

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



КРУГЛОВ КИРИЛЛ ИГОРЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
академик РАН, доктор технических наук, профессор

Рыжов Юрий Алексеевич

кандидат технических наук

Абгарян Варган Карленович

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1. Задачи исследования теплофизических процессов в высокочастотных ионных двигателях	15
1.1 Состояние работ в области высокочастотных ионных двигателей.....	15
1.2 Схема конструкции ВЧИД.....	18
1.3 Физические процессы в газоразрядной камере при ВЧ-разряде	19
1.4 Балансы частиц и мощности в плазме разряда	21
1.4.1 Затраты мощности на ионизацию и радиационные потери в разряде	22
1.4.2 Уравнения баланса ионов, электронов и мощности в разряде	25
1.4.3 Пристеночное падение потенциала	28
1.5 Теплофизические процессы в ионно-оптической системе.....	29
1.5.1 Формирование ионного пучка	30
1.5.2 Конфигурация и основные физические процессы в ИОС.....	30
1.5.3 Бомбардировка ускоряющего электрода ионами перезарядки.....	32
1.5.3.1 Вынос мощности на УЭ ионами из межэлектродного промежутка ИОС.....	32
1.5.3.2 Вынос мощности на УЭ ионами из области нейтрализации пучка.....	34
1.6 Исследования по разработке расчетных тепловых моделей в ВЧИД	35
1.6.1 Экспериментальные исследования тепловых процессов в ВЧИД	35
1.6.2 Расчетные тепловые модели для ВЧ ионных двигателей	38
1.6.3 Постановка задачи. Математическая модель тепловых процессов в ВЧИД.....	40
2. Моделирование нагрева элементов конструкции ВЧИД.....	45
2.1 Объект исследования	46
2.2 Сеточная модель ВЧИД	47
2.3 Уравнения для численного расчета температур узлов ВЧИД	48
2.3.1 Теплопроводные потоки между элементами сетки разбиения ВЧИД.....	49
2.3.2 Тепловые потоки из плазмы разряда на поверхности ВЧИД	50
2.3.3 Входные параметры численной модели, граничные и начальные условия	50
2.4 Потоки тепловой мощности на поверхности ВЧИД.....	52
2.4.1 Поток тепловой мощности на поверхности газоразрядной камеры	53
2.4.1.1 Пристеночное падение потенциала вблизи поверхности газоразрядной камеры...54	
2.4.1.2 Поток мощности от ионов и электронов плазмы	53
2.4.2 Поток тепловой мощности на поверхность эмиссионного электрода ионно-оптической системы	54
2.4.2.1 Пристеночное падение потенциала вблизи поверхности эмиссионного электрода.....	54
2.4.2.2 Плотности ионного тока на поверхности эмиссионного электрода	55

2.4.2.2.1	Плотность ионного тока в кольцевой области эмиссионного электрода.....	57
2.4.2.2.2	Плотность ионного тока в перфорированной области эмиссионного электрода.....	57
2.4.2.3	Тепловые потоки на эмиссионный электрод от ионов из плазмы азряда.....	58
2.4.2.3.1	Тепловой поток на кольцевую часть эмиссионного электрода.....	58
2.4.2.3.2	Тепловой поток от ионов на перфорированную часть эмиссионного электрода.....	59
2.4.3	Электронный ток и тепловой поток мощности на эмиссионный электрод от электронов из плазмы разряда.....	59
2.4.4	Поток тепловой мощности на ускоряющем электроде ионно-оптической системы.....	60
2.4.4.1	Мощность, падающая на ускоряющий электрод от вторичных ионов перезарядки.....	60
2.4.4.2	Дополнительный лучистый поток тепла, падающий на ускоряющий электрод с поверхности газоразрядной камеры.....	62
2.4.5	Лучистые тепловые потоки на поверхности газоразрядной камеры и электродов ионно-оптической системы от возбужденных атомов рабочего газа.....	62
2.4.6	Индукционные потери мощности на образование вихревых токов.....	63
2.4.6.1	Вихревые токи в индукторе.....	63
2.4.6.2	Потери ВЧ-мощности на вихревые токи в электродах ионно-оптической системы.....	64
2.4.7	Баланс ВЧ-мощности. Полезная часть ВЧ-мощности.....	65
2.5	Упрощения и допущения в расчетной модели, принятые для сокращения объема вычислений.....	66
2.5.1	Упрощенная сетка разбиения ВЧ индуктора.....	66
2.5.2	Упрощенная сетка разбиения эмиссионного электрода и ускоряющего электрода.....	67
2.5.3	Учет теплового контактного сопротивления между элементами конструкции.....	68
2.5.4	Численный расчет температур в модельной конструкции ВЧИД – 16.....	70
2.5.5	Влияние зачернения эмиссионного электрода на температуры электродов ИОС ..	72
2.6	Заключение к главе.....	74
3.	Численные расчеты температурных полей в ВЧИД различных размерностей.....	75
3.1	Расчет температур в элементах конструкции ЛО ВЧИД –16.....	76
3.1.1	Исходные данные по конструкции ЛО ВЧИД-16.....	76
3.1.2	Сетка разбиения численной модели ЛО ВЧИД – 16.....	78
3.1.3	Расчеты температур при $W_{вч} = 200$ Вт.....	80
3.1.3.1	Входные тепловые потоки.....	81
3.1.3.2	Результаты расчета температур.....	81
3.1.4	Расчеты температур при $W_{вч} = 300$ Вт.....	83

3.1.4.1	Входные тепловые потоки.....	83
3.1.4.2	Результаты расчета температур.....	84
3.1.5	Профили температур на эмиссионном и ускоряющем электродах ИОС.....	86
3.1.6	Выводы по результатам расчета температур.....	87
3.2	Расчет температур в элементах конструкции ВЧИД – 49 М.....	87
3.2.1	Исходные данные по конструкции ВЧИД – 49 М.....	87
3.2.2	Сетка разбиения численной модели ВЧИД – 49 М.....	90
3.2.3	Расчеты температур при $W_{вч} = 2400$ Вт.....	90
3.2.3.1	Входные тепловые потоки.....	91
3.2.3.2	Результаты расчета температур.....	91
3.2.4	Расчеты температур при $W_{вч} = 2800$ Вт.....	94
3.2.4.1	Входные тепловые потоки.....	94
3.2.4.2	Результаты расчета температур.....	94
3.2.5	Профили температур на эмиссионном и ускоряющем электродах ИОС.....	97
3.2.6	Заключение по тепловым расчетам ЛО ВЧИД – 16 и ВЧИД – 49 М.....	98
3.3	Расчет температур в двигательной установке ВЧИД ММ.....	98
3.3.1	Конструкция ВЧИД ММ.....	99
3.3.2	Технические характеристики ВЧИД ММ.....	100
3.3.3	Общая схема теплового моделирования.....	101
3.3.4	Расчет температур в отдельных частях конструкции.....	103
3.3.4.1	Методика и результаты расчета температур в блоке БУГР и СПУ с ВЧГ.....	103
3.3.4.2	Методика и результаты расчета температур в двигательном блоке.....	106
3.3.4.2.1	Граничные условия.....	106
3.3.4.2.2	Начальные условия.....	106
3.3.4.2.3	Входные потоки.....	106
3.3.4.2.4	Результаты расчета температур в двигательном блоке.....	107
3.3.4.3	Методика и результаты расчетов в верхней части конструкции ВЧИД ММ.....	110
3.3.5	Температуры узлов в общей конструкции ВЧИД ММ.....	114
3.3.6	Выводы по тепловым расчетам ВЧИД ММ.....	116
4.	Экспериментальное исследование температурных полей в образцах ВЧИД, сравнение экспериментальных и расчетных распределений температуры.....	117
4.1	Методика исследования температурных полей в ВЧИД.....	117
4.2	Методика предварительного определения теплофизических параметров материалов конструкции ВЧИД.....	119
4.2.1	Определение индикатрисы теплового излучения с поверхностей ВЧИД и степени черноты материалов конструкции ВЧИД.....	120
4.2.2	Результаты определения степени черноты материалов.....	124

4.3	Методика и результаты измерения температурных полей на внешних поверхностях ГРК и ускоряющего электрода ИОС	126
4.3.1	Измерения температур в ЛО ВЧИД-16	126
4.3.2	Результаты измерения температур в ЛО ВЧИД-16	128
4.3.3	Измерения температурных полей в ДБ ВЧИД ММ	129
4.3.4	Результаты измерения температур в ДБ ВЧИД ММ	131
4.4	Сравнение измеренных и расчетных температур	133
4.5	Выводы раздела 4	134
	Заключение	135
	Список литературы	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время ЭРДУ (электроракетные двигательные установки) широко применяются для решения задач коррекции положения околоземных КА (космических аппаратов). Наиболее широко корректирующие ЭРДУ применяются 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.

В Российской Федерации основу технологии электроракетных двигателей (ЭРД) составляют стационарные плазменные двигатели (СПД). Основная область их применения – системы коррекции, служащие для поддержания параметров рабочей орбиты КА. В европейской миссии SMART-1 СПД PPS-1350 использовался в качестве маршевого двигателя в исследовательском полете к Луне. Успешная многолетняя эксплуатация СПД на множестве отечественных и зарубежных КА на различных орбитах показала надежность этой российской технологии, которая позволила в течение более 40 лет удовлетворять потребностям страны в области двигателей, обладающих высоким удельным импульсом тяги. СПД экспортируются в передовые в технологическом отношении страны, и много лет успешно эксплуатируются на зарубежных спутниках. Несмотря на то, что удельный импульс тяги современных СПД не превышает 2500 с, СПД имеют хорошие перспективы быть востребованными и в дальнейшем.

Тем не менее, тенденции развития космической техники, вытекающие, по мере совершенствования технологии, из применения более легких конструкционных материалов, более эффективных источников энергии, более длительных сроков активного существования КА, определяет перспективы применения ионных двигателей (ИД), обладающих по сравнению с СПД более высоким удельным импульсом тяги и ресурсом. Этим обусловлена важность развития технологии ИД в Российской Федерации.

В настоящее время в нашей стране начата разработка двух типов ИД: ионных двигателей с разрядом постоянного тока (ИДПТ) и высокочастотных ИД (ВЧИД). Эти две конкурирующие технологии ИД к настоящему времени за рубежом достигли примерно одинакового уровня.

Сравнение характеристик лучших зарубежных ИДПТ: NEXТ, XIPS-25, T6, с характеристиками таких ВЧИД, как: RIT-10, RIT-15 и RIT-22 показывает их близость. Следует при этом заметить, что по объему применений ИДПТ, составляющие в течение длительного времени основу технологии ИД в США, намного опережают ВЧИД, что обуславливает значительное технологическое опережение развития ИДПТ.

Работы по разработке и исследованию ВЧИД различной размерности ведутся в НИИ ПМЭ МАИ с 2010 года. При разработке технологии ВЧИД требуется большой объем расчетных и экспериментальных исследований. Необходимо не только адаптировать известные технические решения, апробированные в Европе, но и исследовать новые технические решения основных узлов и систем ВЧИД и их возможности.

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 так, что внутри газоразрядной камеры (ГРК) отсутствует система электродов, главным элементом которой является катод – наиболее критичный элемент конструкции, требующий дорогостоящей отработки в связи с необходимостью подтверждения значительного ресурса работы. В системе электропитания исключаются высокопотенциальные источники питания электродной разрядной системы в ГРК.
2. Отсутствует необходимость в создании внешнего магнитного поля, что ведет к упрощению конструкции двигателя и системы его электропитания.
3. Нет необходимости высокой очистки ксенона, так как ВЧ-разряд не чувствителен к примесям кислорода и других химически активных газовых компонентов. Это свойство ВЧИД можно использовать на этапе наземной отработки, что приведет к снижению затрат на этапе комплексных испытаний, особенно в случае задействования рециклинга ксенона.

Семейство ВЧИД с уровнем мощности от десяти Ватт до 20 кВт разрабатывается в НИИ ПМЭ МАИ по заданию и при партнерском участии промышленных организаций космической отрасли и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Разработка ЭРД этого типа, обладающих высоким удельным импульсом тяги, актуальна в свете отмеченных тенденций развития космической техники.

В силу особенностей функционирования конструкция ВЧИД существенно отличается от конструкции существующих ИДПТ: ГРК выполняется из радиопрозрачной в ВЧ диапазоне керамики, электродам ионно-оптической системы (ИОС) целесообразно придать форму вогнутых по отношению к ГРК сферических сегментов, для ввода ВЧ мощности используется новый элемент конструкции – индуктор.

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 теплофизических процессов во ВЧИД, учитывающих разнородные по своей природе процессы: плазменные, обусловленные ионизацией рабочего тела в самостоятельном индукционном разряде с учетом особенностей тепловыделения при взаимодействии плазмы с элементами конструкции, собственно тепловых с учетом разнородного характера используемых в конструкции ВЧИД материалов.

Положительный результат в решении указанных проблем может быть достигнут на основе экспериментально-теоретического исследования, включающего: разработку моделей тепловыделения в элементах конструкции ВЧИД, взаимодействующих с плазмой, и обобщенной модели теплофизических процессов в конструкциях ВЧИД различной размерности; разработку методик экспериментального определения температурных полей в образцах ВЧИД, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ, с использованием техники тепловидения; проведение расчетного исследования теплофизических процессов во ВЧИД. По результатам расчетных и экспериментальных исследований применительно к разрабатываемым в НИИ ПМЭ МАИ моделям ВЧИД должны быть получены профили распределений температур во ВЧИД, на основе которых будут выполнены термомеханические прочностные расчеты критических элементов конструкции. Кроме того, полученные значения температур элементов конструкции ВЧИД позволят сделать выбор того или иного материала для изготовления узлов конструкции ВЧИД и выработать рекомендации по интеграции ВЧИД в тепловую схему КА различной размерности для производителей КА.

Исследование теплофизических процессов в ИД в технической литературе отражено слабо. К числу важнейших работ относится [1], в котором рассмотрены процессы в ИДПТ. В силу указанных конструктивных особенностей ВЧИД опыт отработки тепловых и термомеханических аспектов проектирования ИДПТ для ВЧИД в полной мере не применим. Экспериментальному исследованию тепловых процессов во ВЧИД к началу настоящего исследования была посвящена работа [2]. В ней использована методика пирометрических исследований температуры. Недостатком данного метода является необходимость измерения локальных значений температуры, при этом, как следует из анализа приведенных в статье результатов, приборное разрешение не позволяет производить надежное определение температуры перфорированных конструктивных элементов. В диссертации для регистрации температурных полей применяется тепловизор.

В данной работе рассматривается только стационарный режим работы двигателя, т.е. без изменения температуры во времени. Изучение переходных режимов двигателей может быть проведено в будущих исследованиях.

Разработка математической тепловой модели осложняется необходимостью детального учета плазмofизических процессов в ГРК, обуславливающих распределение тепловых потоков по элементам конструкции, включения в модель даже небольших по размерам элементов конструкции ВЧИД, учета значительной разницы в теплофизических свойствах материалов, применяемых в конструкции ВЧИД. Дополнительной сложностью является требование разработки достаточно универсальной методики расчета, применимой к двигателям различной размерности.

Цель работы – моделирование теплофизических процессов во ВЧИД.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести оценку состояния разработки ВЧИД, анализ режимов работы ВЧИД и интегральных характеристик.
2. Произвести анализ теплофизических процессов во ВЧИД
3. Разработать модель теплофизических процессов в ГРК с учетом тепловыделения в элементах конструкции ВЧИД при взаимодействии с ВЧ электромагнитном полем.
4. Разработать математические модели ВЧИД различной размерности, создаваемых в НИИ ПМЭ МАИ.
5. Выполнить расчетное исследование ВЧИД различной размерности с вариацией применяемых материалов и режимов работы.
6. Разработать методику определения значений необходимых теплофизических параметров материалов.
7. Разработать методику экспериментального исследования температурных полей в конструкциях ВЧИД.
8. Разработать конструкцию узла вакуумного стенда для проведения экспериментального исследования.
9. Исследовать температурные поля в конструкциях ВЧИД разработки НИИ ПМЭ МАИ и провести сравнение экспериментальных и расчетных данных.

Научная новизна работы

На основе анализа теплофизических процессов создана балансовая модель плазмofизических процессов, обусловленных ионизацией рабочего тела в самостоятельном

индукционном разряде, включающая взаимодействие частиц: ионов и электронов с элементами конструкции ВЧИД с различными физическими свойствами.

Разработана тепловая модель, определяющая связь удельных тепловых потоков на поверхности ГРК, эмиссионного (ЭЭ) и ускоряющего (УЭ) электродов с параметрами, характеризующими интегральные характеристики ВЧИД, с большой точностью измеряемых в эксперименте. Показано, что в качестве определяющего параметра теплового состояния следует принять ток ионного пучка (ток в цепи ЭЭ), через величину которого определяются параметры плазмы и удельные потоки мощности на стенки ГРК и на ЭЭ. Уточнение численных значений электронной температуры для составления баланса мощности на стенках ГРК и поверхности ЭЭ и потенциала плазмы возможно, с одной стороны, по суммарному тепловыделению в объеме ГРК, сравниваемому с падающей ВЧ мощностью ВЧГ с учетом КПД ввода мощности в плазму, а с другой - по данным экспериментальных исследований разброса ионов пучка по энергиям.

Разработана тепловая расчетная модель, допускающая 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. Ожидаемые нагревы некоторых поверхностей при работе ВЧИД по литературным данным и собственным оценкам автора могут составлять до 300-400 °С, в некоторых случаях критических для нормальной работы двигателя. По этой причине нельзя было использовать приближение малости изменения температур рабочих поверхностей, которое позволяет использовать линейное приближение и допускает аналитические решения тепловой задачи. Тепловая модель учитывает теплообмен между узлами конструкции либо излучением, либо теплопроводностью. В последнем случае модель позволяет учесть тепловые контактные сопротивления в стыковочных поверхностях.

Разработаны тепловые модели, и проведено расчетное исследование ВЧИД размерности 8 см мощностью до 300 Вт (ВЧИД ММ), ВЧИД размерности 16 см (ВЧИД-16) мощностью до 3000 Вт, проектируемого двигателя ВЧИД -49 М мощностью 15-20 кВт.

