезарядки;

$I_{\text{ГРК}}$ – суммарный ток ионов или электронов на стенке ГРК – они равны по величине;

$I_{i\text{ЭЭ}}$ и $I_{e\text{ЭЭ}}$ – токи ионов и электронов на поверхность ЭЭ соответственно;

$I_{i\text{УЭ}}$ – ток ионов перезарядки на УЭ;

V_i – потенциал ионизации атомов рабочего газа;

$T_e, \text{ В}$ – электронная температура, измеряемая здесь и далее в вольтах;

U^- – потенциал УЭ;

$\varphi_{\text{ЭЭ}}$ и $\varphi_{\text{УЭ}}$, В – работы выхода электронов из материала ЭЭ и УЭ соответственно (в вольтах);

$\Delta U_{\text{ГРК}} = 5,8T_e$ и $\Delta U_{\text{ЭЭ}} = 5,1T_e$ – пристеночные падения потенциала плазмы вблизи ГРК и ЭЭ.

Плотности токов ионов и электронов на поверхности ЭЭ и УЭ, определяются как для случая полностью перфорированных отверстиями ЭЭ и УЭ, так и для более общей конструкции перфорированных электродов ИОС с наличием сплошной кольцевой части на их периферии.

К значениям тепловых потоков (2-5) добавляется лучистый поток, образующийся при снятии возбуждения атомов и ионов плазмы разряда. В работе принято, что суммарная мощность этого потока составляет 15% от вкладываемой в разряд ВЧ мощности $W_{ВЧ}$. Данный поток распределяется равномерно по поверхностям, граничащим с разрядом, и вводится в счет в качестве составляющей суммарных потоков тепловой мощности, падающих на поверхности ГРК и электродов ИОС. Плотность данного потока w_R^* для ГРК и ЭЭ определяется следующим образом:

$$w_R^* = 0,15 \cdot \frac{W_{ВЧ}}{S_{ГРК} + S_0}, \quad (6)$$

где $S_{ГРК}$ и S_0 – площади поверхности ГРК и ЭЭ.

Для ускоряющего электрода плотность данного теплового потока уменьшена ввиду частичного затенения поверхности УЭ эмиссионным электродом, а именно:

$$w_{УЭ}^* = w_R^* \frac{\sigma_{ЭЭ} - \sigma_{УЭ}}{1 - \sigma_{УЭ}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{ЭЭ}$ и $\sigma_{УЭ}$ – прозрачности ЭЭ и УЭ;

Тепловой поток, образующийся в индукторе под действием вихревых индукционных токов, выделяется в скин-слое индуктора. При частоте переменного тока, составляющей 1МГц, толщина скин-слоя для индуктора, изготовленного из меди, составляет 0,06 мм при толщине стенок индуктора около 1 мм. Поэтому данный тепловой поток вводился в расчет в качестве поверхностного, т.е. как граничное условие Прода. Плотность теплового потока q на поверхность индуктора определяется следующим образом:

$$q = \frac{I^2 \cdot R}{S} = \frac{I^2 \rho}{4\pi^2 r_{инд}^2 \delta}, \quad (8)$$

где I – величина действующего значения высокочастотного тока в индукторе;

R и δ – сопротивление и толщина скин-слоя индуктора;

S – площадь внешней поверхности индуктора, с которой происходит сброс тепла излучением;

$r_{инд}$ – внешний радиус трубки индуктора;

ρ – удельное сопротивление меди.

Основными параметрами в предлагаемой тепловой модели являются мощность $W_{ВЧ}$ и ионный ток из двигателя I_0 . Эти параметры, как правило, задаются при разработке ВЧИД. Они могут быть измерены непосредственно при отработке двигателя. Так, ток I_0 равен току в цепи ЭЭ и может быть измерен с помощью амперметра. Под $W_{ВЧ}$ в модели подразумевается мощность, подаваемая на индуктор. Устанавливается, что в разряд поступает около 90% мощности $W_{ВЧ}$.

Значения тепловых потоков, падающих на поверхности ГРК, ЭЭ и УЭ определяются температурой T_e . В модели T_e рассчитывается из уравнения баланса вводимой ВЧ мощности, составленного путем подсчета всех составляющих потерь входной мощности $W_{ВЧ}$, а именно

$$W_{ВЧ} = W_+ + W_{ГРК} + W_{ЭЭ} + W^* + W_R, \quad (9)$$

где

$$W_+ = I_0(\Delta U_{ЭЭ} + V_i) \quad (10)$$

Здесь W_+ – единственная “полезная” составляющая входной ВЧ мощности $W_{ВЧ}$, затрачиваемая на образование ионов основного потока и их предварительное ускорение до энергии, соответствующей пристеночному падению потенциала $\Delta U_{ЭЭ}$.

Другие слагаемые в правой части (9) характеризуют составляющие потери мощности, в том числе:

$W_{ГРК}$ и $W_{ЭЭ}$ – потоки мощности, выносимые только ионами и электронами из плазмы разряда на поверхности ГРК и эмиссионного электрода, обращенные к плазме, и определенные в (2-5);

W^* – поток лучистой мощности, образующийся при снятии возбуждения атомов и ионов плазмы;

W_R – совокупные индукционные потери на вихревые токи в проводящих элементах двигателя.

В разделе приводятся результаты расчетов температур в модельном двигателе ВЧИД – 16, сетка разбиения которого с изложенными в разделе упрощениями, изображена на Рисунке 2.

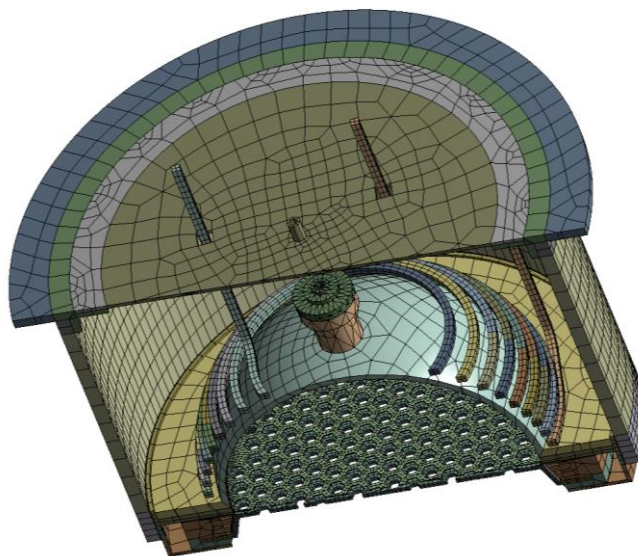


Рисунок 2 – Сетка разбиения модельной конструкции ВЧИД-16 на элементы

В расчетах принималось, что $W_{ВЧ} = 300$ Вт и $I_0 = 1$ А. Из уравнения (9) определено, что $T_e \approx 4В$, что позволило определить входные тепловые потоки (2-5), задаваемые в начале счета. Численный расчет показал, что наиболее нагретой до примерно 300 °С оказалась центральная область ЭЭ. Температуры в центре УЭ оказались около 160 °С. ГРК нагрета до примерно 290 °С.

Для обоснования упрощений расчетной модели выполнена серия расчетов температур в модельной конструкции ВЧИД-16. Основные упрощения состояли в уменьшении числа отверстий (примерно в 10 раз) путем увеличения диаметров отверстий в электродах ИОС с сохранением их

прозрачности и замене круглых отверстий на гексагональные. Трубчатый индуктор был заменен на сплошной с квадратным сечением. Также были проведены сравнительные расчеты с использованием идеальных и реальных термических контактов между элементами различных узлов ВЧИД. Расчеты выявили, что максимальное отличие температур с разных сторон контактов составляет менее 6 К. Значения температур в критических точках, таких как центры эмиссионного и ускоряющего электродов ИОС, различаются еще менее, т.е. малосущественны.

Сделанные упрощения модели позволили существенно сократить время отдельного расчета и сделать расчетную модель удобной к практическому применению.

Предложена возможность уменьшения температуры ЭЭ, как наиболее нагретого элемента, путем нанесения на его поверхность покрытия для повышения степени черноты $\epsilon_{ЭЭ}$, чтобы увеличить лучистый сброс тепла. Повысить $\epsilon_{ЭЭ}$ можно, например, оксидированием или графитизацией поверхности ЭЭ. Наличие модели расчета температур позволило проверить такую рекомендацию. Был выполнен расчет температур в модельном ВЧИД-16, где вместо $\epsilon_{ЭЭ}=0,3$, принятого для ЭЭ, изготовленного из Мо, было использовано значение $\epsilon_{ЭЭ}=0,95$. Все остальные параметры расчета были в точности такими же. Расчет показал, что температура ЭЭ уменьшилась на почти 40 К, что довольно существенно. Температура УЭ при этом увеличилась лишь на 10 К из-за увеличения теплового потока на УЭ от ЭЭ из-за повышения степени черноты последнего. Таким образом, численный расчет продемонстрировал возможность заметного уменьшения температуры ЭЭ, при нанесении на его поверхность покрытия с высокой степенью черноты.

В третьем разделе приводятся результаты расчетов температур разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ моделях трех двигателей ВЧИД с диаметрами ионного пучка 8 см, 16 см и 49 см. Это модели двигательного блока двигателя ВЧИД ММ, лабораторного образца ЛО ВЧИД – 16, см. Рисунок 3, и разрабатываемого двигателя ВЧИД–49 М соответственно.

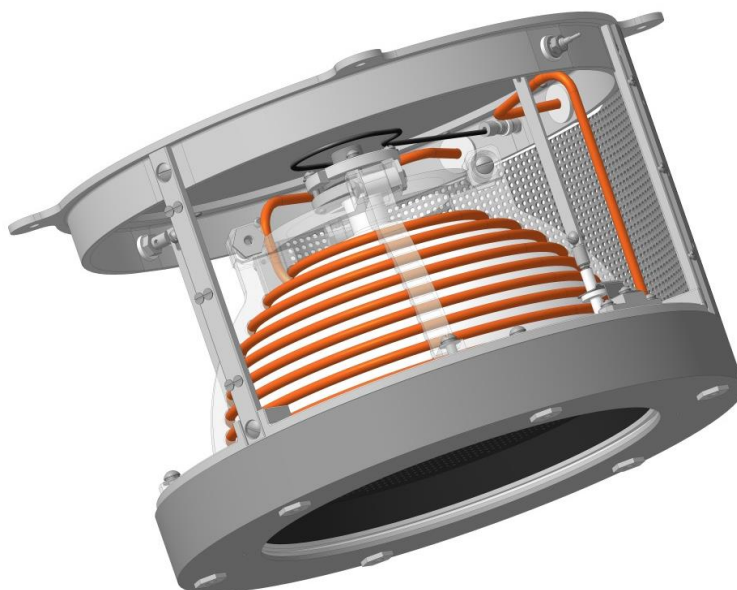


Рисунок 3. Лабораторный образец ЛО ВЧИД – 16

Расчеты температур в ЛО ВЧИД – 16 и ВЧИД-49 М проведены как для отработки расчетной модели, так и для решения практического вопроса о применимости титанового сплава ВТ14 в качестве материала для электродов ИОС на различных режимах работы двигателей. По своим технологическим характеристикам сплав удобен к применению в конструкции ВЧИД. Но его термомеханические свойства таковы, что выше критической температуры около 400 °С изготовленные из сплава тонкие электроды ИОС теряют устойчивость. Термическая деформация становится настолько большой, что применение сплава в конструкции ВЧИД оказывается нецелесообразным.