В разработанной компьютерной модели каждый из объектов исследования задан в виде трехмерного массива координат узлов сетки. В зависимости от принадлежности массива к тому или иному узлу конструкции ВЧИД каждому i -му элементу разбиения конструкции ВЧИД присваивались степень черноты поверхности ε_i и коэффициент теплопроводности λ_i . В качестве конечно-элементного решателя тепловой задачи был использован программный комплекс ANSYS. Получены распределения температуры в элементах конструкции ВЧИД указанных типов и выявлены критические режимные параметры с точки зрения предельно допустимой температуры ЭЭ.

Разработана методика экспериментального измерения температурных полей во внешних элементах конструкции ВЧИД размерности 8 см и 16 см с использованием тепловизора.

Разработана компьютерная модель расчета температур в ВЧИД и получены распределения температур в проектируемых конструкциях ВЧИД различных размерностей.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе анализа теплофизических процессов создана балансовая модель плазмофизических процессов в ГРК.

Разработана тепловая модель ВЧИД.

Разработаны исходные данные для проведения тепловых расчетов ВЧИД различной размерности с использованием программного комплекса ANSYS.

Проведен анализ влияния материалов, их теплофизических свойств, контактных термосопротивлений на температуру в критических элементах ВЧИД.

Разработаны рекомендации по применению материалов, в том числе перспективных для использования в последующих разработках.

Разработаны методики экспериментального определения температур в конструкции ВЧИД, включая методику измерения численных значений теплофизических параметров исследуемых материалов, необходимых для выполнения численных расчетов.

На этапе проектирования ВЧИД различной размерности, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ, выполнены расчеты ожидаемых распределений температуры в элементах конструкции, в том числе и в критических узлах ИОС, а именно ЭЭ и УЭ. Полученные распределения температур электродов использованы в термомеханических расчетах узлов ИОС ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД мощностью 15-20 кВт.

Методология и методы диссертационного 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.

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 объекта исследований.
3. Результаты расчетного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS исследования ВЧИД различной размерности.
4. Рекомендации по использованию материалов и возможному применению специальных покрытий для снижения температуры в критических элементах конструкции ВЧИД на заданных режимах работы.

5. Методика экспериментального определения теплофизических параметров исследуемых материалов необходимых для численного расчета температурных распределений в ВЧИД различных размерностей.
6. Методика экспериментального измерения температурных полей во внешних элементах конструкции ВЧИД с использованием тепловизора.
7. Результаты экспериментального исследования температурных полей во ВЧИД ММ и ВЧИД-16.

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается использованием известных физических моделей плазменных процессов, определяющих тепловую нагрузку элементов конструкции ВЧИД различной размерности, значительной детализацией тепловых моделей ВЧИД различной размерности, использованием надежного программного комплекса ANSYS, проведением необходимого объема предварительных методических исследований по определению степени черноты и индикатрисы теплового излучения для элементов конструкции ВЧИД, применением надежной измерительной аппаратуры: тепловизора и вспомогательных элементов для измерений температур в условиях вакуумного стенда в инфракрасной области спектра излучения, хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных результатов.

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 температурных полей во ВЧИД мощностью 15-20 кВт проходит апробацию в рамках ОКР «ВЧИД».

Личный вклад соискателя

Разработка тепловых моделей ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и разрабатываемы в настоящее время в НИИ ПМЭ МАИ ВЧИД мощностью 15-20 кВт.

Разработка исходных данных для проведения расчетного исследования температурных полей во ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД мощностью 15-20 кВт.

Проведение расчетных исследований исследования температурных полей во ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД мощностью 15-20 кВт.

Рекомендации по степени детализации компьютерных моделей ВЧИД различной размерности.

Разработка методики измерений температурных полей с использованием тепловизора в условиях вакуумного стенда в инфракрасном диапазоне спектра излучений. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных результатов.

Апробация результатов

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» ВВП-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).

Публикации по теме диссертации

Основные научные результаты работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 2 статьях в иностранных рецензируемых изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Структура и объем работы

Работа представляет собой рукопись объемом 143 страницы печатного текста, включая 74 рисунка, 16 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 85 наименования. Она включает в себя введение, четыре раздела, заключение, а также список использованных источников.

Краткое содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе описываются технические характеристики известных ВЧИД, обосновывается необходимость разработки тепловой модели ВЧИД, приводится описание теплофизических процессов, протекающих в различных узлах конструкции при работе ВЧИД. Проводится обзор существующих расчетных моделей и формулируется постановка задачи теплового моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов в ВЧИД.

Во втором разделе приводится описание тепловой расчетной модели.

В третьем разделе приводятся результаты расчетов температур трех двигателей ВЧИД с диаметрами ионного пучка 8 см, 16 см и 49 см.

В четвертом разделе приводится описание экспериментальных измерений температур для образцов двигательного блока на основе двигателя ВЧИД ММ и лабораторного образца ЛО ВЧИД-16. Проведено сравнение экспериментальных данных и значений, полученных при численном моделировании.

В Заключении диссертации подведены итоги проведенного исследования и сформулированы основные результаты работы.

1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

1.1 Состояние работ в области высокочастотных ионных двигателей

Электроракетные двигатели успешно используются в космической технике. Одним из важнейших требований к космическим аппаратам (КА) нового поколения - существенное увеличение сроков активного существования (САС) (с 3–5 лет до 7–15 лет для отечественных КА и с 7–10 лет до 15–17 лет для зарубежных КА). В настоящее время масса отечественных КА космической связи, которые являются основными потребителями ЭРД, составляет 2-4 тонны при мощности бортовых солнечных энергоустановок 10-20 кВт, соответственно [1]. Результаты проектно-баллистических исследований применительно к КА указанного назначения показывают, что для обеспечения названного повышения САС, оптимальные значения удельных импульсов тяги двигателей в системах коррекции КА сдвигаются с 1400...1700 с (характерные величины современных отечественных ЭРД коррекции типа стационарных плазменных двигателей (СПД)) до 2700...4500 с. [1]. В связи с этим актуальной становится разработка ионных двигателей (ИД), обладающих более высоким удельным импульсом тяги, по сравнению с СПД. Мощность двигателей коррекции КА связи должна составлять 1,5 – 3 кВт в зависимости от массы КА.

В качестве важной мировой тенденции следует указать на развитие технологии малых космических аппаратов (МКА) с массой менее 1000 кг. Двигатели этого класса также могут быть оснащены ЭРД, в частности ИД, для коррекции орбиты. Требования к ЭРД МКА зависят от параметров орбиты эксплуатации. Так, на европейском МКА GOCE, используемом на низких орбитах, применялся ИД с максимальной мощностью до 600 Вт и максимальным удельным импульсом тяги до 3500 с [2]. Двигатели МКА на более высоких орбитах могут иметь мощность 100...300 Вт и даже ниже.

С другой стороны, развиваются новые схемы выведения КА, обладающих высокой энерговооруженностью на высокоэнергетические орбиты (прежде всего, ГСО), связанные с использованием маршевых ЭРД на этапе довыведения [3,4]. Тенденция увеличения массы геостационарных КА до 6000 кг и более обуславливает необходимость разработки ЭРД на

основе двигателей мощностью 10–20 кВт, как для решения транспортных задач довыведения, тяжелых КА так и для систем поддержания параметров их рабочей орбиты. В задачах довыведения могут использоваться маршевые ИД с удельным импульсом тяги 3200-4000 с [1].

Требуемые значения удельных импульсов тяги для двигателей КА для дальнего космоса составляют 3000...7000 с при мощности от 3 кВт и выше при необходимом времени работы двигателя до 15000 часов и более. В США, Европе и Японии для решения таких задач разработаны и применяются ИД [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Одним из конкурентоспособных типов ИД является ИД с высокочастотным разрядом (ВЧИД), предложенный в конце 60-ых годов прошлого века проф. Хорстом Лёбом (Гиссенский университет, Германия) [11], разработкой которых в Европе занимается фирма EADS Astrium [12, 13].

Характеристики семейства немецких разработок ВЧИД приведены в таблице 1.1 [14].

Таблица 1.1 - Размерный ряд двигателей семейства RIT

Параметры	RIT-4	RIT-10	RIT-15	RIT-22	(ESA XX) RIT-35
Диаметр разрядной камеры (≈ионного пучка), см	4	10	15	22 (21)	35
Мощность, Вт	82	720	1,3-2	5000	8000
Тяга, мН	2,5	15	50-75	150	240
Удельный импульс тяги, с	3190	3300	3400	4500	3500
Энергия ионов, эВ	1800	1500	1200	1200	2000
Габариты, мм: -диаметр -длина	Диаметр ионного пучка 40 мм	16 16	15 14	30 23	Диаметр ионного пучка 350 мм

Параметры двигателей отвечают требованиям по применению как на МКА (RIT-4, RIT-10), так и на КА связи (RIT-22, RIT-35). Темной заливкой выделен двигатель RIT-10, прошедший ЛКИ на ИСЗ [15, 16, 17, 18]. RIT-22 (выделен более светлой заливкой) прошел квалификацию по применению в миссии BePicolombo по исследованию Меркурия [19], [20].

В Российской Федерации в настоящее время в рамках Федеральных целевых программ (включая Федеральную космическую программу 2016-2025) проводится разработка ИД как с разрядом постоянного тока [21], так и с высокочастотным разрядом – ВЧИД [22]. ВЧИД

разрабатываются в Московском авиационном институте (НИИ ПМЭ МАИ) при индустриальном партнерстве АО КБХА.

Рассмотренные области применения от МКА до маршевых двигателей для полетов в дальний космос требует разработки ВЧИД разной размерности, параметры которых приведены в таблице 1.2 [23].

Таблица 1.2 – Параметры ВЧИД различной размерности

Параметр	Тип двигателя			
	ВЧИД ММ	ВЧИД СМ	ВЧИД БМ	
			Маршевый довыведения	Маршевый для дальнего космоса
Ускоряющее напряжение U^+ , кВ	1.2–2.0	2.0–2.3	1,5–2,3	4,0–4,5
Ток пучка ионов, А	0.1–0.3	0.7–1.3	6–8	6–8
Потребляемая мощность, кВт	0.2–0.6	2–3	15–20	30–40
Тяга, мН	5–15	60–90		
Удельный импульс тяги, с	3000–4200	4000/4500	3200–4000	6000–7000
Диаметр ионного пучка, мм	80–100	160–200	500–550	500–550
Оцениваемый ресурс, час	более 20000			более 50000

Условно двигатели обозначены как ВЧИД малой мощности (ВЧИД ММ) от 0,2 до 0,6 кВт, средней мощности (ВЧИД СМ) 2-3 кВт и большой мощности (ВЧИД БМ) свыше 15 кВт. Технологии создания эффективных ВЧИД с высокими значениями удельных импульсов тяги и ресурса достаточно сложны, и в Российской Федерации пока освоены в недостаточной мере. В НИИ ПМЭ МАИ, в котором выполнялась данная работа, в течение около 7 лет проводятся исследовательские и конструкторские работы по созданию ВЧИД всех приведенных в таблице 2 размерностей. Важное место в проводимых работах занимает разработка тепловых схем двигателей разной размерности, чему посвящена диссертация.

Важность разработки тепловой модели двигателя определяется двумя факторами. Электроракетные двигатели (ЭРД) и высокочастотные ионные двигатели (ВЧИД) в частности, являются одними из наиболее горячих объектов КА. Характеристики двигателя как тепловой нагрузки необходимы разработчикам КА на этапе проектирования тепловой схемы КА в целом. С другой стороны, тепловая модель двигателя на этапе его создания должна выявить критические элементы конструкции по предельной величине рабочей температуры в самом двигателе. Это две взаимосвязанные, но все же разные задачи. Теплоотдача от двигателя к КА происходит, в основном через контактную поверхность: двигатель – КА. Расчет теплопередачи

требует модели теплопроводности в элементах двигателя с учетом особенностей теплопроводности контактных термических сопротивлений, зависящих от таких факторов как: давление между элементами, шероховатость поверхности контактирующих поверхностей, модули упругости материалов [24], что обусловлено конструкцией ВЧИД и особенностями физических процессов, на которых основана его работа.

1.2 Схема конструкции ВЧИД

Принципиальная схема ВЧИД приведена на Рисунке 1.1. Газоразрядная камера (ГРК) ВЧИД выполнена из радиопрозрачного диэлектрика (кварц, окись алюминия и др.). Узел ионно-оптической системы (ИОС) включает три электрода – эмиссионный (ЭЭ), ускоряющий (УЭ) и замедляющий (ЗЭ). Первые два электрода выполняются в виде перфорированных решеток. ЗЭ выполняется либо также в перфорированном виде, либо в кольцевом виде. Ввод ВЧ мощности в разряд осуществляется от индуктора, подключенного к высокочастотному генератору (ВЧГ). Ввод газа производится в ГРК через газораспределитель с высоковольтной развязкой и в нейтрализатор, который используется как источник электронов для компенсации положительного заряда ионов в выходящем плазменном потоке.

После подачи газа и подвода ВЧ мощности индукционный ВЧ разряд инициируется одним из известных способов, например кратковременный заброс давления рабочего газа в ГРК. После зажигания разряда образуется стационарная неравновесная плазма низкого давления [12]. Подачей напряжений на электроды ИОС формируется ионный пучок, создающий тягу двигателя.

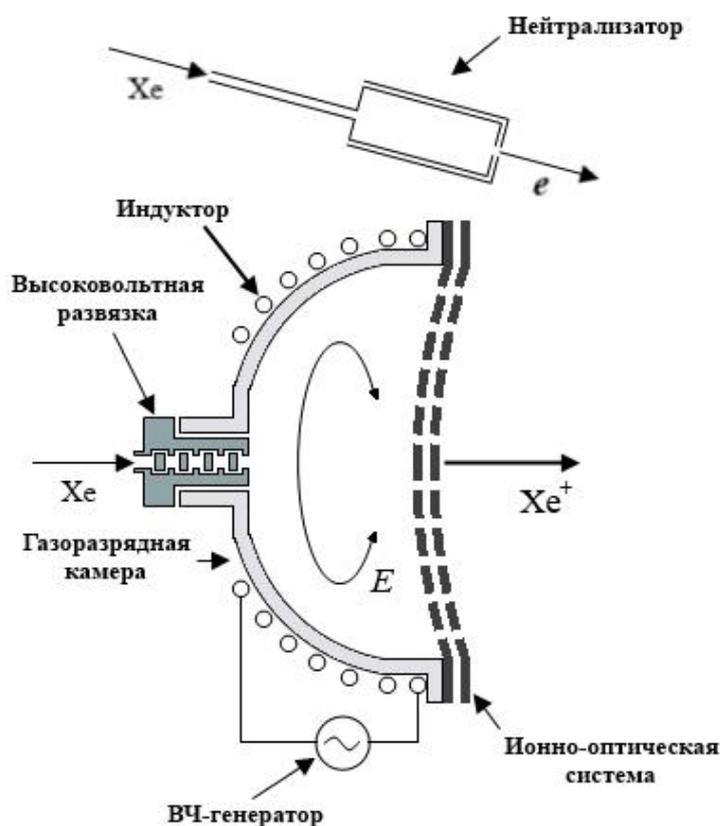


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема ИД с индукционным ВЧ разрядом (ВЧИД)

Плазмофизические процессы, приводящие к выделению тепла в элементах конструкции ВЧИД, осуществляются в ГРК и ИОС. Кроме того в индукторе и проводящих элементах конструкции тепло выделяется вследствие протекающих в них вихревых токов.

1.3 Физические процессы в газоразрядной камере при ВЧ-разряде

Процессы в ГРК ВЧИД можно рассматривать на основе следующих механизмов:

- поглощение (абсорбция) плазмой ВЧ мощности за счет того, что плазма обладает электропроводностью;
- плазмообразование, обусловленное ионизацией и нагревом электронов, приводящее к повышению внутренней энергии ионизованного газа;
- вынос мощности ионами и электронами на стенки, в том числе и энергии ионизации, выделяющейся при рекомбинации ионов и электронов, которая также преобразуется в тепло.

Как показано в [25], процессы в ГРК могут быть описаны следующим образом: ВЧ токи в индукторе ВЧГ генерируют в объеме ГРК ВЧ магнитное поле, индукция которого

описывается выражением: $B_{rf} = 1/2B_{rf0} \sin \omega t$, которое индуцирует электрическое ВЧ поле напряженностью $E_{ind} = 1/2B_{rf0} r \omega \cos \omega t$. Электрическое поле ускоряет электроны, осциллирующие с частотой поля. При неупругих столкновениях электронов с атомами или ионами рабочего газа происходит их возбуждение или ионизация.

Одновременно в результате ионизации образуются свободные электроны, а часть электронов покидают разряд, выпадая на поверхностях, ограничивающих разряд. Таким образом, ВЧ-разряд в высокочастотном источнике ионов является индукционным и самоподдерживающимся, и такая его реализация не требует постоянно действующего катода в качестве источника электронов внутри газоразрядной камеры. Для зажигания разряда после подачи газа и подвода мощности от ВЧ-генератора может применяться начальная импульсная инжекция электронов, эмитируемых внешним источником электронов (например, катодом-нейтрализатором).

Напряженности электрического и магнитного поля относительно малы, и поэтому ввиду значительной массы ионов рабочего газа (обычно это ксенон) можно считать, что поля не действуют на ионы. Ионы и атомы имеют малую температуру, определяемую температурой стенок газоразрядной камеры, находящейся около значений 250–300°C.

В работе предполагается в соответствие с экспериментальными данными [26], что электроны в плазме имеют максвелловское распределение с температурой T_e . В индукционном разряде T_e достаточно низкая и составляет 3–4 В в объеме разряда и 5–7 В в пристеночной области разряда (здесь и далее температура электронов выражается в вольтах). Как будет показано ниже, относительно низкая температура электронов, с одной стороны приводит к повышению удельных энергозатрат на ионизацию рабочего тела в объеме, а с другой - обуславливает низкое значение потенциала плазмы относительно стенок и, следовательно, низкую энергию ионов, выпадающих на внутреннюю поверхность газоразрядной камеры и поверхность эмиссионного электрода, обращенные к плазме, что исключает их эрозию.