Расчеты температур в ЛО ВЧИД – 16 выполнены для значений ВЧ мощности в 200 Вт и 300Вт. Выявлено, что при $W_{ВЧ}=300$ Вт температуры центральной части ЭЭ переходят в закритическую область, см. Рисунок 4. Значение $W_{ВЧ}=200$ Вт оказалось близко к предельному для использования сплава ВТ14 в качестве материала для изготовления эмиссионного электрода.

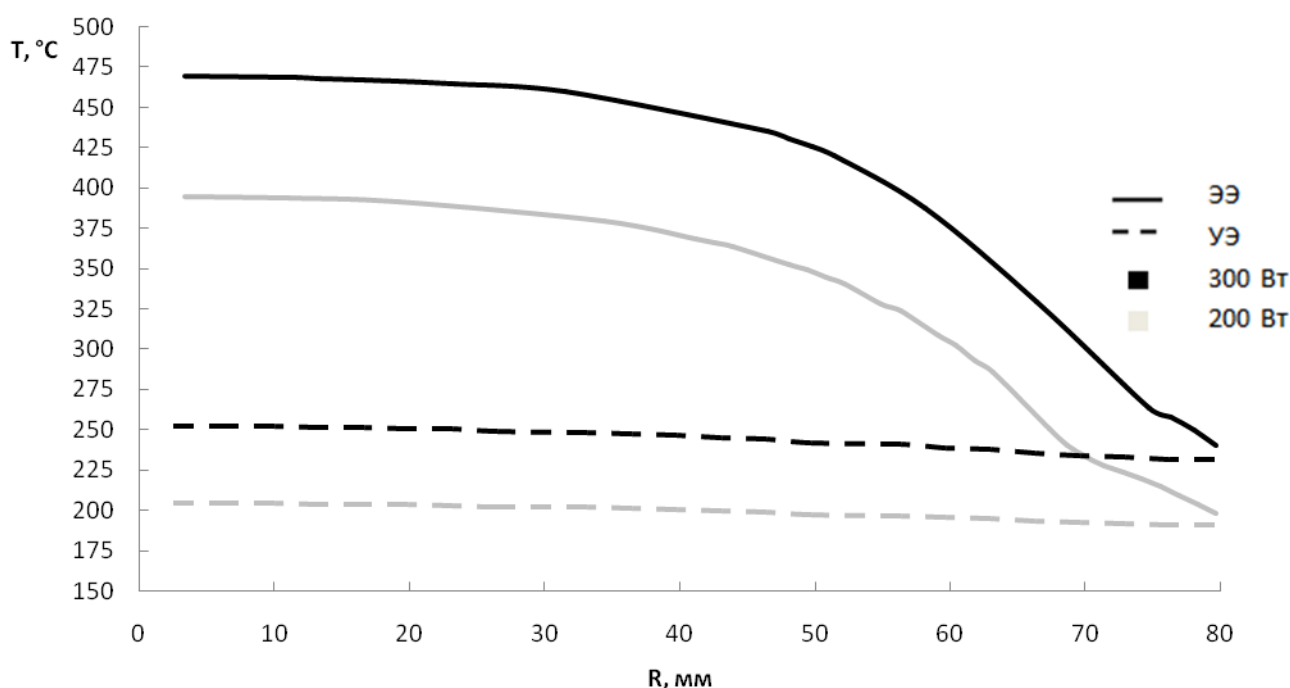


Рисунок 4 - Радиальные профили температур ЭЭ и УЭ в ЛО ВЧИД – 16

Подобный расчет температур был выполнен для ВЧИД – 49 М при мощностях $W_{ВЧ}=2400$ Вт и $W_{ВЧ}=2800$ Вт также для случая использования сплава ВТ14 в качестве материала ЭЭ и УЭ. Профили температур ЭЭ и УЭ по радиусу приведены на Рисунке 5.

Как видно из Рисунка 4 и Рисунка 5 использование сплава ВТ14 не позволяет рассматривать рабочие режимы соответствующих образцов двигателей при мощностях свыше 200 Вт для ЛО ВЧИД – 16 и 2400 Вт для ВЧИД – 49 М. Это ограничение серьезно сказывается на эффективности двигателей. В качестве рекомендации предлагается использовать сплавы на основе молибдена и углеродных композитов, что отвечает мировому опыту и тенденциям.

Рассчитанные профили температур по радиусу для ЭЭ и УЭ использовались для решения термомеханической задачи устойчивости электродов в другом исследовании.