Плазма в высокочастотном источнике ионов является слабо ионизированной. Степень его ионизации в плазме разряда не превышает 5%. Доля двухзарядных и многозарядных ионов не превышает 1% и их наличием, как правило, пренебрегают. Давление рабочего газа в газоразрядной камере составляет $\sim 10^{-1}$ Па. Характерные значения электронной плотности равны $n_e \sim 4 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Средняя длина свободного пробега электронов λ_e по отношению к электронно-атомным столкновениям при таких параметрах превышает характерные размеры разрядного объема. Экспериментально доказано, что плазма ВЧ разряда ВЧИД является разреженной и неравновесной. Следствием разреженности является то, что излучаемые возбужденными частицами фотоны доходят до стенок ГРК, не взаимодействуя с атомами, и

поглощаются стенкой. Следствием неравновесности является то, что температура электронов T_e намного больше температуры атомов T_a и ионов T_i .

Для представления состояния плазмы необходимо знать пространственные распределения концентрации атомов, и электронов (в условиях квазинейтральности концентрации электронов и ионов равны), а также температуры электронов. Моделирование процессов в ГРК основано на установлении баланса частиц и мощности в плазменном объеме, ограниченном стенками. Этот метод был успешно применен к исследованию несамостоятельного разряда постоянного тока, типичного для ионных двигателей на постоянном токе (ИДПТ) [27].

В разряде постоянного тока с горячим катодом мощность в объем плазмы вносится быстрыми электронами, ускоренными катодным падением потенциала. Быстрые электроны с энергией, превышающей энергию ионизации атома, вносят значительный вклад в ионизацию. В ВЧ индукционном разряде, несмотря на наличие ВЧ электрического поля, электроны распределены по энергиям, как указывалось выше, в соответствии с равновесным распределением Больцмана-Максвелла [26]. Основным механизмом установления такого распределения является термализация (электрон-электронные соударения). Благодаря этому процессу холодные электроны, образовавшиеся в результате неупругого соударения, приобретают температуру плазменных электронов, нагреваемых ВЧ электрическим полем. В экспериментальной работе [26] показано, что распределение Больцмана-Максвелла устанавливается в плазме индукционного разряда при концентрации электронов выше 10^{17} м^{-3} , что характерно для режимов разряда в двигателе. В самостоятельном ВЧ разряде баланс электронов определяется скоростью их образования в результате ионизации (скоростью ионизации) и скоростью их ухода (выпадения) на стенки ГРК. Последняя зависит от равновесного потенциала плазмы относительно стенок (положительного по знаку), который устанавливается автоматически. Баланс атомов и ионов в разряде определяется скоростями ионизации и ухода их на стенки ГРК и в отверстия в электродах ИОС, поскольку вероятность рекомбинации ионов и электронов в объеме близка к нулю. Рекомбинация ионов и электронов из плазмы разряда происходит на поверхностях ГРК.

1.4 Балансы частиц и мощности в плазме разряда

Балансовую модель можно построить по аналогии с [27]. По сравнению с [27] в случае индуктивного разряда в ВЧИД следует исключить компоненту быстрых электронов. Для

простоты исключены также процессы ступенчатой ионизации через метастабильные состояния, ввиду их малой вероятности.

1.4.1 Затраты мощности на ионизацию и радиационные потери в разряде

На Рисунке 1.2 приведены функция распределения электронов по энергиям dn/n , зависимости сечения ионизации σ_i и скорости ионизации $\frac{dn}{n}\sigma_i W_e$ от энергии W_e , рассчитанные для температуры электронов $T_e = 5\text{В}$. При интегрировании удобно перейти к скорости электрона $V_e = \sqrt{\frac{2W_e}{m_e}}$, где m_e - масса электрона, и пользоваться зависимостью $\sigma_i(V_e)$.

Зная эту функцию, можно рассчитать скорость (частоту) ионизации по формуле:

$$v_i = n_a n_e \langle \sigma_i V_e \rangle, \quad (1.1)$$

где n_a, n_e - концентрации атомов и электронов, соответственно.

Знак $\langle \rangle$ означает осреднение по скоростям электронов V_e для функции Максвелла.

Из рассмотрения зависимостей Рисунка 1.2 следует сделать некоторые выводы. Только электроны "хвоста" максвелловского распределения обладают энергией, превышающей энергию ионизации атома ксенона $E_i = 12,1 \text{ эВ}$.

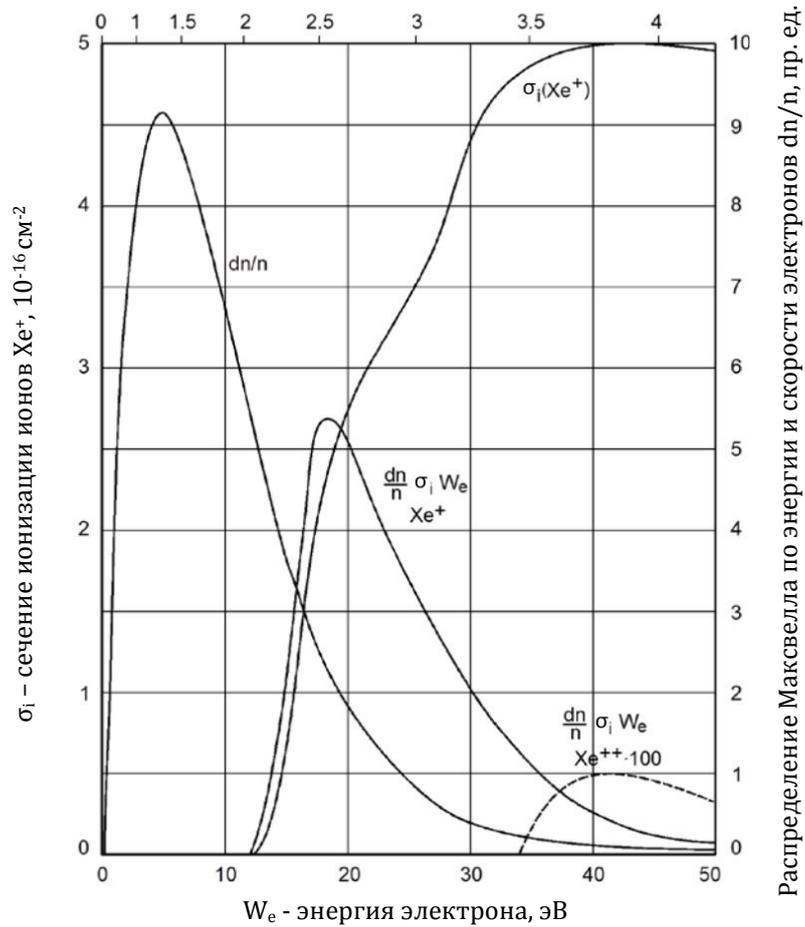
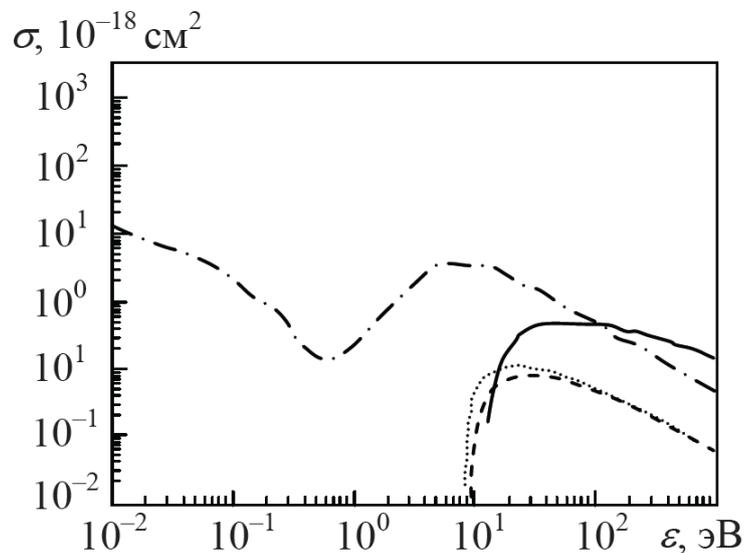


Рисунок 1.2 – Характеристики процесса ионизации [28]

С другой стороны, энергии возбуждения атомов ниже энергии ионизации, что приводит к тому, что на один акт ионизации может приходиться несколько актов возбуждения. На Рисунке 1.3 приведены зависимости сечений различных механизмов столкновения электронов с атомом ксенона от энергии электрона: упругое столкновение, ионизация и возбуждение первых двух энергетических уровней атома Хе.



Сплошная кривая — ионизация; пунктир — возбуждение состояния $5p56s$ [3/2]1 (порог возбуждения 8.437 эВ); штрихи — возбуждение состояния $5p56s'$ [3/2]1 (порог возбуждения 9.570 эВ); штрих-пунктир — упругие столкновения.

Рисунок 1.3 - Зависимость полных сечений столкновения электронов с атомом ксенона [29]

Поскольку энергия возбуждения, в основном, тратится на излучение, то эффективная энергия, затрачиваемая на производство одного иона в разряде (в литературе используется термин «цена иона в разряде»), может быть определена как:

$$C_{id} = V_i + C_R, \quad (1.2)$$

где C_R — суммарные радиационные потери во всех актах возбуждения-тушения, отнесенные к одному акту ионизации;

$V_i = 12,1$ В — потенциал ионизации атома Хе.

Подробный расчет величины радиационных потерь как функции T_e проведен для ксенона в [30]. Относительная величина затрат исходной ВЧ мощности на возбуждение атомов определяется соотношением сечений ионизации и возбуждения атомных уровней атомов рабочего газа. Она определяется путем интегрирования по максвелловскому распределению энергии, передаваемой электронами атомам при неупругих столкновениях с учетом сечения возбуждения атомных уровней. На Рисунке 1.4 приведена зависимость удельных потерь энергии на образование в разряде плазмы одного иона C_R для ксеноновой плазмы при различных значениях T_e , полученная в [30]. Зависимость имеет характерный вид: с ростом T_e удельные радиационные потери и, соответственно, цена иона в разряде снижается. Индукционный ВЧ разряд является самостоятельным. Температура ионов в нем устанавливается при «автоматическом» выполнении условий баланса мощности и частиц. Как показывают зондовые исследования параметров плазмы в объеме ГРК [31, 32, 33, 34], температура электронов в нем составляет 4-6 эВ и слабо зависит от величины подводимой к разряду ВЧ мощности. При такой температуре электронов радиационные потери составляют 4-6 эВ на один акт ионизации (Рисунок 1.4).

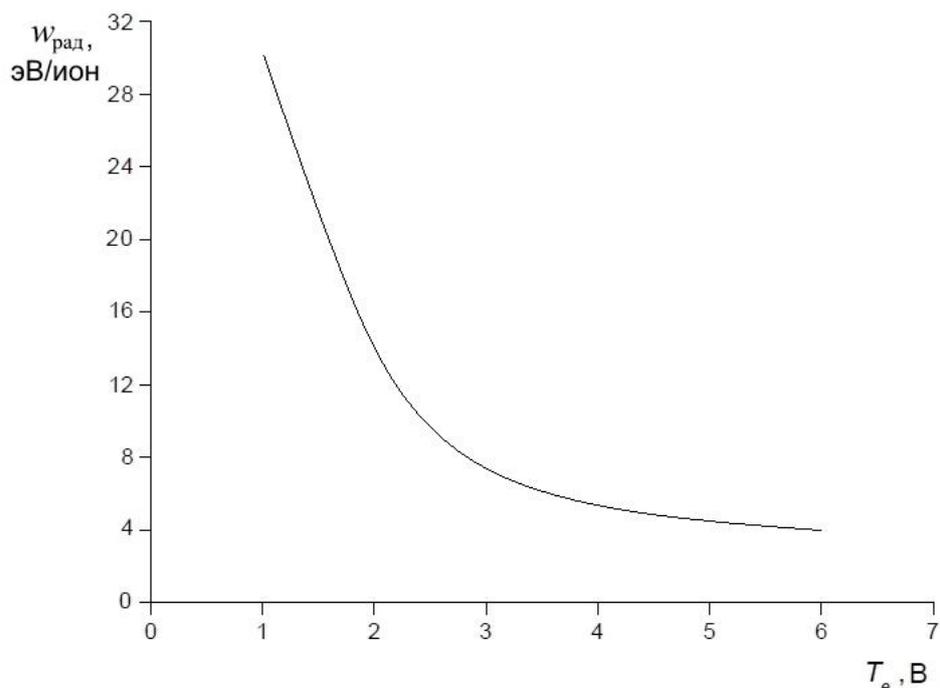


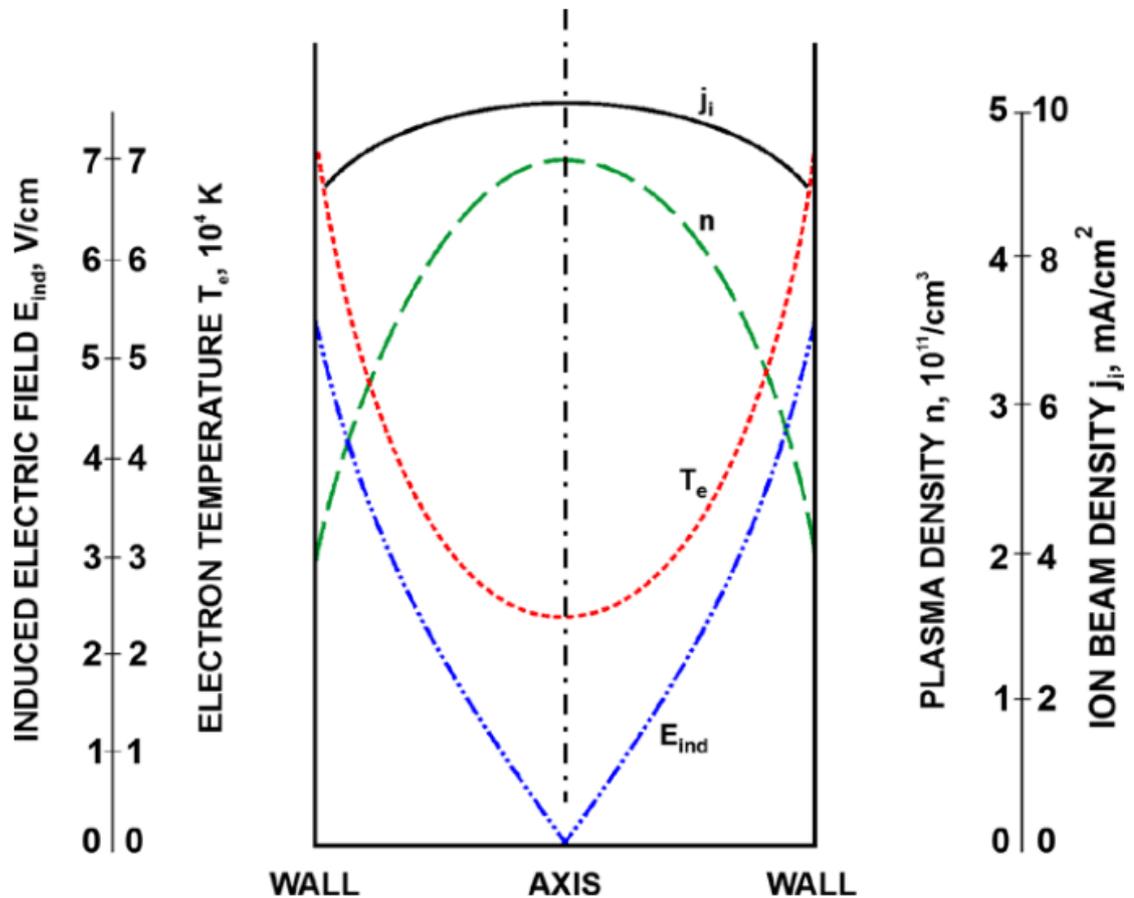
Рисунок 1.4 – Зависимость удельных радиационных потерь в объеме разряда от T_e [30]

Повышение удельных радиационных потерь при уменьшении T_e объясняется возрастанием числа актов возбуждения на один акт ионизации.

Как видно из рисунка 1.2, образование двукратно заряженного иона (Xe^{++}) при максвелловском распределении электронов с температурой 5 В маловероятно. Эксперименты [35] подтверждают, что в индукционном ВЧ разряде доля двукратно заряженных ионов не превышает 1%. По этой причине двукратно заряженные ионы в балансе мощности в разряде не рассматриваются.

1.4.2 Уравнения баланса ионов, электронов и мощности в разряде

Проблема составления уравнений баланса заключается в неравномерном распределении параметров плазмы и поглощаемой мощности по объему. Основные параметры плазмы в разряде в зависимости от радиуса, отсчитываемого от оси ГРК, схематично приведены на рисунке 1.5.



E_{ind} – амплитуда напряженности вихревого электрического поля;

j_i – плотность ионного тока.

Рисунок 1.5 - Радиальное распределение параметров плазмы [35]

Электронная температура максимальная на стенках ГРК, в то время как электронная плотность наоборот уменьшается от оси камеры к её стенкам. То обстоятельство, что плотность ионного тока, определяемого T_e и n_e (см. ниже), изменяется в небольших пределах, позволяет использовать приближение однородной плазмы с равномерно распределенными по объему основными параметрами плазмы разряда n_e и T_e , что и было принято в данном исследовании. Таким образом, под T_e и n_e здесь и далее принимаются некие средние величины, определяющие производные от них интегральные параметры плазмы такие, как плотность и значение ионного тока пучка, величины пристеночного падения потенциала плазмы вблизи поверхности ГРК и ЭЭ.

Уравнения баланса ионов рабочего газа для однородной плазмы имеют при этих условиях следующий вид:

$$I_u = n_e n_a \langle \sigma_{ai} V_e \rangle V_d = 0,43 n_e \sqrt{\frac{2eT_e}{M}} S_d \quad (1.3)$$

Баланс электронов:

$$n_e n_a \langle \sigma_{ai} V_e \rangle V_d = 0,25 \sqrt{\frac{8eT_e}{\pi m_e}} \exp\left(-\frac{\Delta U}{T_e}\right) S_d \quad (1.4)$$

Уравнение баланса мощности:

$$N_{rf} = n_e n_a \langle \sigma_{ai} V_e \rangle C_{id} V_d = 0,25 e n_e \sqrt{\frac{8eT_e}{\pi m_e}} \exp\left(-\frac{\Delta U}{T_e}\right) \frac{5}{2} T_e S_d + 0,43 e n_e \sqrt{\frac{2eT_e}{m_e}} \Delta U \cdot S_d, \quad (1.5)$$

где N_{rf} – ВЧ мощность, поглощенная плазмой, Вт;

I_u – полное ионообразование в плазменном разряде, А;

M – масса атома (иона) рабочего газа;

ΔU – пристеночное падение потенциала плазмы;

V_d – объем плазмы в ГРК;

S_d – площадь поверхности, окружающей разрядный объем;

$\langle \sigma_{ai} V_e \rangle$ – усреднение сечения ионизации по скоростям электронов V_e .

Правые части уравнений (1.3), (1.4) представляют собой число частиц, образующихся в единицу времени в объеме разряда, а левые – скорость их выпадения на поверхность S_d . Левая часть уравнения (1.5) – мощность, затрачиваемая на образование частиц, а правая – мощность, выносимая частицами на стенку. Все параметры плазмы, включая величину C_R , используемые в уравнениях, можно рассматривать как локальные. В случае если их пространственное распределение, полученное, например, в результате зондовых измерений, известно, объем плазмы может быть разбит на элементарные объемы, в каждом из которых рассчитываются число рождающихся частиц и поглощенная плазмой мощность. Полная мощность и полное образование частиц получают простым суммированием по объему и поверхности. Однако, как правило, тепловая модель двигателя разрабатывается на этапе проектирования, когда данные о параметрах плазмы разряда отсутствуют. В силу этого в тепловых моделях обычно используются упрощенные модели разряда, аналогичные излагаемой ниже.

Полный поток ионов I_u , образующихся в объеме разряда, выраженный в единицах тока, определен в (1.3). Ток пучка ионов I_0 формируется ионами, попадающими в отверстия ЭЭ. Определим удельные затраты мощности C_i на получение ионного тока («цена иона») следующим образом [36, 37]:

$$C_i = \frac{W_{BЧ}}{I_0} \quad (1.6)$$

Цена иона может быть представлена в следующем виде:

$$C_i = C_{di} \frac{I_0}{I_u} \quad (1.7)$$

Большая часть вводимой ВЧ мощности (от 80% до 90%), преобразуется при выпадении компонентов плазмы - ионов, электронов и фотонов-на внутренние поверхности ГРК и поверхность эмиссионного электрода ИОС, обращенную к ГРК, в тепло. Величина удельного потока мощности, преобразующегося в тепло, определяется плотностью потока ионов и электронов, выпадающих на стенки ГРК. Плотность тока ионов определяется основными параметрами плазмы в пристеночной зоне – электронной плотностью n_e и температурой T_e (закон Бома):

$$j_{i_B} = 0,43en_e\sqrt{\frac{2eT_e}{M}} \quad (1.8)$$

Значение числового коэффициента в (1.8) различно у различных авторов. Встречаются также значения 0.5, 0.606 и другие [11]. Отчасти поэтому в предлагаемой ниже тепловой модели напрямую не используется плотность бомовского тока. В качестве одного из основных параметров модели используется ионный ток I_0 из ВЧИИ. Численное значение I_0 несложно определить экспериментально. В соответствии с законом сохранения заряда вблизи ЭЭ ионный ток из ВЧИД в точности равен току в цепи питания ЭЭ и может быть измерен с помощью обычного амперметра. Ток пучка ионов на этапе проектирования задается разработчиком, как основной параметр, определяющий тягу двигателя. Таким образом, на всех этапах разработки можно использовать ток пучка как известный параметр.

1.4.3 Пристеночное падение потенциала

В установившихся условиях, когда параметры плазмы остаются неизменными, число частиц, образованных в плазме в единицу времени, должно равняться количеству частиц, покидающих плазму. При наличии диэлектрических стенок или металлических стенок под плавающим потенциалом условия ухода частиц на стенку должен удовлетворять условию равенства плотности электронного и ионного токов. Поскольку подвижность и тепловая скорость электронов намного превосходит подвижность ионов, то вблизи поверхности должен установиться переходный слой, в котором нарушено условие квазинейтральности и между стенкой и невозмущенной плазмой устанавливается потенциальный барьер для электронов.

Образованное в плазме электрическое поле сосредоточено в пристеночной области, где существует нескомпенсированный пространственный заряд. Эта область получила название пристеночного слоя. Пристеночный слой создает потенциальный барьер ΔU для электронов, благодаря которому в плазме удерживается ее наиболее быстрый компонент. Высота барьера

поддерживается таким образом, чтобы выполнялось условие непрерывности тока, то есть, чтобы сохранялся баланс генерации и потерь заряженных частиц в плазме. В частности, если стенка изолирована, то потоки ионов и электронов на эту стенку должны быть равны.

$$J_i = J_e \quad (1.9)$$

Из этого равенства следует:

$$en_e \sqrt{\frac{8T_e}{\pi m_e}} \times \exp\left(-\frac{\Delta U}{T_e}\right) = 0,43en_e \sqrt{\frac{2eT_e}{M}} \quad (1.10)$$

Решая уравнение (1.10) относительно V_e можно получить выражение для пристеночного падения потенциала вблизи поверхности керамической ГРК:

$$\Delta U = T_e \cdot \ln\left(\frac{1}{0,84} \cdot \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot m_e}}\right) \quad (1.11)$$

Здесь и далее в работе подразумевается, что в качестве рабочего тела используется ксенон, как наиболее распространенный вид рабочего газа в современных ВЧИД, т.е. $M = M_{Xe} = 131$ ат. ед. Также в качестве рабочего тела в ВЧИД предлагались и другие материалы, в том числе и химически активные и атмосферные газы [35, 38, 39, 40, 41]. Из (1.11) получаем, что

$$\Delta U_{ГРК} = 5,8T_e \quad (1.12)$$

Падение потенциала у поверхности эмиссионного электрода $\Delta U_{ЭЭ}$ оказывается немного меньше (1.12) из-за частичного ухода ионного потока из плазмы в отверстия электрода, а именно:

$$\Delta U_{ЭЭ} = T_e \cdot \ln\left(\frac{1 - \sigma_{ЭЭ}}{0,84} \cdot \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot m_e}}\right) \approx 5,1T_e \quad (1.13)$$

1.5 Теплофизические процессы в ионно-оптической системе

Электроды ИОС подвергаются воздействию тепловых потоков, идущих от компонентов плазмы разряда в ГРК – ионов, электронов и фотонов. На поверхность УЭ при работе двигателя выпадают ионы перезарядки, образующиеся в объеме выходящего ионного потока, как в межэлектродном промежутке, так и в зоне нейтрализации пучка, находящейся за выходным сечением ускоряющего электрода. Также электроды ИОС подвергаются тепловому излучению, идущего от внутренней поверхности ГРК, нагретой до температур порядка 300 °С.

1.5.1 Формирование ионного пучка

Многоапертурная трехэлектродная ИОС предназначена для решения следующих задач: извлечения ионов из плазмы, ускорения их до заданной скорости и формирования хорошо сфокусированного ионного пучка. ИОС ВЧ ИД (ЭЭ) должна иметь высокую прозрачность по ионам (55 - 57%), а по атомам (УЭ) - существенно более низкую для возможно большего уменьшения потока нейтральных атомов рабочего газа, вытекающего из ГРК через отверстия в ИОС.

Межэлектродные зазоры должны определяться как компромисс между двумя противоречивыми условиями: обеспечить достаточно высокий запас по пробойной прочности и обеспечить необходимую плотность извлекаемого тока. Материал электродов и конструкция узла ИОС должны удовлетворять требованиям стабильности при термомеханических воздействиях и эрозионной стойкости к воздействию ионной бомбардировки.

В качестве исходных данных для расчета ионно-оптической системы служит распределение по радиусу ГРК температуры электронов T_e и концентрации электронов n_e .

Ток пучка ионов I_0 получается с учетом геометрической прозрачности эмиссионного электрода $\sigma_{ЭЭ}$ и дополнительного параметра $\gamma > 1$, который учитывает отклонение от сферической кривизны собирающей поверхности ионов («плазменного мениска»):

$$I_0 = \gamma \cdot \sigma_{ЭЭ} j_i S_{Э}, \quad (1.14)$$

где j_i – плотность боровского тока, определенная в (1.8);

$S_{Э}$ - площадь перфорированной части эмиссионного электрода.

1.5.2 Конфигурация и основные физические процессы в ИОС

Конфигурация ИОС, физические параметры и процессы в ИОС схематично приведены на рисунке 1.6.

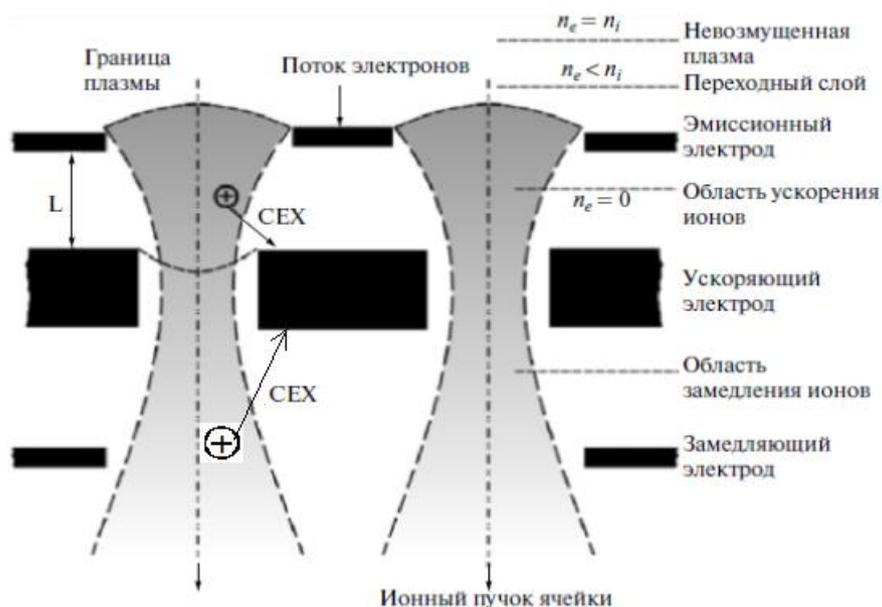


Рисунок 1.6 – Схема процессов в ИОС [41]

На рисунке схематично показано поперечное сечение двух соседних элементарных ячеек двухэлектродной ИОС, в конструкции которой ЗЭ выполнен в виде кольца, охватывающего весь пучок. Геометрия ячеек, значения потенциалов на ЭЭ и УЭ, а также параметры плазмы в ГРК определяют ток ионов (плотность ионного тока) в элементарных ячейках.

По обе стороны ИОС существуют области, в которых имеется квазинейтральная плазма: плазма ГРК со стороны ЭЭ и плазма в области распространения квазинейтрального пучка ионов. Наличие потенциальных барьеров для электронов, как со стороны ГРК, так и со стороны области нейтрализации, приводят к образованию плазменных границ («прямого» и «обратного» «плазменных менисков») – переходных слоев, в которых концентрация плазмы спадает от некоторого своего значения до нуля (см. Рисунок 1.6).

Характерные траектории ионов в ИОС, рассчитанные с помощью программы IGUN [42], приведены на рисунке 1.7.

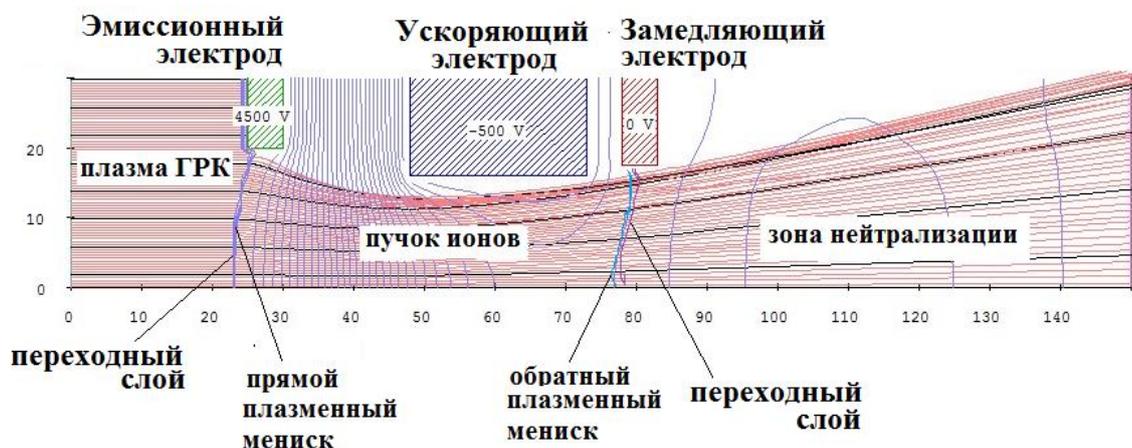


Рисунок 1.7 – Расположение плазменных границ в ИОС [41]

1.5.3 Бомбардировка ускоряющего электрода ионами перезарядки

При рассмотрении тепловой модели ВЧИД необходимо учесть тепловыделение в УЭ, связанное с бомбардировкой УЭ ионами перезарядки. Ток ионов на ускоряющий электрод зависит как от конструктивных параметров ячейки ИОС, так и от режимных параметров двигателя.

Один из процессов, ведущий к выделению тепла в УЭ ИОС, обусловлен образованием медленных ионов в результате резонансной перезарядки быстрых ионов пучка на атомах рабочего тела:



Образуется два потока (две группы) ионов перезарядки, взаимодействующих с электродами ИОС:

- ионы рождаются в межэлектродном промежутке (первая группа),
- ионы образуются в области нейтрализации пучка ионов (вторая группа).

Образовавшиеся ионы перезарядки имеют тепловую скорость, практически, нулевую энергию, и ускоряются в электростатическом поле и выпадают на отрицательно заряженный ускоряющий электрод. Потенциал УЭ обычно составляют значения порядка минус 200-500 В, что необходимо для создания потенциального барьера для электронов из зоны нейтрализации. Ионы перезарядки, ускоряясь в электростатическом поле УЭ, бомбардируют его поверхность с энергией, зависящей от значения потенциала в точке их образования. В случае если приобретенная энергия перезарядного иона превышает порог распыления материала УЭ (~ 30-40 эВ), происходит распыление поверхности УЭ. Именно этот механизм эрозии поверхности УЭ определяет в значительной мере ресурс работы двигателя [41, 43, 44, 45]. Оценка плотности мощности, выносимой на УЭ ионами перезарядки, требует детального расчета.

1.5.3.1 Вынос мощности на УЭ ионами из межэлектродного промежутка ИОС

Образование ионов первой группы показано на схеме (см. рисунок 1.8). Энергия ионов этой группы w_i при столкновении с поверхностью УЭ зависит от разности потенциалов между

местом рождения перезарядного иона и УЭ и находится внутри следующего энергетического диапазона:

$$0 \leq w_i \leq eU_{ЭЭ} \quad (1.16)$$



Рисунок 1.8 – Область образования вторичных ионов первой группы в межэлектродном промежутке [44]

В соответствии с результатами расчетов, приведенных в [44] меньшая часть ионов этого потока вылетает через отверстие в УЭ, а большая - бомбардирует поверхность УЭ, вызывая эрозию УЭ, приводящую, в основном, к увеличению диаметра отверстия в УЭ.

Поток вторичных ионов также определяется вероятностью перезарядки p_p быстрых ионов пучка на медленных атомах ксенона, истекающих из ГРК. Приближенная оценка потока ионов перезарядки из объема пучка в межэлектродной области при известной величине межэлектродного зазора l может быть получена следующим образом. Вероятность перезарядки на малых расстояниях пробега ионов (порядка межэлектродного зазора) может быть оценена по формуле:

$$p_p = \sigma_{io} n_0 l, \quad (1.17)$$

где n_0 – концентрация атомов рабочего газа;

l – длина межэлектродного промежутка.

Сечение перезарядки σ_{io} для ионов ксенона для указанных энергий ионов довольно велико и составляет $\sigma_{io} \approx 4 \times 10^{-19} \text{ м}^2$ [46]. При концентрации атомов в межэлектродном промежутке $n_0 \approx 2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и расстоянии между электродами $l \approx 1 \text{ мм}$, вероятность перезарядки согласно формуле (1.17) составит $p_p \approx 0.84 \times 10^{-3}$. Если предположить, что все ионы перезарядки, образовавшиеся в межэлектродном промежутке, выпадают на УЭ, то их вклад в ток в цепи питания электрода не превысит 0,1 % от тока ионов пучка. Вместе с тем, из экспериментов известно, что ток в цепи УЭ составляет 2–3 % от тока ионов пучка. Это

означает, что основной вклад в поток на УЭ вносят ионы перезарядки из области нейтрализации.

1.5.3.2 Вынос мощности на УЭ ионами из области нейтрализации пучка

Вторая часть потока ионов перезарядки, падающих на УЭ, возникает в процессе перезарядки ионов, образующихся на выходе из УЭ ИОС, см. рисунок 1.8. Расчет траекторий ионов и потенциалов электростатического поля выполнен также как и расчет траекторий и потенциалов поля, результаты которого приведены на рисунке 1.9 с помощью программы IGUN [42]. В отличие от схемы расположения электродов, приведенной на рисунке 1.7, эмиссионный и замедляющий электроды поменяны местами. Это связано с особенностью работы программы IGUN.



Температура электронов $T_e = 5$ эВ, ток ячейки $I = 5.57 \times 10^{-5}$ А; ток ионов перезарядки составляет 1% от тока ионов пучка. Масштаб координатной сетки $\text{мм} \times 10$.