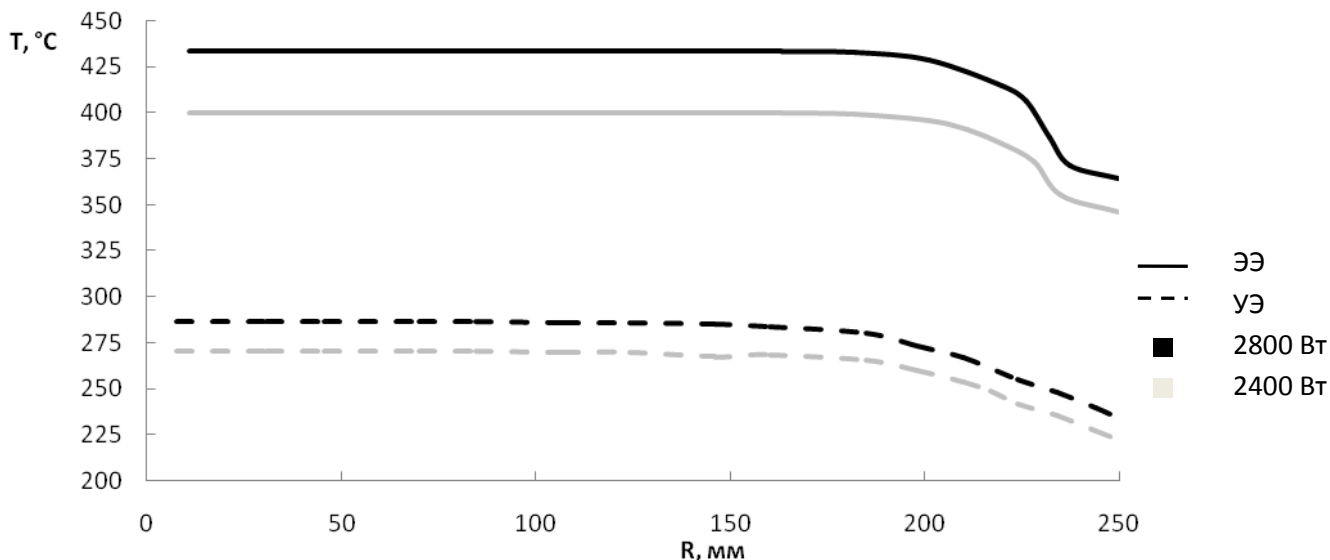


Рисунок 5 - Радиальные профили температур ЭЭ и УЭ в ВЧИД-49 М

Более подробный тепловой расчет был выполнен для двигательной установки ВЧИД ММ, изображенной на Рисунке 6 (Антропов Н.Н. и др., Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя / Известия Академии Наук Энергетика, №2, 2016, с. 4-14).

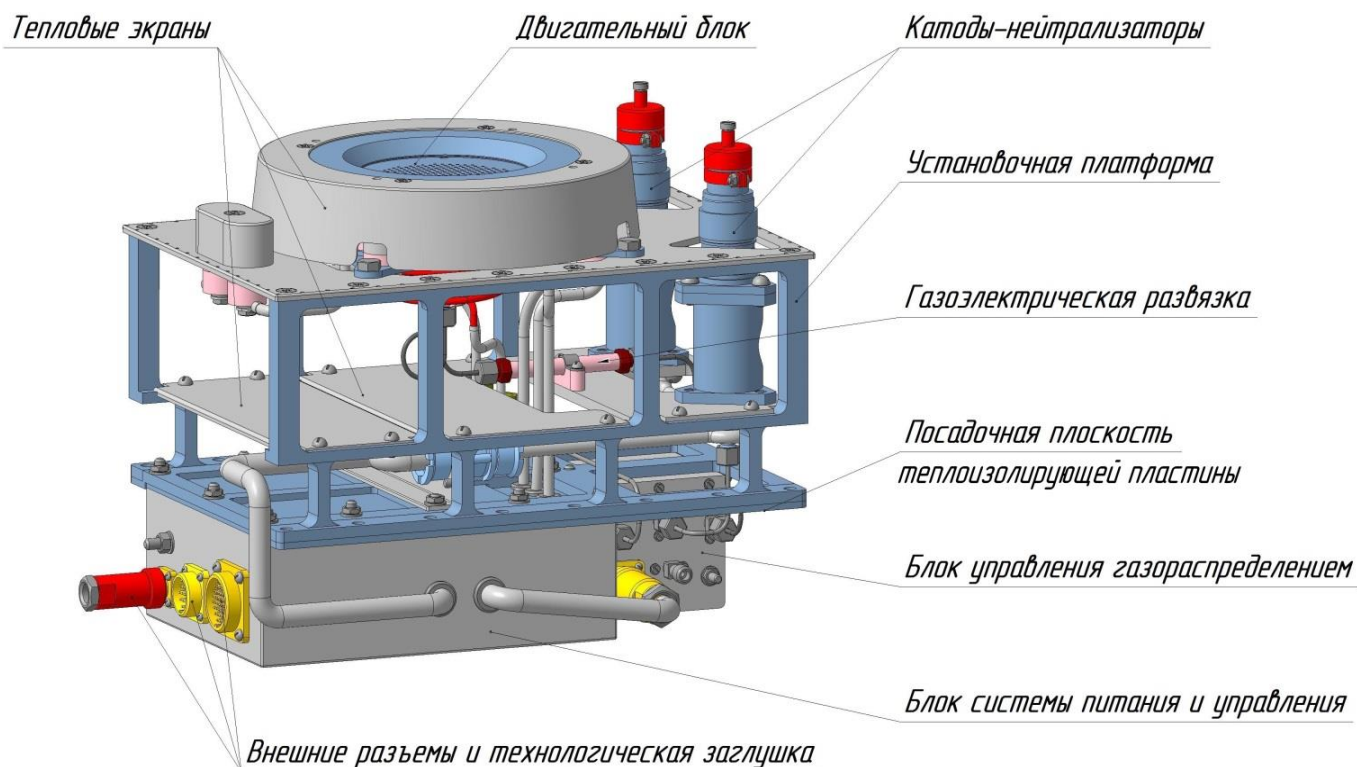


Рисунок 6 – Двигательная установка ВЧИД ММ

В её состав входят двигательный блок (ДБ), блок системы питания и управления (СПУ) с ВЧ генератором (ВЧГ), блок управления газораспределением (БУГР), два катода-нейтрализатора (КН), прямоугольная установочная платформа. Элементы конструкции ВЧИД ММ размещены на установочной платформе в три уровня. Установочная платформа нижнего уровня представляет собой теплоизолирующую пластину с двумя посадочными местами, которые крепятся к термостабилизированным посадочным местам КА. Через посадочные места обеспечивается

теплопроводный отвод тепла от двигательной установки ВЧИД ММ к сопряженным системам КА. Допустимая температура посадочных мест находится в диапазоне от минус 25 °С до плюс 50 °С. Блок СПУ с ВЧГ и БУГР закреплены на раме нижнего уровня. ДБ закрыт экраном, изготовленным из дуралюмина, и установлен на раме установочной платформы верхнего уровня.