1 – траектории вторичных ионов, отраженных от виртуального анода, 2 - эквипотенциальные кривые.

Рисунок 1.9 - Траектории ионов перезарядки из зоны нейтрализации[44]

Медленные ионы перезарядки движутся в сторону УЭ под действием его отрицательного потенциала, что вызывает эрозию поверхности УЭ, в основном со стороны, обращенной к ЗЭ. В случае конструкции ИОС, изображенной на рисунке 1.9, замедляющий электрод выполнен также как ЭЭ и УЭ в виде перфорированной отверстиями сетки. В этом случае часть потока ионов перезарядки попадает на него. В большинстве известных конструкций ЗЭ выполняется в

виде кольца и в этом случае основной поток ионов перезарядки падает на поверхность УЭ со стороны зоны нейтрализации.

Величины тепловых потоков, приносимые на УЭ ионами перезарядки, определяются током ионов перезарядки и средней энергией, передаваемой ими атомам поверхности УЭ. Экспериментально эти токи легко определяются как ток в цепи питания УЭ. В проектных оценках его задают как 10-11% от тока пучка ионов.

1.6 Исследования по разработке расчетных тепловых моделей в ВЧИД

Технология ВЧИД наиболее успешно развивается в Германии. С 2010 года технология ВЧИД развивается в России. В странах, где проводятся исследования и разработка электрических ракетных двигателей, развиваются другие типы ионных двигателей. По этой причине работ, посвященных разработке тепловых моделей ВЧИД и экспериментальному исследованию тепловых полей в них немного.

1.6.1 Экспериментальные исследования тепловых процессов в ВЧИД

Наиболее полное экспериментальное исследование различных характеристик в ВЧИД были выполнены в Институте модификации поверхностей (ИОМ) в Лейпциге, Германия [47, 48, 49, 50] для двигателя RIT-22. Двигатель RIT-22 рассматривался в качестве основного элемента электроракетной двигательной установки в миссии BePiColombo [20]. Был выполнен большой объем квалификационных испытаний, проведена диагностика интегральных характеристик двигателя на современной технической базе. В [48] выполнены исследования по определению распределения температуры по поверхности УЭ при трех значениях ВЧ мощности (и тяги) двигателя. Измерения температуры производилось пирометрическим способом.

Результаты измерений показаны на рисунке 1.10.

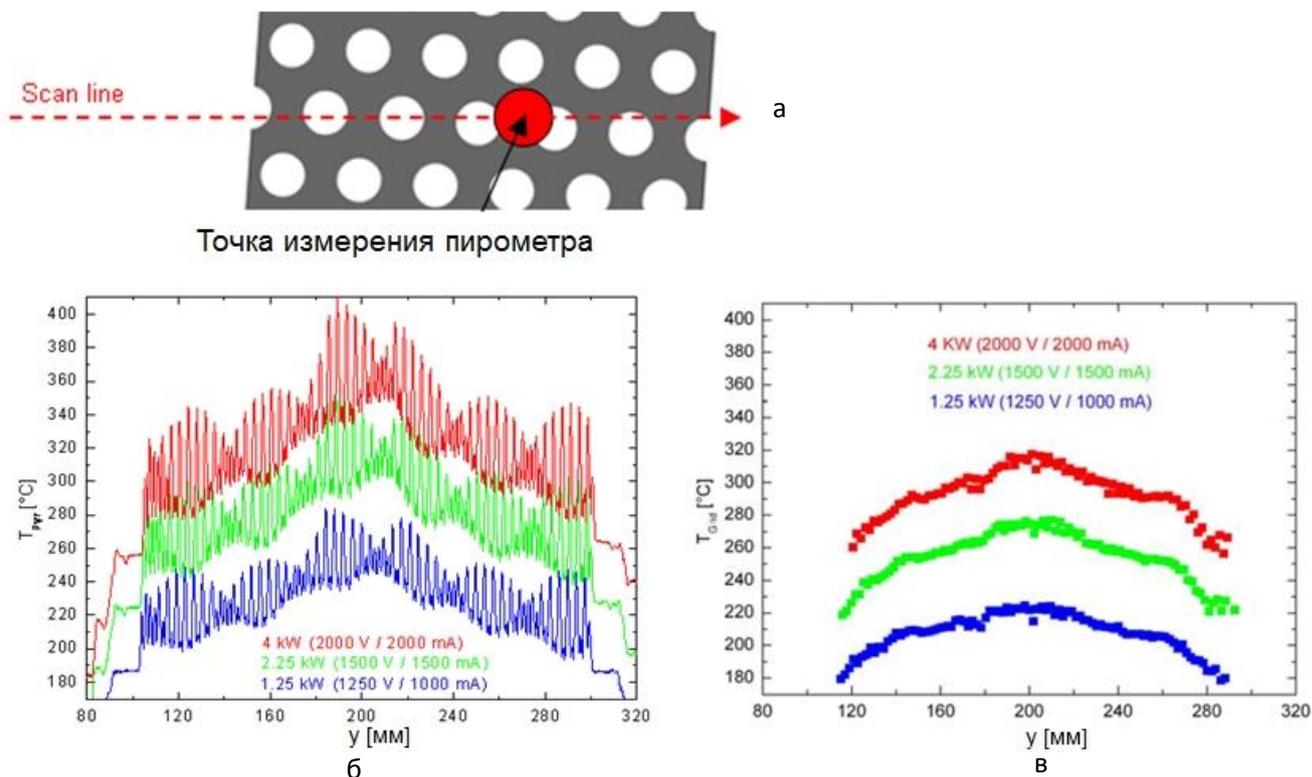


Рисунок 1.10 – Измерения температур в RIT-22 с помощью пирометра [48]

Недостатки пирометрического способа измерений температур применительно к исследованию распределения температуры на электродах ИОС ВЧИД понятны из рисунка 1.10а. При перемещении пятна пирометра по радиусу УЭ диаметр пятна превосходил размер перемычек между отверстиями, поэтому при измерениях тепловое излучение из отверстий частично попадало в апертуру пирометра, шаржируя результаты определения температуры собственно электрода. В результате сигнал пирометра имел сильно осциллирующую форму, см. рисунок 1.10б. Для выделения полезного сигнала, т.е. его фильтрации была разработана специальная методика, изложенная в [47]. Результат такой обработки сигнала приведен на рисунке 1.10в. Несмотря на эти недостатки, интерес представляет зависимость температуры УЭ и характер ее распределения по радиусу, полученные для разных режимов и приведенных на рисунке 1.10в. В работе не приведена мощность ВЧГ, а только полная мощность двигателя, ток пучка ионов и потенциал ЭЭ. Однако, как указывалось выше концентрация плазмы, а следовательно и ионный ток примерно пропорциональны ВЧ мощности. Полагая $C_i \approx 400$ Вт/А, можно оценить ВЧ мощность на режиме с током 1 А в 400 Вт, с током 1,5 А в 600 Вт и с током 2 А – 800 Вт (предельная рабочая мощность ВЧГ RIT-22). Как видно из рисунка, температуры УЭ определяются мощностью, вкладываемой в двигатель, и уменьшаются от центра к краю УЭ. Перепад температур составляет 50...60 °С. Для режима работы двигателя с током в 1 А температуры в УЭ меняются от 220 °С (в центре) до 180 °С, а при токе 2 А – от 320 °С до 260 °С.

Определенный перепад температур по радиусу со средним градиентом $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$ определяет тепловую нагрузку на электрод, вызывающую его деформацию.

Современные методики измерения температур в настоящее время предполагают использование тепловизоров, позволяющих получить температурную картинку для значительных по размеру областей объекта. Это позволяет для рассматриваемого объекта – ВЧИД проблем с засветкой датчика излучением из ГРК. Роль пятна пирометра в тепловизоре выполняет отдельный пиксель микроболометрической матрицы. Этот способ экспериментального определения температуры использован в диссертации. Все методические вопросы по этому методу рассмотрены в главе 4.

Любой оптический способ не позволяет определить температуру ЭЭ – наиболее нагретого и потому критического элемента конструкции двигателя. Это подчеркивает важность разработки расчетной тепловой модели ВЧИД двигателя, а в экспериментах использовать термопарный метод измерения температуры.

Достаточно подробное измерение температур с помощью термопар были выполнены для двигателя на постоянном токе NEXT PM1 производства США [51, 52]. Схема расположения термопар приведена на рисунке 1.11.

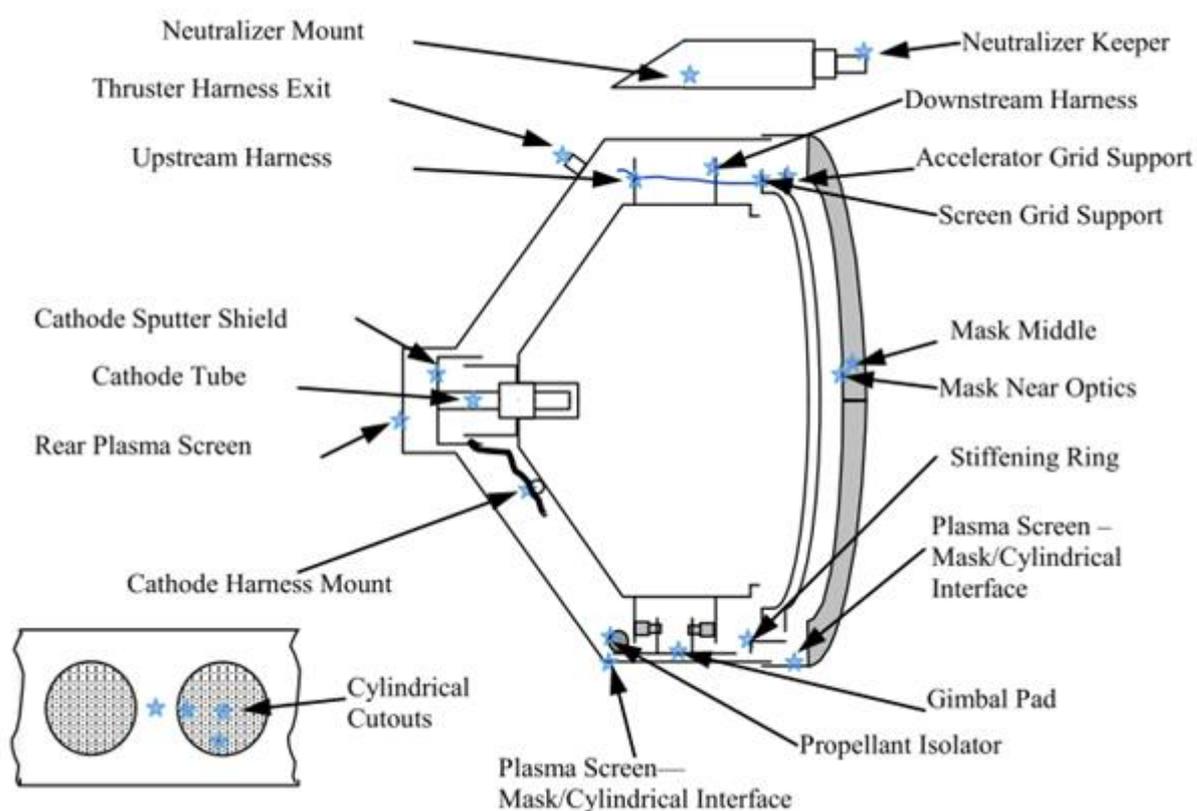


Рисунок 1.11 – Схема измерения температур с помощью термопар в ионном двигателе на постоянном токе NEXT PM1 [52]

С использованием большого количества термопар были выполнены измерения температур в Германии В. Гартнером для ВЧ ионного двигателя μ NRIT – 2.5 [53] и Д. Фейли для двигателя RIT-3.5 [54]. Данные измерения температур были выполнены в том числе и для верификации разработанных авторами расчетных тепловых моделей.

1.6.2 Расчетные тепловые модели для ВЧ ионных двигателей

Наиболее полно процессы в газовом разряде учтены в тепловой модели, разработанной Ван Ноордом для ионных двигателей на постоянном токе (ИДПТ) с расходящимся от катода к ЭЭ магнитным полем [52] (рисунок 1.11). Важно, что в [52] дано детальное описание составляющие тепловых потоков, идущих на поверхности различных узлов конструкции ИДПТ из плазмы, имеющее общий характер, то есть справедливое и для ВЧИД. Следует учесть, однако, что соотношение основных компонентов выпадающей мощности на элементы конструкции в ИДПТ и ВЧИД существенно отличаются. В ИДПТ имеется развитой анод, находящийся под отрицательным падением потенциала, а движение электронов к аноду происходит в результате диффузии поперек магнитного поля. Это приводит к существенной неоднородности распределения плазмы по радиусу. Кроме того, в балансе частиц и мощности в ИДПТ большую роль играют первичные электроны, эмитируемые катодом и ускоренные на катодном падении потенциала до энергии примерно в 2,5-3 раза превышающую энергию ионизации ксенона. Наконец, электронный ток на анод ИДПТ не менее, чем в 5 раз превышает ток ионов, в то время как в ВЧИД токи ионов и электронов на стенки равны, а электроны большой энергии вовсе отсутствуют. Для случаев ВЧ ионных двигателей в расчетных моделях необходимо также учитывать тепловые потоки, возникающие от ВЧ нагрева вихревыми индукционными токами, возникающих в проводящих элементах конструкции. Все названные отличия делают задачу разработки тепловой модели ВЧИД как самостоятельную проблему. В связи с этим более подробно следует рассмотреть расчетную тепловую модель ВЧИД, предложенную в работе Д. Фейли [54].

Выражения для тепловых потоков в расчетной тепловой модели Д. Фейли имеют в интегральной форме следующий вид:

$$W_{ГРК} = I_{ГРК} \left(\Delta U_{ГРК} + \frac{5}{2} T_e + V_i \right) \quad (1.18)$$

$$W_{eЭЭ} = I_{eЭЭ} (\varphi_e + 2T_e) \quad (1.19)$$

$$W_{iЭЭ} = I_{iЭЭ} \left(\Delta U_{ЭЭ} + \frac{1}{2} T_e + V_i - \varphi_{eЭЭ} \right) \quad (1.20)$$

$$W_{CEX} = I_{ceex} \left(U^- + V_i - \varphi_{eYЭ} \right), \quad (1.21)$$

где $W_{ГРК}$ – мощность, приносимая ионами и электронами на ГРК;

$W_{eЭЭ}$ – мощность, приносимая электронами на поверхность ЭЭ;

$W_{iЭЭ}$ – мощность, приносимая ионами на поверхность ЭЭ;

$W_{iЭЭ}$ – мощность, приносимая ионами на поверхность ЭЭ;

W_{CEX} – мощность, приносимая ионами перезарядки на поверхность УЭ;

U^- – потенциал УЭ;

$\varphi_{eЭЭ}$ и $\varphi_{eYЭ}$ – работа выхода электронов для материала ЭЭ и УЭ соответственно, выраженная в вольтах.

Если сравнить эти выражения с уравнениями Ван Ноорда [52], то у Фейли средняя энергия, приносимая электроном на поверхность ЭЭ принималась равной $\frac{5}{2} T_e$, а у Ван Ноорда $2T_e$. Кроме этого, энергия иона при выпадении на поверхность ЭЭ принималась равной у Ван Ноорда $\Delta U_{ЭЭ} + V_i$ у Фейли $\Delta U_{ЭЭ} + V_i + \frac{T_e}{2}$. При равенстве ионного и электронного тока на ЭЭ (при плавающем потенциале ЭЭ) разница в $T_e/2$ нивелируется.

Важным параметром в уравнениях является потенциал плазмы $U_{пл}$. Его прямое измерение сопряжено с большими сложностями зондовой методики. Косвенно оценить эту величину можно из измерений спектра энергии ионов в выходящем пучке. Такие измерения были выполнены и приведены в [50]. Энергетические спектры ионов, вылетающих из двигателя РИТ-22 при различных углах измерения отклонения ионов от оси пучка, приведены на рисунке 1.12. Точность измерения энергии ионов с помощью энергоанализатора по утверждению авторов составляла 0,1 эВ.

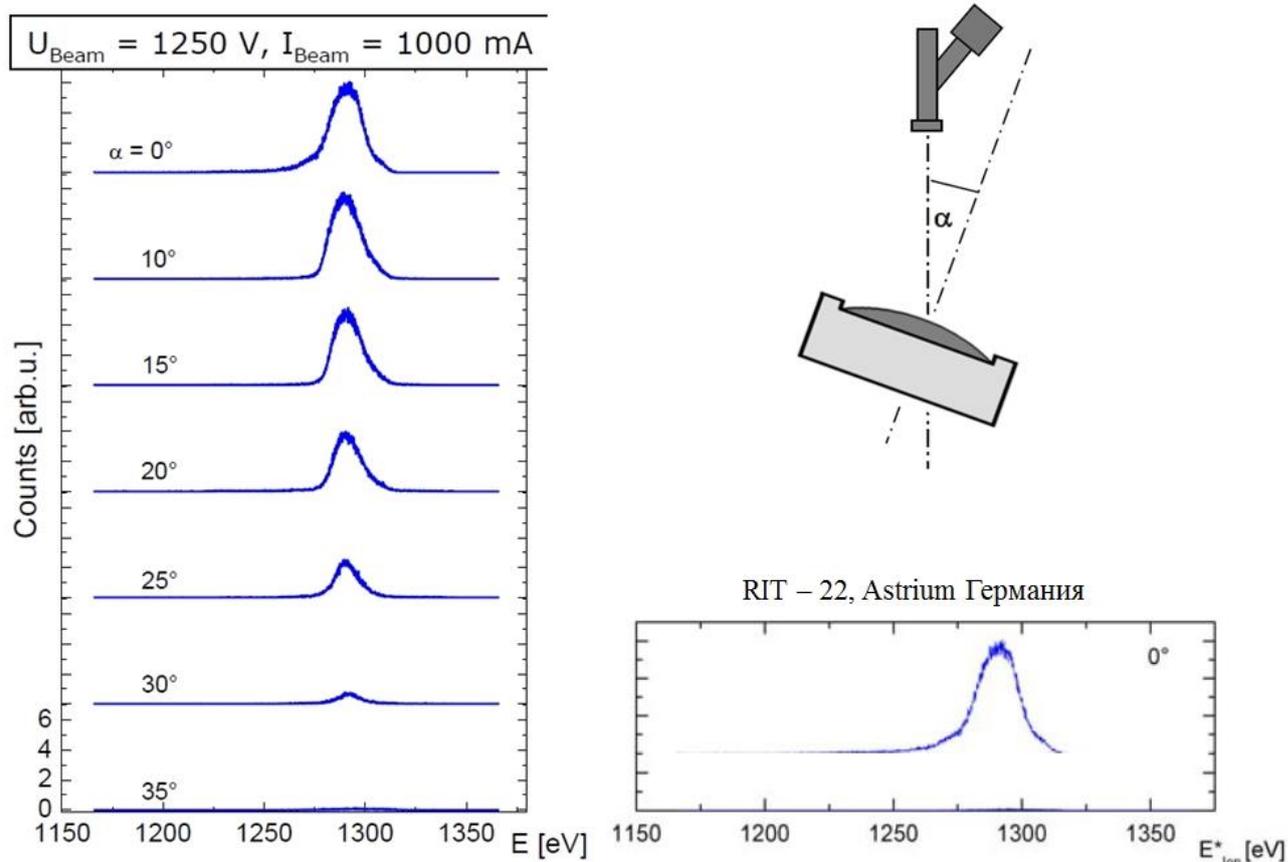


Рисунок 1.12 – Энергетический спектр ионного пучка двигателя RIT-22 [50]

Ускоряющее напряжение составляло 1250 В, а измеренный спектр по энергиям ионов выявил максимум по энергиям равный 1290 В при всех углах отклонения ионов, что означало наличие дополнительного ускорения ионов в пристеночной области ЭЭ на энергию, равную 40 эВ, по которой можно оценить значение пристеночного падения потенциала плазмы на уровне 40 В в качестве оценки сверху. Эта величина хорошо коррелирует с результатами расчета по формулам 1.12 и 1.13, если использовать значение $T_e \approx 7$ В.

В диссертации использованы выражения для тепловых потоков, аналогичные использованным Ван Ноордом с некоторыми изменениями, которые не были учтены другими авторами. Данные изменения изложены подробно в главе 2 при описании выражений тепловых потоков, использованных в данной работе.

1.6.3 Постановка задачи. Математическая модель тепловых процессов в ВЧИД

Разработка тепловой схемы двигателя является одной из основных задач на этапе проектирования. Исследование тепловых процессов должны доказать, что разрабатываемый двигатель удовлетворяет требованию надежного функционирования и определить условия его

интеграции с системами КА. Нагрев элементов конструкции двигателя вызывает напряжения и деформацию в элементах конструкции двигателя. Особенно важную роль в работоспособности двигателя является стабильность геометрических параметров ионно-оптической системы (ИОС). Неравномерный нагрев электродов ИОС приводит к их деформации [23, 55] и возможному изменению межэлектродного промежутка, что влечет за собой ухудшение основных характеристик ИОС. Конструкция и применяемые в двигателе конструкционные материалы должны исследоваться на устойчивость к термомеханическим нагрузкам, что подчеркивает важность моделирования тепловых процессов в двигателе, особенно на этапе предварительной проработки конструктивной схемы и технологических процессов изготовления двигателя.

Таким образом, расчет должен определить критические режимы работы двигателя, при которых те или другие элементы конструкции достигают критических температур. Во ВЧИД таким критическим элементом априорно является тонкостенный ЭЭ. При использовании титановых сплавов для его изготовления рабочая температура ЭЭ ограничена величиной 400-450⁰С (сплав ВТ-14).

Разработка расчетной (компьютерной) тепловой модели ВЧИД базируется на физико-математической модели теплофизических процессов во ВЧИД, кратко описанных выше. Следует учесть, что данная модель не совершенна. Сложность разработки точной модели заключается в необходимости описать разнородные по своей природе процессы: плазменные, обусловленные ионизацией рабочего тела в самостоятельном индукционном разряде, тепловыделение при взаимодействии плазмы с элементами конструкции, собственно тепловые процессы с учетом разнородного характера используемых в конструкции ВЧИД материалов, радиационные и кондуктивные процессы в элементах конструкции. Следует учесть также, что полной модели физических процессов в индукционном газовом разряде, лежащем в основе функционирования ВЧИД, до сих пор не создано, что также обуславливает сложности теплофизических исследований ВЧИД. В основном, известные модели, например, «трансформаторная» рассматривают плазму как некоторую проводящую среду по отношению к индуктору в качестве вторичной обмотки трансформатора [56, 57]. Такие модели полезны при анализе свойств системы ввода ВЧ мощности в ВЧ разряд и потерь в электротехнических элементах системы [58, 59, 60]. Поэтому в диссертации используется модель локального баланса частиц и мощности, обеспечивающая сходимость интегрального баланса.

ВЧИД как объект исследования характерен тем, что в нем отсутствуют какие-либо нагреваемые элементы, к которым относится, например катод в ионных двигателях (ИД) с разрядом постоянного тока [61]. Единственным источником тепловой мощности является электромагнитное поле, инициирующее индукционный разряд. Электромагнитная энергия

поглощается плазмой и выносится ионами и электронами на стенки разрядной камеры, преобразуясь в тепло. Часть электромагнитной энергии поглощается конструктивными элементами двигателя и также выделяется в виде тепла.

Поскольку ВЧИД работает в вакууме, то отсутствует конвективный теплообмен и для описания теплового состояния двигателя достаточно учитывать только кондуктивный теплообмен, теплообмен излучением, при этом источником тепловыделения является газоразрядная плазма. Кондуктивный теплообмен как внутри элементов конструкции ВЧИД, так и между ними описывается законом Фурье. Лучистый теплообмен между поверхностями узлов конструкции ВЧИД, а также между наружными поверхностями узлов конструкции ВЧИД и окружающей средой описывается законом Стефана – Больцмана.

Рассмотренные теплофизические процессы в ГРК и ИОС позволяют сформулировать задачу по расчету температурных полей в двигателе типа ВЧИД. В тепловой модели представлены два источника тепла: возникающие в связи с ВЧ индуктивным нагревом элементов конструкции, и тепловые потоки из плазмы, выносимые заряженными частицами и собственным излучением плазмы. Схематично тепловые процессы в ВЧИД отражены на рисунке 1.13.

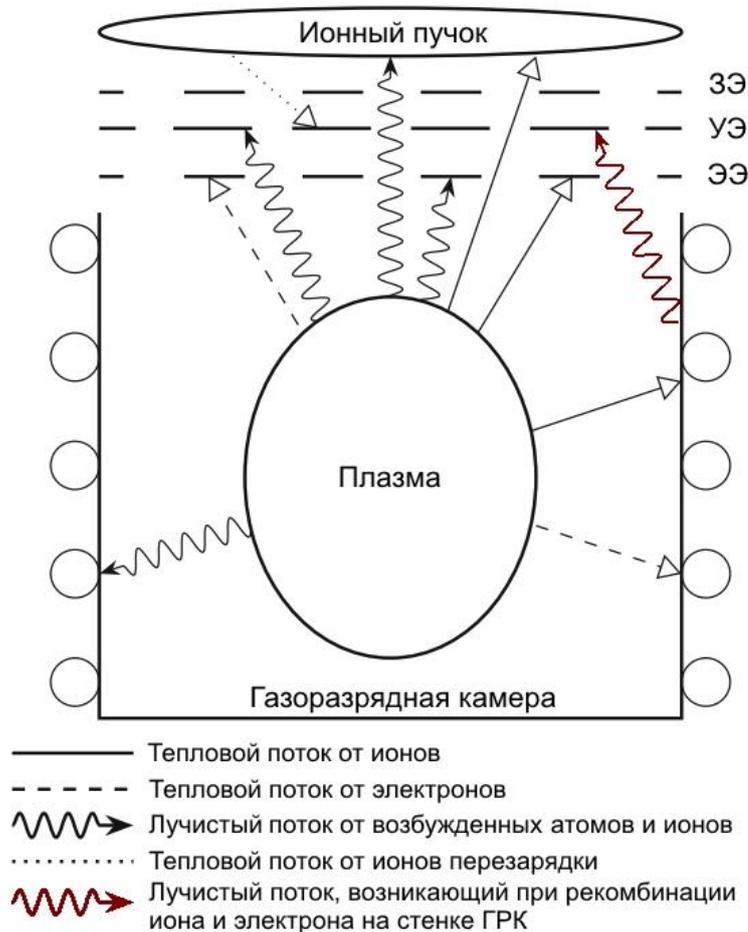


Рисунок 1.13 – Схема тепловых потоков в ВЧИД

Математическая модель распределения температуры в элементах конструкции ВЧИД описывается уравнением теплопроводности Фурье, которое в общем виде имеет форму:

$$\nabla(-\lambda\nabla T) = Q_i, \quad (1.22)$$

где Q_i – функция тепловых источников внутри системы;

λ - коэффициент теплопроводности;

∇ - дифференциальный оператор.

В качестве объемных источников тепла Q_i рассматривается тепловыделение, определяемое для ВЧИД наводящимися вихревыми токами.

Для выполнения уравнений теплового баланса, в модель включены компоненты лучистого теплообмена Q_{rad} между поверхностями элементов конструкции двигателя, а также излучением во вне, описываемые уравнением Стефана-Больцмана:

$$Q_{rad} = \varepsilon(G_{rad} + G_{pl} - \sigma T^4), \quad (1.23)$$

где ε - излучательная способность материала, которая принята равной поглощающей способности по всему спектру длин волн согласно допущению серого тела [24];

σ – постоянная Стефана - Больцмана.

Параметр G_{rad} определяет входящей тепловой поток взаимного лучистого теплообмена между узлами конструкции ВЧИД. Поступление радиационного потока от внешних источников отсутствует.

Параметр G_{pl} определяет поток мощности, поступающий из плазмы разряда.

Уравнения (1.26) и (1.27) полностью описывают математическую тепловую модель. При этом уравнение (1.27) представляет собой граничное условие по отношению к уравнению (1.26).

Математическая модель может быть упрощена. Особенностью конструкции ВЧИД является преимущественное использование тонкостенных элементов конструкции. Это облегчает моделирование. Основную проблему при учете кондуктивного теплообмена представляет необходимость учета контактных тепловых сопротивлений, особенно в соединениях элементов из разнородных материалов. Расчет этих величин необходимо решать для каждой рассматриваемой конструкции.

Внутренние тепловые источники в тонкостенных элементах могут быть заменены выпадающими извне как составная часть G_{pl} . Такое допущение оправдано еще и тем, что внутренние источники тепла распределены при индукционном нагреве в тонком, так называемом, скин-слое. Толщина скин-слоя определяется выражением

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}, \quad (1.24)$$

где ρ – удельное сопротивление материала;

f – частота переменного тока;

μ_m – относительная магнитная проницаемость.

Для меди при частоте 1 МГц толщина скин-слоя составляет 0,067 мм.

Для каждого выделенного элемента конструкции величина λ постоянна (принимается независимой от температуры). Поэтому для каждого элемента уравнение теплопроводности (1.26) упрощается до вида уравнения Лапласа:

$$\Delta T = 0 \quad (1.25)$$

Ввиду сложности конструкции ВЧИД расчетные модели должны разрабатываться с учетом использования известных программных комплексов, такие как COMSOL, AnSYS. Тепловые расчеты могут при этом проводиться по такой процедуре: сначала с помощью какого-либо программного пакета рассчитываются параметры плазмы разряда в ГРК, а затем – тепловые потоки из плазмы на поверхности, граничащие с разрядом. После этого уже решается задача теплопередачи в элементах конструкции на основе уравнения теплопроводности в форме уравнения Лапласа численным методом с помощью пакетов программ с учетом граничных условий I и II рода, которые определяют температуры окружающей среды, тепловые потоки на контактах между различными узлами конструкции, а также входные тепловые потоки модели, поступающими из плазмы разряда на элементы конструкции в соответствии с выражениями, аналогичными (1.18) – (1.21), либо (1.22) – (1.25). Индукционные вихревые тепловые потоки также включаются в граничные условия II рода.

Эффективность такого подхода показана в главах 2 и 3 диссертации.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ВЧИД

Сформулированную в Главе 1 задачу можно охарактеризовать как стационарную по расчету температуры элементов конструкции ВЧИД на установившемся режиме его работы. В дальнейшем исследовании возможно расширение возможностей расчетной модели для изучения переходных процессов, протекающих при включении и выключении двигателей.

Рассмотренные в Главе 1 теплофизические процессы при разработке численной модели для расчета температур в элементах конструкции ВЧИД необходимо детализировать.

В модели принято, что теплообмен между элементами конструкции ВЧИД осуществляется излучением, теплопроводным (кондуктивным) способом и через контактные сопротивления.

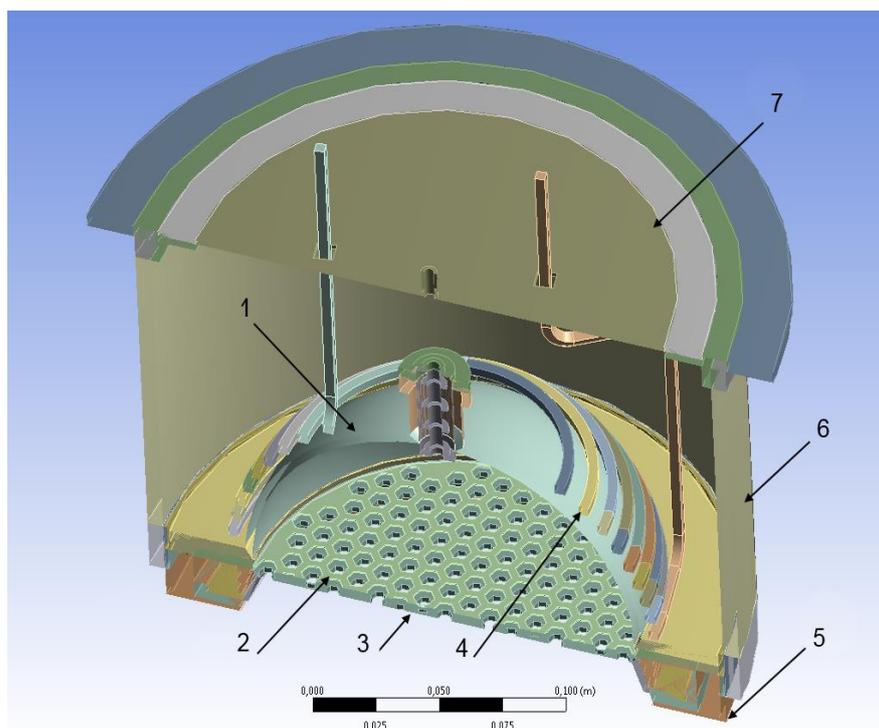
С помощью представляемой в данной главе расчетной модели были выполнены численные расчеты температур элементов конструкции для разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ двигателей ВЧИД-8 и ВЧИД-16, а также для перспективных двигателей повышенной мощности ВЧИД-45 и ВЧИД-49М. Расчеты температур в ВЧИД выполнены с использованием пакета прикладных программ ANSYS. В данном пакете реализован широко известный метод дискретных элементов (panel method), в котором объект исследования разбивается на большое число малых элементов, внутри которых численные значения теплофизических величин, а именно теплопроводность и степень черноты, считаются одинаковыми. Рассчитанные температуры элементов объекта получаются в результате решения системы балансовых уравнений теплообмена между элементами поверхности, с учетом входящих тепловых потоков, задаваемых в качестве граничных условий.

В данной главе приводится описание тепловой расчетной модели и результатов ее верификации с учетом принятых упрощений и допущений физической модели тепловых процессов, протекающих при работе высокочастотного иного двигателя, и описанных в главе 1.

Экспериментальные измерения температур в конструкциях ВЧИД были выполнены для лабораторных образцов двигателей ВЧИД-8 и ВЧИД-16. Результаты измерений изложены в главе 4.

2.1 Объект исследования

Объектом численного моделирования являются ВЧИД различных размерностей. Основные элементы конструкции ВЧИД, используемые в компьютерных расчетах, изображены на упрощенной модели объекта, приведенной на рисунке 2.1.



1 – ГРК, 2 – ЭЭ, 3 – УЭ, 4 – индуктор, 5 – силовое кольцо, 6 – кожух, 7 - крышка

Рисунок 2.1 – Конструкция ВЧИД-16

Наиболее нагруженными в тепловом отношении узлами ДБ ВЧИД являются:

- ГРК(1), изготовленная из диэлектрического материала, имеющей малый тангенс угла диэлектрических потерь. С внешней стороны ГРК находится индуктор (4), выполненный в виде медной трубчатой спирали с небольшим числом витков (4...6) и подключенный к ВЧ генератору (ВЧГ) (на схеме не показан);

- ИОС, состоящая из перфорированных отверстиями эмиссионного – ЭЭ (2) и ускоряющего – УЭ (3) электродов. Роль замедляющего электрода (ЗЭ), выполняет силовое кольцо (5).

В летных образцах ВЧИД, например RIT – 10 (Германия) [62], двигательный блок защищен от внешнего воздействия солнечной радиации и других возмущающих факторов. В конструкции, изображенной на рисунке 2.1. эту роль моделирует непрозрачный кожух (6) и крышка (7).

2.2 Сеточная модель ВЧИД

Для решения задачи был применен метод дискретных элементов (panelmethod), основное положение которого состоит в том, что объект исследования разбивается на большое число малых элементов, в которых все физические характеристики одинаковы, в данном случае это такие теплофизические характеристики, как температура, теплопроводность и степень черноты. Точность данного численного метода расчета температур в элементах конструкции ВЧИД определяется числом элементов разбиения N , что лимитируется мощностью применяемых вычислительных ресурсов. Сетка разбиения упрощенной конструкции ВЧИД - 16 изображена на схеме (рисунок 2.2). Число элементов сетки разбиения составляет около 120 000.