Теплоотвод от «горячей» рамы верхнего уровня осуществляется излучением от верхней плоскости и теплопроводностью по боковым панелям установочной платформы к посадочным местам двигателя, расположенным на раме нижнего уровня. Между «холодной» рамой нижнего уровня и «горячей» рамой установлена промежуточная рама, выполняющая функцию теплового экрана между двигательным блоком и блоком СПУ. К промежуточной раме крепятся катоды-нейтрализаторы, элементы газовой арматуры и элементы коммутации электрических цепей.

Конструкция ВЧИД ММ в расчетной модели была условно разделена на две отдельные области с границей их раздела, проходящей по теплоизолирующей пластине.

В ВЧИД ММ эмиссионный электрод выполнен из молибдена МЧ ТУ 48-19-472-90 (содержание Мо 99,96%). Ускоряющий электрод выполнен из титанового сплава ВТ1-0 ГОСТ.

Тепловое моделирование для конструкции ВЧИД ММ выполнено в три этапа. В самом общем виде последовательность проведения расчетов следующая.

На первом этапе проведены отдельные тепловые расчеты для тепловыделяющих частей конструкции ВЧИД - ММ. Такими частями являются:

- 1) блок, состоящий из 2-х катодов – нейтрализаторов;
- 2) блок БУГР и коробка блока СПУ с ВЧГ, расположенные на теплоизолирующей пластине;
- 3) двигательный блок, содержащий ГРК, ВЧ-индуктор, электроды ИОС, тепловой экран ДБ и силовое кольцо с кронштейнами и штангами крепления ДБ.

На втором этапе моделирования проводились расчеты температур в узлах конструкции выше теплоизолированной пластины, исключая тепловыделяющие части конструкции 1), 3). При этом рассчитанные на первом этапе температуры поверхностей тепловыделяющих частей 1), 3) конструкции использовались в расчетах в качестве граничных условий. Это позволило оставить в счете только те элементы сетки их разбиения, которые расположены на их внешних поверхностях и поэтому определяют тепловые потоки на окружающие элементы ВЧИД ММ.

Третий этап моделирования состоял в объединении результатов численных расчетов, выполненных отдельно для частей конструкции, расположенных выше и ниже теплоизолирующей пластины для получения итогового распределения температур в конструкции ВЧИД ММ.

Такая схема проведения расчетов позволила существенно сократить число элементов сетки разбиения всего объекта исследования – ВЧИД ММ – и выполнить численное моделирование тепловых процессов при приемлемом объеме компьютерных затрат. Были проведены две серии расчетов температур в узлах конструкции установки ВЧИД ММ при температурах

теплоизолирующей пластины, равных минус 25 °С и плюс 50 °С. Анализ результатов проведенной серии расчетов температур позволили утверждать, что использование предлагаемой конструкции установки ВЧИД ММ с каркасом, выполненным из дюралевых рам и боковых панелей, позволяет эффективно отводить теплопроводным способом тепловые потоки, идущие от тепловыделяющих элементов конструкции – двигательного блока, катодов-нейтрализаторов и БУГРа и СПУ с ВЧГ.

В четвертом разделе приводится описание экспериментальных измерений температур для образцов двигательного блока на основе двигателя ВЧИД ММ, см. Рисунок 6 и лабораторного образца ЛО ВЧИД-16, см. Рисунок 3.

Измерения температур проводились при помощи тепловизора FLIR SC-645. Использование тепловизора имеет свою специфику. Для корректного определения температур исследуемого объекта кроме множества параметров нужно задавать степень черноты ε поверхности объекта. Как правило, в различных источниках данные по степеням черноты приводятся без указания качества механической обработки поверхности. Попытка использования справочных данных по степени черноты материала ГРК (алюмооксидные керамики ВК-100 и ВК-94, а также керамика Si_3N_4) при первоначальных измерениях температур ГРК в ВЧИД ММ с помощью тепловизора показала, что это может привести к заметным ошибкам. Кроме этого программное обеспечение тепловизора подразумевает, что индикатриса теплового излучения исследуемой поверхности соответствует «закону косинуса», что также нуждалось в экспериментальной проверке.

Была разработана методика предварительного определения степени черноты материалов и индикатрисы теплового излучения поверхности ГРК и создана установка для измерения степени черноты поверхности ГРК ЛО ВЧИД-16. В качестве модельного источника тепла, размещаемого внутри ГРК, использовались две галогенные лампы с суммарной мощностью излучения до 300 Вт, т.е. примерно в том же диапазоне, что и в двигателе ЛО ВЧИД-16. Форма ламп и их взаимное расположение выбиралось таким образом, чтобы обеспечить азимутальную симметрию прогрева поверхности ГРК. Тепловизор устанавливался на треноге и ориентировался таким образом, чтобы оптическая ось его объектива была направлена примерно в геометрический центр сферы ГРК.

Применялся метод эталонной метки, в качестве которой использовалось покрытие из сажи, полученной при горении полистирола. Степень черноты сажи считалась равной 0,97. Для получения четкой границы метки использовалась специальная маска.

После установления стационарного теплового режима проводилось снятие показаний температур на термограмме тепловизора вблизи границы сажи с разных сторон от границы метки. Значение степени черноты определялось, используя соотношение

$$\varepsilon_{\text{мат}} = \varepsilon_{\text{черн}} \frac{T_{\text{мат}}^4}{T_{\text{черн}}^4}, \quad (11)$$

где ε_{mat} и $\varepsilon_{черн}$ - степени черноты исследуемого объекта и эталонной метки;

$T_{черн}$ - температура эталонной метки, измеренная тепловизором;

T_{mat} - температура ГРК, измеренная тепловизором вблизи границы метки при установке $\varepsilon = \varepsilon_{черн}$.