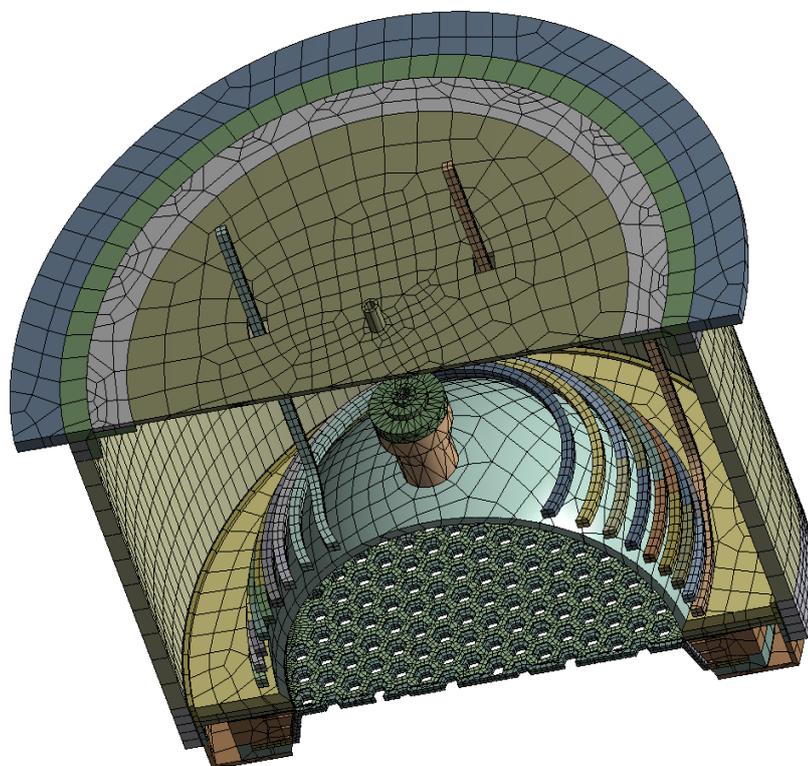


Рисунок 2.2 – Сетка разбиения конструкции ВЧИД-16 на элементы

Таким образом, объект задается в виде трехмерного массива координат r_i узлов сетки разбиения. В зависимости от его принадлежности тому или иному узлу конструкции ВЧИД каждому i -му элементу разбиения конструкции ВЧИД в начале счета присваиваются степень черноты ϵ_i и коэффициент теплопроводности λ_i .

2.3 Уравнения для численного расчета температур узлов ВЧИД

В области ожидаемых температур элементов конструкции ВЧИД на уровне до 400 °С (700 °К) важнейшую роль при переносе тепловой мощности играет лучистый теплообмен между элементами поверхности объектов. Поток лучистой энергии Q_i^{Rad} , выходящие с поверхности каждого i -го поверхностного элемента с температурой T_i , определяются следующей системой линейных алгебраических уравнений лучистого теплообмена [24]:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i^{Rad} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \cdot \sigma T_i^4, \quad (2.1)$$

где ε_j – степени черноты поверхностей элементов;

δ_{ij} – символ Кронеккера;

A_i – площади соответствующих элементов;

σ – постоянная Стефана – Больцмана;

F_{ij} – матрица коэффициентов взаимной облученности элементов, которая рассчитывается в начале счета один раз, т.к. в данной задаче геометрия ВЧИД не изменяется.

С помощью (2.2) рассчитывается матрица коэффициенты взаимной облученности F_{ij} , [24] (см. Рисунок 2.3):

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} d(A_j) d(A_i) \quad (2.2)$$

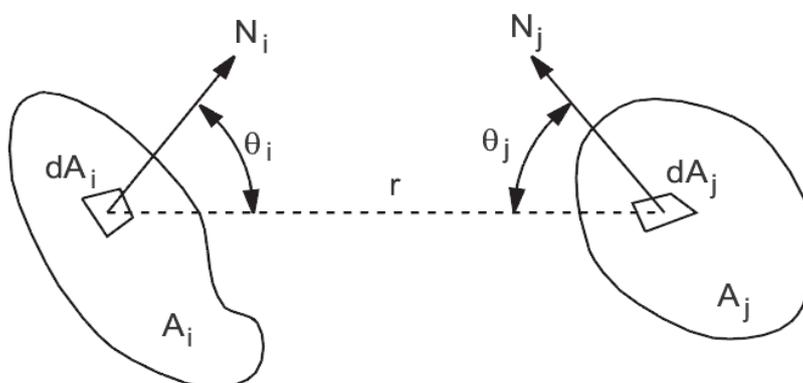


Рисунок 2.3 - К расчету коэффициентов взаимной облученности

Матрица F_{ij} , рассчитывается один раз, т.к. в данной задаче геометрия не изменяется.

В программе (2.1) решается совместно с уравнением теплового баланса, записанного также для каждого i -го элемента сетки разбиения с учетом лучистого и теплопроводного теплообмена между различными элементами сетки разбиения. Уравнение теплового баланса для каждого i -го элемента можно представить в следующем виде:

$$Q_i = \sum (Q_{ji}^{Rad} + Q_{ji}^{Cond}) + W_i^{plasma}, \quad (2.3)$$

где Q_i – поток тепловой мощности, выходящей из i -го элемента сетки разбиения;

Q_{ji}^{Rad} – лучистый поток тепла, поступающий на i -й элемент от элемента j , определяемый из потоков Q_i^{Rad} , вычисляемых в (2.1);

Q_{ji}^{Cond} – теплопроводный поток между граничащими друг с другом элементами i и j .

2.3.1 Теплопроводные потоки между элементами сетки разбиения ВЧИД

Теплопроводные потоки Q_{ji}^{Cond} между элементами i и j , принадлежащими одному и тому же узлу конструкции, определяются с помощью конечно-разностного выражения закона теплопроводности Фурье, где вместо градиента температуры используется разность температур соседних элементов, отнесенная к эффективному расстоянию между элементами.

$$Q_{ji}^{Cond} \approx -\bar{\lambda} \frac{\Delta T_{ji}}{\Delta x_{ji}} \quad (2.4)$$

В случае контактирующих элементов, принадлежащих различным узлам конструкции ВЧИД, тепловой поток в контакте между элементами определяется в программе способом, аналогичным (2.4), где в качестве $\bar{\lambda}$ используется эффективное значение коэффициента теплопроводности, определяемое из λ_i и λ_j контактирующих поверхностей [53]. Это процедура выполняется в программе автоматически в случае использования идеального термического контакта. В случае реального термического контакта тепловой поток Q_{ji}^{Cond} между элементами определяется с помощью контактного сопротивления R_c , т.е.:

$$Q_{ji}^{Cond} = K \cdot \Delta T_{ji}, \quad (2.5)$$

где

$$K = \frac{1}{R_c} \quad (2.6)$$

Численное значение контактного сопротивления R_c задается для каждой контактной пары в начале счета.

В предлагаемой расчетной модели не учитывается зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, так как считается, что в данном диапазоне температур его изменение невелико и не скажется существенно на результатах численного моделирования.

2.3.2 Тепловые потоки из плазмы разряда на поверхности ВЧИД

В (2.3) слагаемое W_i^{plasma} представляет собой совокупный поток тепловой мощности, падающий из плазмы на i -й элемент поверхности какого-либо узла конструкции и (или) идущий с поверхности индуктора в зависимости от расположения рассматриваемого i -го элемента. Т.е., если данный элемент принадлежит либо поверхности ГРК, либо ЭЭ, обращенной к плазме, либо внешней поверхности УЭ, подверженной воздействию ионов перезарядки, тогда на них падают тепловые потоки $W_{ГРК}$, $W_{ЭЭ}$ и W_{bi} соответственно. Таким образом, эти потоки учитываются только для элементов поверхности соответствующих узлов конструкции, получающих какую-либо часть исходной ВЧ мощности $W_{ВЧ}$ из плазмы разряда, либо от ионов перезарядки.

В случае, если рассматриваемый поверхностный i -й элемент находится «в поле зрения» индуктора, то следует в слагаемом W_i^{plasma} в правой части уравнения (2.3) также учитывать тепловой поток W_{ind} .

Для внутренних элементов конструкции, т.е. не выходящих на поверхность, либо для элементов, на которые не падают никакие указанные выше тепловые потоки, следует принять, что $W_i^{plasma} = 0$. Для таких элементов сетки разбиения ВЧИД, уравнение (2.3) вырождается в следующую форму:

$$Q_i = \sum (Q_{ji}^{Rad} + Q_{ji}^{Cond}) \quad (2.7)$$

2.3.3 Входные параметры численной модели, граничные и начальные условия

Внешними физическими параметрами расчетной модели являются:

- $W_{ГРК}$, $W_{ЭЭ}$ и W_{bi} – тепловые потоки на элементы поверхностей ГРК и ЭЭ, обращенных к плазме, а также на элементы внешней поверхности УЭ,

- W_{ind} - поток тепловой мощности, выделяемой на активном сопротивлении индуктора, определяемой вихревыми токами в индукторе.

Данные параметры представляют собой граничные условия II рода. Численные значения потоков задаются в начале каждого счета. При счете внутри программы определяется плотность соответствующего теплового потока, которая принимается одинаковой для конкретного узла конструкции. При необходимости можно ввести переменную плотность падающего теплового потока на поверхности какого-либо узла конструкции. В данной версии модели считается, что потоки равномерно распределены по соответствующим узлам конструкции ВЧИД.

На данном этапе исследования в модели не учитывается влияние теплового потока от Солнца с известной постоянной плотностью теплового потока $\sim 1700 \text{ Вт/м}^2$. Однако при необходимости данный поток может быть введен в расчет также в качестве дополнительного граничного условия II рода.

Граничным условием I рода является задаваемая также в начале счета температура окружающей среды T_{cp} . В случае, если ставится задача расчета температур и сравнение их с результатами наземного эксперимента, выбирается значение температуры стенок вакуумного стенда, т.е. комнатной температуры $T_{cp} = 300 \text{ }^\circ\text{К}$. Если же необходим расчет в условиях нахождения ВЧИД в космосе, выбирается значение температуры T_{cp} , по возможности наиболее близкое к температурам на соответствующих орбитах КА. При этом в расчете будет присутствовать дополнительный поток тепла с плотностью, как в случае с излучением от абсолютно черного тела, т.е.

$$w = \sigma T_{cp}^4 \quad (2.8)$$

В качестве начальных условий задаются начальные температуры всех элементов конструкции ВЧИД. В настоящее время всем элементам присваиваются комнатные температуры, поскольку расчеты проводятся для моделирования тепловых процессов, протекающих в двигателях при натурных испытаниях. Следует отметить, что выбор начальных значений температур может повлиять на скорость сходимости итерационного процесса в счете. Поэтому в случае, если проводится серия последовательных расчетов с не слишком значительным изменением внешних параметров, таких как мощность или ионный ток, выходящий из двигателя, то температурные распределения, полученные для какого-то варианта счета, могут быть использованы в качестве начальных данных для последующего расчета, что приводит к заметному сокращению времени расчета.

Численное решение системы (2.1), (2.3), либо (2.1), (2.4) с соответствующими граничными и начальными условиями производится в программе ANSYS методом

последовательных приближений [63]. Итерации производятся до тех пор, пока не будет достигнуто выполнение системы уравнений для всех i -х элементов сетки разбиения ВЧИД с заранее заданной погрешностью в $0,1 \text{ Вт/м}^2$ для плотностей потоков тепловой мощности, которые определяются из тепловых потоков Q_i в (2.3).

Погрешность численного расчета задается в диалоговом режиме перед началом каждого счета. Были проведены контрольные расчеты с повышенной точностью, а именно для погрешности в $0,05 \text{ Вт/м}^2$. Расхождение температур в контрольных расчетах с погрешностями в $0,05 \text{ Вт/м}^2$ и $0,1 \text{ Вт/м}^2$ составили не более $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому все последующие расчеты выполняются с погрешностью для потоков, принятой равной $0,1 \text{ Вт/м}^2$, поскольку требуют меньшего времени счета.

Ниже определены внешние тепловые потоки $W_{ГРК}$, $W_{ЭЭ}$, W_{bi} и W_{ind} .

2.4 Потоки тепловой мощности на поверхности ВЧИД

При работе ВЧИД из плазмы разряда выпадают ионы, электроны и фотоны на поверхности, граничащие с плазмой, а именно на внутренние поверхности ГРК и ЭЭ, обращенные к плазме. На поверхность УЭ выпадают ионы перезарядки и попадает часть излучения от возбужденных атомов рабочего тела. Все эти процессы можно рассматривать, как тепловые потоки на соответствующие поверхности [64]. Величина этих потоков определяется бомовским током j_B . Бомовский ток выпадает на стенки ГРК, а также является основой для формирования ионного тока из двигателя I_0 , извлекаемого из двигателя через отверстия в электродах ионно-оптической системы при правильном выборе параметров ИОС. Полный ионный ток из двигателя определяется плотностью ионного тока Бома следующим образом:

$$I_0 = \gamma \sigma_{ЭЭ} S_{\Pi} j_B, \quad (2.9)$$

где S_{Π} – площадь перфорированной части сечения источника, из которой выходит ионный поток;

$\sigma_{ЭЭ}$ – прозрачность перфорированной части ЭЭ;

$\gamma \approx 1.1$ – характеристика кривизны собирающей поверхности плазменного мениска.

Ток I_0 несложно измерить с помощью обычного амперметра. Кроме того, при создании нового двигателя, как правило, заранее задается тяга, выбирается рабочий газ, которые определяют требуемые значения тока I_0 . Таким образом, его величина всегда известна при создании нового двигателя. Именно поэтому в предлагаемой ниже расчетной модели ток I_0 был

выбран в качестве основного параметра расчетной модели. Все потоки мощности, идущие из плазмы разряда, от перезарядных ионов на УЭ, а также вихревые потери мощности в металлических элементах конструкции ВЧИД пропорциональны I_0 .

Предлагаемая модель расчета строилась на основе, упомянутой в гл. 1 тепловой модели Ван Ноорда [51] за исключением особенностей, которые будут отмечены подробнее. Ниже приводятся выражения для компонент потоков тепловой мощности этих потоков.

2.4.1 Поток тепловой мощности на поверхности газоразрядной камеры

Экспериментальные измерения температур проводились на лабораторных моделях ВЧИД, в которых рабочим телом являлся ксенон, $M_{Xe} = 131$ ат. ед.. Поэтому в предлагаемой работе все уравнения были также записаны для ксенона. Здесь и далее температура электронов T_e измеряется в вольтах.

2.4.1.1 Пристеночное падение потенциала вблизи поверхности газоразрядной камеры

Как было указано в главе 1, вблизи поверхности ГРК устанавливается падение потенциала $\Delta U_{ГРК}$, которое в случае ксенона в соответствии с (1.11) определяется следующим образом:

$$\Delta U_{ГРК} \approx 5.8T_e \quad (2.10)$$

При характерных для плазмы разряда в ВЧИД значениях $T_e=5$ эВ получается, что пристеночное падение потенциала для ксенона оказывается около 29 В.

2.4.1.2 Поток мощности от ионов и электронов плазмы

Поток тепловой мощности от ионной и электронной компонент плазмы на поверхность ГРК определяется следующим образом:

$$W_{ГРК} = I_{ГРК} \left(\Delta U_{ГРК} + V_i + \frac{5}{2} T_e \right), \quad (2.11)$$

где

$$I_{ГРК} = j_B S_{ГРК}, \quad (2.12)$$

где $S_{ГРК}$ – площадь поверхности ГРК.

2.4.2 Поток тепловой мощности на поверхность эмиссионного электрода ионно-оптической системы

Так же, как и в случае с ГРК, поток тепловой мощности, приносимый ионами и электронами на поверхность ЭЭ, разделим на составляющие, т.е.:

$$W_{ЭЭ} = W_{iЭЭ} + W_{eЭЭ} \quad (2.13)$$

Ниже определим составляющие теплового потока. Большой по величине поток тепловой мощности переносится ионами из плазмы при их выпадении на поверхность ЭЭ. Величина данного потока так же, как и в случае ГРК определяется численным значением пристеночного падения потенциала $\Delta U_{ЭЭ}$ и численным значением плотности падающего на ЭЭ ионного тока.

2.4.2.1 Пристеночное падение потенциала вблизи поверхности эмиссионного электрода

Падение потенциала у поверхности эмиссионного электрода $\Delta U_{ЭЭ}$ оказывается немного меньше, чем у поверхности ГРК из-за частичного ухода ионного потока из плазмы в отверстия электрода, а именно:

$$\Delta U_{ЭЭ} \approx 5.1 T_e \quad (2.14)$$

2.4.2.2 Плотности ионного тока на поверхности эмиссионного электрода

В разрабатываемых моделях ВЧИД зачастую используется конструкции ЭЭ, в которых перфорация занимает не всю поверхность электрода. Зачастую на периферии ЭЭ присутствует кольцевая область без отверстий. Это делается, в том числе, из тех соображений, что на периферии эмиссионного электрода ионизация газа относительно небольшая, и таким образом, уменьшаются потери не ионизовавшейся части рабочего газа, постоянно вытекающего из отверстий в ИОС со звуковой (тепловой) скоростью.

В данном разделе приводится выражение для плотности тепловых потоков, выпадающих на поверхность ЭЭ в общем случае конструкции ЭЭ, т.е. при наличии как перфорированной, так и кольцевой области. Переход к случаю полностью перфорированного ЭЭ производится простым обнулением площади поверхности кольцевой области.

Представим поверхность ЭЭ состоящей из двух областей: перфорированной части и кольца, в котором отсутствуют отверстия, см. рисунок 2.3.