Рассчитанные степени черноты Si_3N_4 и ВК-100 (Al_2O_3), планируемых к использованию в качестве материала для ГРК для ЛО ВЧИД – 16, практически не зависят от мощности модельного источника, изменявшейся от 150 Вт до 300Вт. Они составили 0,89 и 0,95 соответственно. Для ВК-94 (Al_2O_3), планируемого к использованию в ВЧИД ММ степень черноты оказалась равной 0,91. Эти значения использованы в численных расчетах и измерениях температур тепловизором.

Для определения индикатрисы теплового излучения, выходящего с поверхности ГРК, были измерены тепловые потоки тепловизором вблизи границы метки при различных углах поворота ГРК в диапазоне от 0° до 70° с шагом в 5° и на разных уровнях (по широте) ГРК. Угол θ рассчитывался из угла поворота ГРК и координат выбранной точки измерения на поверхности ГРК. Рассчитанная индикатриса теплового потока с большой точностью описывается косинусоидальной зависимостью, как показано на Рисунке 7.

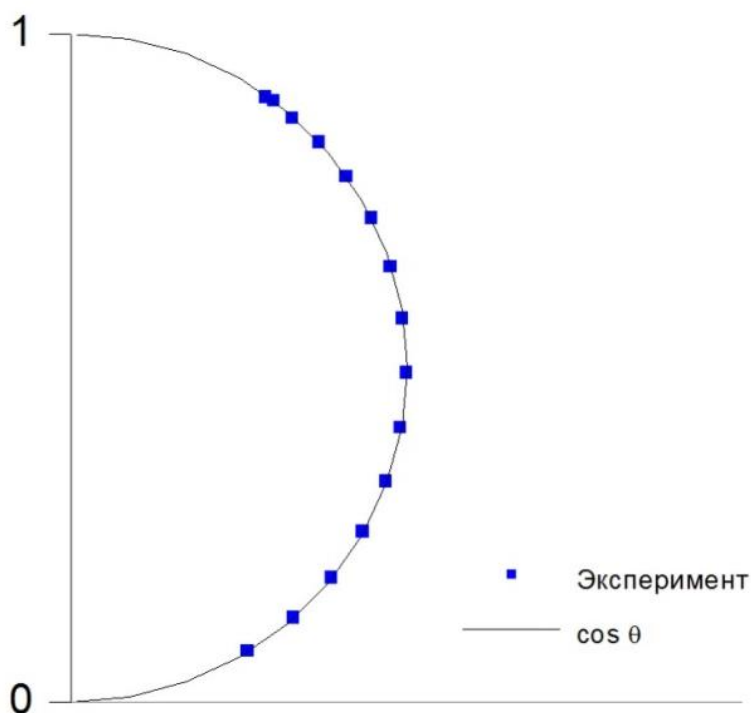


Рисунок 7 - Нормированное угловое распределение теплового потока

Измерения температур в ЛО ВЧИД-16 при ВЧ мощности разряда 170 Вт проводилось на вакуумном стенде У-2В-2, предназначенном для испытаний ионных двигателей, при давлении не выше 1.333×10^{-3} Па при работающем двигателе. Измерения температур ГРК двигателя проводились тепловизором через специальный иллюминатор вакуумной камеры с кристаллом $ZnSe$, на который нанесено просветляющее покрытие, см. Рисунок 8.

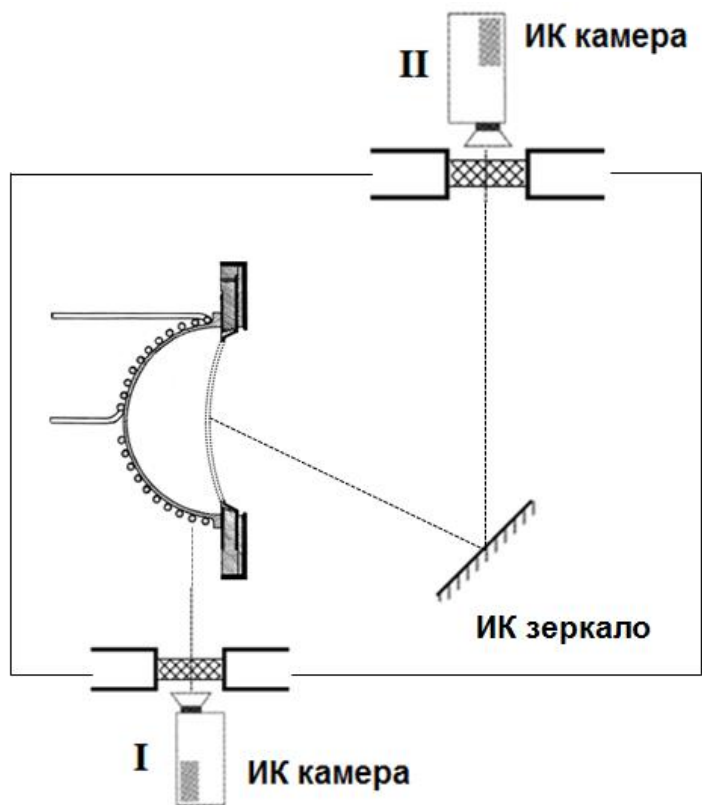


Рисунок 8 - Схема тепловизионных измерений

Для измерения температур поверхности УЭ внутри вакуумной камеры было установлено ИК-зеркало с коэффициентом отражения 0,95 в диапазоне длин волн от 2 до 20 $\mu\text{м}$, который перекрывает диапазон работы тепловизора. Представлены изображения, полученные при помощи тепловизора. Профиль температуры поверхности ГРК по длине образующей полусферы ГРК, отсчитываемой от вершины, приведен на Рисунке 9, на котором также изображен профиль температур, рассчитанных с помощью представляемой численной модели.

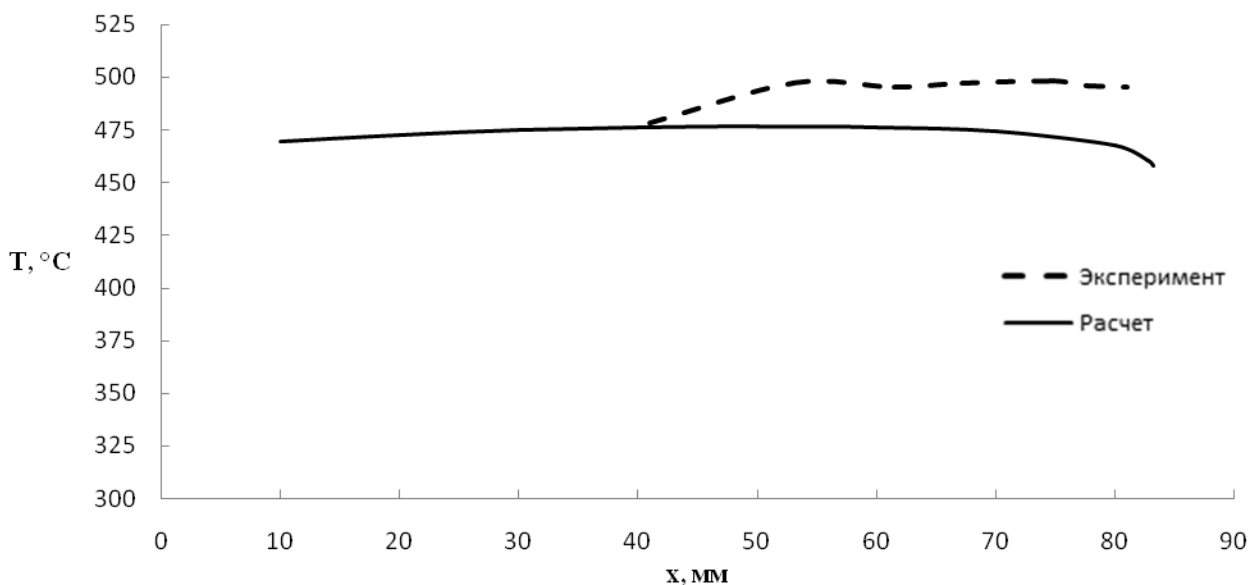


Рисунок 9 - Распределение температур по образующей поверхности ГРК ВЧИД-16 при ВЧ мощности 200 Вт

К сожалению, недостаточное разрешение тепловизора не позволило измерить профили температур ускоряющего электрода. Можно говорить лишь о средних температурах около 200 °С, которые находятся в удовлетворительном согласии с результатами численного расчета, см. Рисунок 4. Применение более мощного объектива позволит проводить измерения по методике, отработанной в данном исследовании.

Измерение температур в ДБ ВЧИД ММ проводилось при мощности ВЧ разряда 55 Вт на вакуумном стенде, предназначенном для проведения испытаний ВЧИД мощностью до 1 кВт. Стенд также был оборудован иллюминатором с кристаллом ZnSe. Также были получены тепловизионные изображения. На Рисунке 10 приведены измеренные и рассчитанные температуры поверхности ГРК.

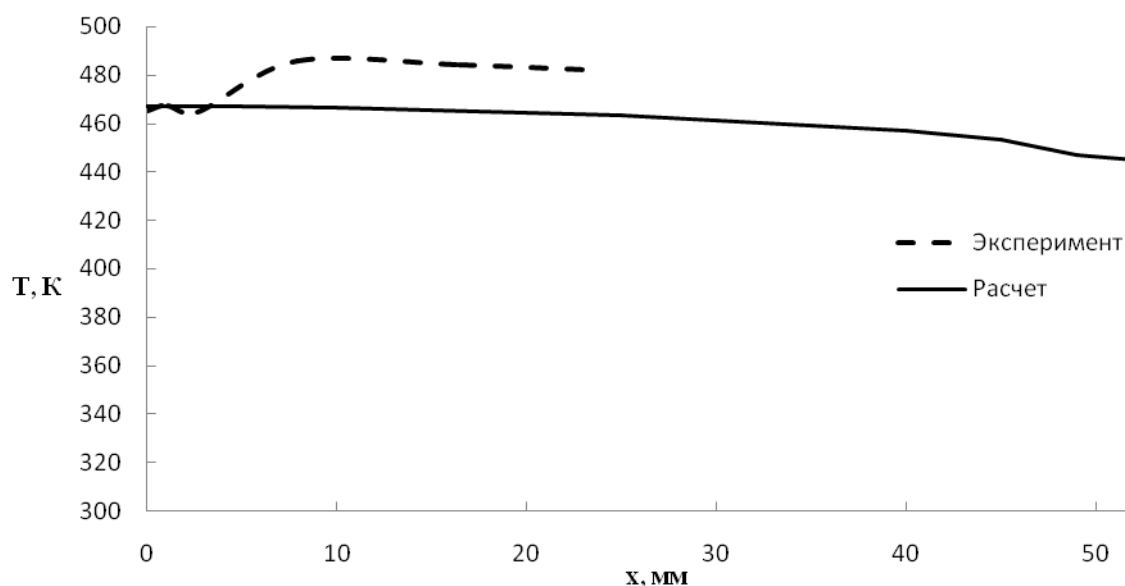


Рисунок 10 - Распределение температуры по образующей поверхности ГРК ДБ ВЧИД ММ при мощности разряда 55 Вт

Проведенные измерения температур ВЧИД ММ и ЛО ВЧИД-16 показывают соответствие расчетных и экспериментальных температур на поверхности ГРК в пределах требуемой инженерной точности в 5%, что позволяет сделать вывод о возможности применения расчетной модели для прогнозных расчетов температурных распределений при разработке ВЧИД.

В Заключение диссертации подведены итоги проведенного исследования и сформулированы основные результаты:

1. Проведен анализ плазменных процессов в газоразрядной камере и ионно-оптической системе ВЧИД, определяющих тепловую нагрузку элементов конструкции двигателя, разработана модель тепловых процессов, связывающая основные параметры плазмы индукционного высокочастотного разряда с тепловыделением в элементах конструкции двигателя.
2. Разработана численная модель расчета температур в ВЧИД, допускающая последовательное ее усложнение путем повышения уровня детализации объекта исследований.

3. Проведено численное моделирование температурных полей в элементах конструкции ВЧИД малой (до 0,5 кВт), средней (2-3 кВт) и большой (15-20 кВт) мощности. Определены предельные режимы работы двигателей, при которых в критических элементах конструкции температура достигает верхнее допустимое значение.
4. Разработана методика экспериментального измерения температурных полей во внешних элементах конструкции ВЧИД с использованием тепловизора.
5. Разработана методика предварительного определения радиационных параметров алюмооксидной керамики и титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ14 – материалов, из которых изготовлены отдельные узлы конструкции ВЧИД. Численные значения данных параметров необходимы как для измерения температур с помощью тепловизора, так и для проведения численных расчетов температур в ВЧИД.
6. Проведено экспериментальное исследование температурных полей в двигательном блоке на основе двигателя ВЧИД ММ и в лабораторном образце двигателя ВЧИД-16. Показано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных результатов.
7. На этапе эскизного проектирования ВЧИД мощностью 15-20 кВт с помощью разработанной тепловой модели проведены расчеты температурных распределений, на основе которых выполнены расчеты термической деформации электродов ИОС и определены предельные режимы работы двигателя.
8. На основе расчетно-экспериментального исследования сформулированы рекомендации по проектированию узлов ионно-оптической системы ВЧИД различной размерности, использованные при разработке в НИИ ПМЭ МАИ двигателей ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД-49 М по заданиям или при индустриальном партнерстве АО КБХА и ОКБ «Факел».

Список публикаций по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. Абгарян В.К., Тепловая модель высокочастотных ионных двигателей и источников ионов / В.К. Абгарян, **К.И. Круглов** // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 11. – С. 21–27.
2. Riaby, V.A. Radiofrequency source of a weakly expanding wedge-shaped xenon ion beam for contactless removal of large-sized space debris objects / V.V. Balashov, M.V. Cherkasova, **К.И. Kруглов**, A.V. Kudriavtsev, P.E. Masherov, A.I. Mogulkin, V.A. Obukhov, V.A. Riaby, V.V. Svitina // Review of Scientific Instruments. – 2017. – Т. 88. – №. 8. – С. 083304.

Другие публикации:

3. Абгарян В.К., Круглов К.И., Тепловая модель ионного двигателя ВЧИД-160, 12-я междунар. конф. «Авиация и космонавтика-13». – М.: изд. МАИ. – 2013. – С.323-325.
4. Kруглов, К.И. RFIT-450 Ion Thruster Thermal Model / К.И. Kруглов // Proc. 6th Int. Workshop and Summer School on Plasma Physics. – Sofia: University of Sofia.–2014.– P.37.

5. Abgaryan, V.K. Thermal Modeling of Large RFIT-Ion Thruster at 35 to 50 kW Power / V.K. Abgaryan, H.W. Loeb, K.I. Kruglov, V.A. Obukhov, G.G. Shishkin // 5 Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsion – New Challenges». – Dresden, Germany. – 2014, 7 – 12 September.
6. Моделирование тепловых процессов в высокочастотном двигателе ВЧИД-450 при мощности от 35 кВт до 50 кВт / В.К. Абгарян, Х.В. Лёб, К.И. Круглов, В.А. Обухов, Г.Г. Шишкин // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». Тезисы. – СПб.: Мастерская печати. – 2014. –С. 250-252.
7. Абгарян В.К. Компьютерное моделирование тепловых процессов в высокочастотном ионном двигателе высокой мощности / В.К. Абгарян, К.И. Круглов // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015). –2015. – С. 25-27.
8. Круглов К.И. Численное моделирование нагрева элементов конструкции источников ионов с радиочастотным нагревом плазмы разряда / К.И. Круглов, В.К. Абгарян, Х. Леб // Труды XXII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2015. – Т. 3. – 2015. – Москва, Российская Федерация. – С. 268-271.
9. Моделирование процессов переноса тепла в высокочастотном ионном двигателе / В.К. Абгарян, К.И. Круглов, Х.В. Лёб // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». Тезисы. – М.: Типография «Люксор». – 2015. –С. 127-129.
10. Абгарян В.К., Круглов К.И., Экспериментальное определение температур в космическом высокочастотном ионном двигателе малой мощности / В.К. Абгарян, К.И. Круглов // Материалы 11-й международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016). – М.: изд-во МАИ. – 2016. –С. 474-475.
11. Экспериментальное исследование температурных полей в высокочастотном ионном двигателе малой мощности / В.К. Абгарян, Р.В. Ахметжанов, В.В. Балашов, А.В. Богатый, К.И. Круглов, А.И. Моголкин // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». Тезисы. – М.: Типография «Люксор». – 2016. –С. 298-300.
12. Абгарян В.К. Эффективность преобразования ВЧ-мощности в ионный ток в ионных двигателях с высокочастотным нагревом плазмы / В.К. Абгарян, К.И. Круглов // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017). –2017. – С. 718-720.
13. Лёб Х.В. Эффективность преобразования ВЧ мощности в ионный ток в высокочастотных источниках ионов / В.К. Абгарян, К.И. Круглов // Труды 23-й Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2017. – Т. 3. –2017. – Москва, Российская Федерация. – С. 202-205.