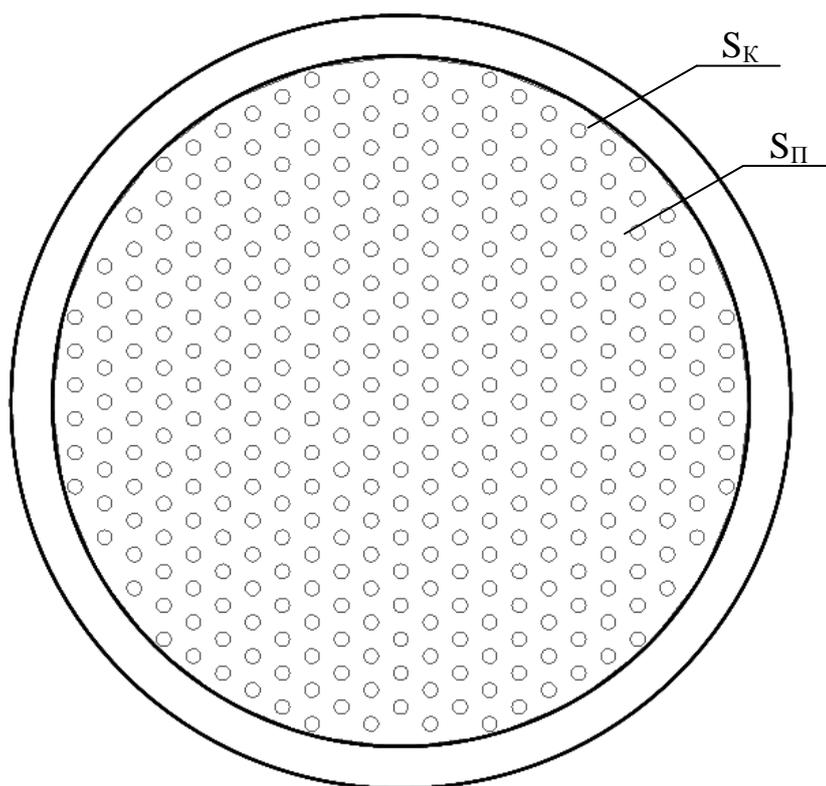


Рисунок 2.4 – Эмиссионный электрод

Площади этих областей обозначим как $S_П$ и S_K соответственно. Очевидно, что

$$S_0 = S_П + S_K \quad (2.15)$$

Отличие плотностей ионного тока в кольцевой и перфорированной областях ЭЭ может быть проиллюстрировано на рисунке 2.4, на котором схематично изображены траектории ионов вблизи ЭЭ и схемы токов.

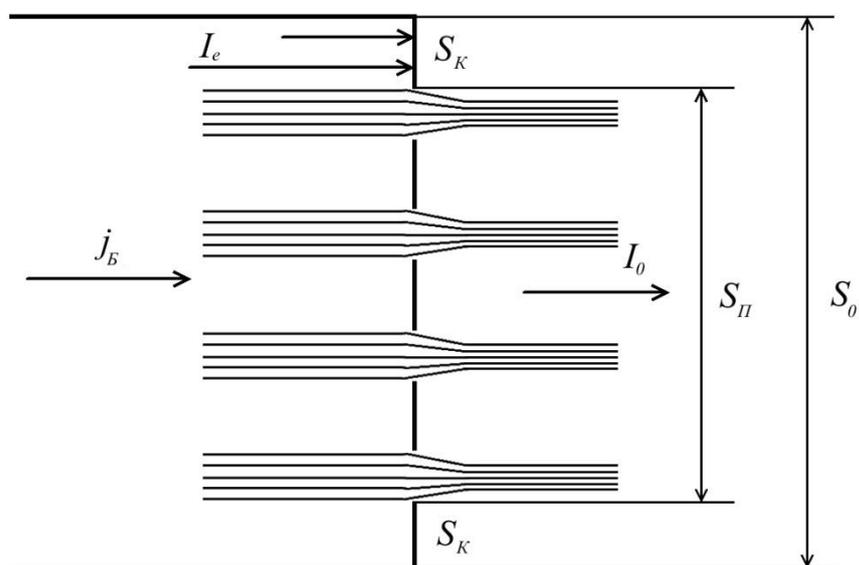


Рисунок 2.5 – Траектории ионов вблизи ЭЭ

В области перфорации ЭЭ из-за наличия плазменного мениска плотности ионного потока на поверхностях ЭЭ отличаются от бомовской плотности. Это происходит из-за стягивания ионного потока в отверстия в ЭЭ, что наглядно видно на схеме ионного потока вблизи отверстий ЭЭ, изображенной на Рисунке 2.6.

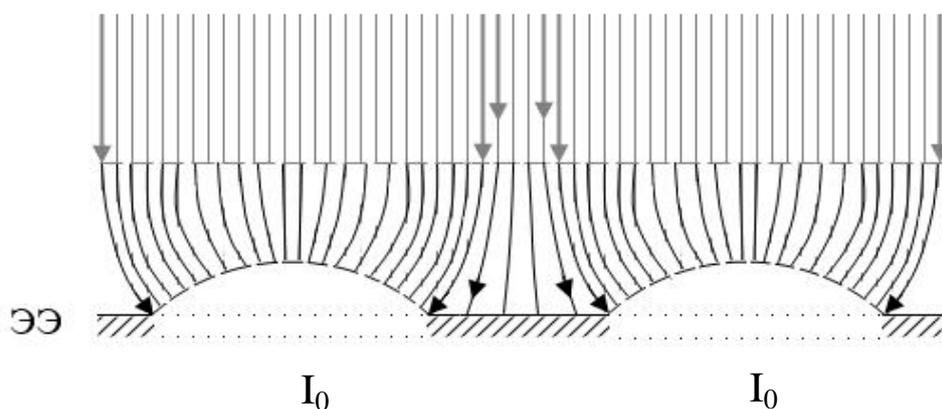


Рисунок 2.6 – Схема линий ионного потока близ поверхности ЭЭ.

В кольцевой части ЭЭ никаких искажений траектории ионного потока не происходит и плотность тока считается равной бомовской.

Определим значения плотности ионного тока в перфорированной и кольцевой областях ЭЭ.

2.4.2.2.1 Плотность ионного тока в кольцевой области эмиссионного электрода

В кольцевой области ЭЭ, где картина электрического поля не искажена из-за наличия отверстий в ЭЭ, можно считать, что плотность ионного тока j_{iK} равна боровской (2.5), также как и в случае с ГРК, т.е.:

$$j_{iK} = j_B \quad (2.16)$$

Плотность боровского тока определяется из (2.9) из основного параметра численной модели I_0 :

$$j_B = \frac{I_0}{\gamma \sigma_{ЭЭ} S_{II}} \quad (2.17)$$

Соответственно, ток на кольцевую часть ЭЭ будет равен:

$$I_K = j_B S_K \quad (2.18)$$

2.4.2.2.2 Плотность ионного тока в перфорированной области эмиссионного электрода

В перфорированной части поверхности ЭЭ, см. на Рисунок 2.6, густота линий ионного потока уменьшается, что эквивалентно уменьшению плотности ионного тока. Средняя плотность ионного тока j_{iII} на поверхности ЭЭ, между отверстиями, определяется, используя уравнение неразрывности части ионного потока, проходящего через сечение S_{II} . Очевидно, что:

$$j_B S_{II} = I_0 + I_{iII} \quad (2.19)$$

Из уравнений (2.19) и (2.17) получаем, что:

$$I_{iII} = I_0 \left(\frac{1}{\gamma \sigma_{ЭЭ}} - 1 \right) \quad (2.20)$$

Тогда средняя плотность ионного тока на ЭЭ в область перфорированной его части равна:

$$j_{iII} = \frac{I_0}{(1 - \sigma_{ЭЭ}) S_{II}} \left(\frac{1}{\gamma \sigma_{ЭЭ}} - 1 \right) \approx 0,92 j_B \quad (2.21)$$

т.е. плотность тока j_{III} оказывается меньше боровской j_B примерно на 8%.

2.4.2.3 Тепловые потоки на эмиссионный электрод от ионов из плазмы разряда

Тепловую мощность, приносимую ионами из плазмы разряда на поверхность ЭЭ, можно разложить на две составляющие, а именно

$$W_{iЭЭ} = W_{iК} + W_{iIII}, \quad (2.22)$$

где $W_{iК}$ – тепловая мощность, приносимая ионами на кольцевую неперфорированную часть ЭЭ;

W_{iIII} – тепловая мощность, приносимая ионами на перфорированную область ЭЭ.

2.4.2.3.1 Тепловой поток на кольцевую часть эмиссионного электрода

Тепловая мощность, передаваемая ионами, падающими на кольцевую часть ЭЭ, определяется следующим:

$$W_{iК} = I_{iК} (\Delta U_{ЭЭ} + V_i - \varphi_e), \quad (2.23)$$

где φ_e - работа выхода электрона из проводящего материала ЭЭ, выраженная в вольтах.

Значения φ_e для использованных в исследованных в работе лабораторных моделях ВЧИД молибдена и титана приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения энергии выхода для различных материалов

Материал	φ_e , В
Ti	3,95
Mo	4,37

2.4.2.3.2 Тепловой поток от ионов на перфорированную часть эмиссионного электрода

Тепловая мощность, приносимая ионным потоком на перфорированную область ЭЭ определяется следующим образом:

$$W_{iII} = I_{iII} (\Delta U_{ЭЭ} + V_i - \varphi_e) \quad (2.24)$$

Окончательно, потоки мощности, приносимые ионами плазмы разряда на поверхность ЭЭ, определяются из (2.22), где слагаемые в правой части определяются из (2.23) и (2.24).

Плотности потоков тепловой мощности на кольцевую и перфорированную часть ЭЭ определяются из (2.23) и (2.24) делением обеих частей равенств на соответствующие площади поверхности S_K и S_{II} .

2.4.3 Электронный ток и тепловой поток мощности на эмиссионный электрод от электронов из плазмы разряда

Значение электронного тока $I_{eЭЭ}$ получается из необходимости сохранения зарядового баланса в ГРК. Необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение между ионным и электронным токами:

$$|I_{eЭЭ}| = I_0 + I_{iII} + I_{iK} \quad (2.25)$$

Из (2.25) с учетом выражений (2.18) и (2.22) получаем, что:

$$|I_{eЭЭ}| = \frac{I_0}{\gamma\sigma_{ЭЭ}} \frac{S_0}{S_{II}} \quad (2.26)$$

Тогда мощность теплового потока, передаваемая электронами поверхности ЭЭ равна

$$W_{eЭЭ} = I_{eЭЭ} \left(\frac{5}{2} T_e + \varphi_e \right) \quad (2.27)$$

Считая, что данная мощность равномерно распределяется по поверхности ЭЭ, плотность потока тепловой мощности, приносимая ионами и электронами плазмы разряда на поверхность ЭЭ, определяется следующим образом:

$$w_{eЭЭ} = \frac{W_{eЭЭ}}{S_K + (1 - \sigma_{ЭЭ}) \cdot S_{II}} \quad (2.28)$$

2.4.4 Поток тепловой мощности на ускоряющем электроде ионно-оптической системы

При попадании на УЭ ионы перезарядки передают свою энергию по механизмам, аналогичным механизмам, протекающим при выпадении ионов из плазмы разряда на ЭЭ, с некоторыми отличиями.

2.4.4.1 Мощность, падающая на ускоряющий электрод от вторичных ионов перезарядки

Выражение для передаваемой ионами перезарядки тепловой мощности следующее:

$$W_{iVЭ} = I_{iVЭ} \left(\alpha E_{cp} - \varphi_{eV} + \frac{V_i}{2} \right), \quad (2.29)$$

где $I_{iVЭ}$ – ток ионов перезарядки, принятый в работе равным $0.01 I_0$;

E_{cp} – средняя энергия падающих ионов перезарядки;

α – коэффициент аккомодации энергии ионов.

φ_{eV} - работа выхода электрона из материала УЭ, также выраженная в вольтах.

Хорошей, и поэтому достаточно распространенной оценкой тепловой аккомодации энергии перезарядных ионов Xe^+ при их ионной бомбардировке поверхностей, состоящих из атомов с заметно меньшей атомной массой, в данном энергетическом диапазоне является значение $\alpha = 0.9$. Эта оценка может быть продемонстрирована следующими соображениями.

Для титана энергия связи поверхностных атомов $E_{cb} = 3.3$ эВ [65]. Как было указано выше, средняя энергия распыленных атомов примерно равна $\frac{1}{2} E_{cb} = 1,65$ эВ. При энергии перезарядных ионов ксенона в 200 эВ (максимальное значение, соответствующее потенциалу УЭ, равному -200 В), коэффициент распыления титана можно оценить на уровне $S(E_0=200 \text{ эВ}) \approx 0,3$ ат/ион. Таким образом, на один падающий ион перезарядки приходится примерно 0,5 эВ энергии, уносимой распыленными атомами материала УЭ. Кроме того, необходимо потратить

энергию связи для отрыва атома от поверхности. Т.е. средние потери энергии при распылении одного атома составляют около 4 эВ.

При невысоких углах падения ионов ксенона на поверхность УЭ при данных энергиях ионов практически не происходит отражения падающих ионов с уносом заметной части энергии падающего иона. Это имеет место в соответствии с теорией парных столкновений в случаях, когда масса налетающего иона заметно превышает массу атомов бомбардируемой поверхности. Атомная масса ксенона почти в 2,8 раза превышает массу атома Ti. В случае использования углерода в качестве материала УЭ, данное отношение равно 10,9. В этих случаях ионы Xe^+ практически полностью передают свою энергию атомам поверхностных слоев в нескольких столкновениях. Отражение возможно при скользящих углах падения ионов Xe^+ на УЭ. Однако влияние этого процесса мало, учитывая то обстоятельство, что ионы двигаются по электростатическому полю, которое перпендикулярно поверхности УЭ в соответствии с законами электростатики. Тем не менее, совсем исключить отражение не следует, хотя его вклад в уход падающей мощности из УЭ так же, как и распыление мал.

Средняя энергия падающих ионов перезарядки соответствует половине потенциала УЭ, т.е. при данной оценке приблизительно равна 100 эВ. Таким образом, принятая в работе значение $\alpha = 0.9$ можно уверенно считать нижней оценкой коэффициента аккомодации энергии ионов перезарядки атомами материала УЭ.

В (2.29), в отличие от других моделей, описание которых приведено в главе 1, в представляемой работе принято, что только половина энергии соответствующей потенциалу ионизации V_i будет поглощена материалом УЭ. Это происходит оттого, что при нейтрализации ионов на поверхности УЭ только примерно половина образующегося излучения попадает на УЭ, в отличие нейтрализации ионов в случае ГРК и ЭЭ. Другая половина уходит в пространство вне двигателя, если вполне обосновано считать, что образующееся при нейтрализации ионов излучение распределено изотропно по пространству.

Численные значения плотностей тепловых потоков на УЭ от ионов перезарядки более, чем в 20 раз меньше, чем тепловые потоки, выносимые ионами и электронами из плазмы на поверхности ГРК и ЭЭ и составили менее 200 Вт/м^2 в температурных расчетах для модельной конструкции ВЧИД – 16.

2.4.4.2 *Дополнительный лучистый поток тепла, падающий на ускоряющий электрод с поверхности газоразрядной камеры*

Еще одно отличие предлагаемой расчетной модели от приведенных в главе 1 состоит во введении дополнительного потока тепла, поступающего на поверхность УЭ с поверхности ГРК. Данный поток образуется при рекомбинации ионов плазмы при их падении на поверхность ГРК. Поскольку данное излучение считается изотропно распределенным по пространству, фотоны попадают на поверхность УЭ, с учетом затенения части поверхности УЭ эмиссионным электродом.

Оценка плотности данного лучистого потока составляет приблизительно

$$w_{\text{ГРК} \rightarrow \text{УЭ}}^* \approx 200 \text{ Вт/м}^2 \quad (2.30)$$

Данное значение сравнимо с плотностью теплового потока на УЭ, приносимого ионами перезарядки и потоком лучистой энергии от возбужденных атомов плазмы разряда, который рассмотрен в следующем разделе. Поэтому данный поток в предлагаемой расчетной модели учитывается.

2.4.5 *Лучистые тепловые потоки на поверхности газоразрядной камеры и электродов ионно-оптической системы от возбужденных атомов рабочего газа*

Как будет показано ниже, характерные электронные температуры в лабораторных моделях ВЧИД – 8, 16 и разрабатываемом двигателе ВЧИД – 49 М находятся на уровне 5 – 7 эВ. При таких значениях T_e хорошей оценкой потери вводимой в разряд мощности $W_{\text{вч}}$, теряемой на не приводящее к ионизации возбуждение атомов и ионов рабочего газа, является уровень 15%. Такой уровень потерь ВЧ мощности на возбуждение атомов и ионов принят при данном моделировании. Соответственно, точно такой же поток лучистой мощности выпадает на поверхности, граничащие с разрядом, или выходят через отверстия ИОС в окружающее пространство. Этот дополнительный тепловой поток вводится в счет в качестве составляющей входного потока тепловой мощности, падающей на стенки ГРК и электродов ИОС. Для поверхностей ГРК и ЭЭ плотность данного потока равномерно распределяется по их поверхностям и определяется следующим образом:

$$w^* = 0,15 \cdot \frac{W_{BЧ}}{S_{ГРК} + S_0} \quad (2.31)$$

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

$$w_{УЭ}^* = w^* \frac{\sigma_{ЭЭ} - \sigma_{УЭ}}{1 - \sigma_{УЭ}} \quad (2.32)$$

Для модельной конструкции ВЧИД – 16 в температурных расчетах плотность данного теплового потока на УЭ составила около 600 Вт/м².

Лучистые потоки тепла, приносимые на поверхность УЭ фотонами, образующимися при снятии возбуждения атомов в разряде и при рекомбинации ионов и электронов на стенке ГРК в сумме превосходят тепловой поток от перезарядных ионов примерно в 3 - 4 раза.

2.4.6 Индукционные потери мощности на образование вихревых токов

2.4.6.1 Вихревые токи в индукторе

При работе двигателя на активном сопротивлении R индуктора выделяется тепло в приповерхностном скин-слое, толщина δ которого для меди при частоте внешнего электромагнитного поля $\omega_0=2$ МГц, составляет $\delta \sim 0.1$ мм. Тепло излучается с внешней поверхности S индуктора. С помощью закона Джоуля-Ленца плотность теплового потока q с поверхности индуктора определяется следующим образом:

$$q = \frac{I^2 \cdot R}{S} = \frac{I^2 \rho}{4\pi^2 r_{инд}^2 \delta}, \quad (2.33)$$

где I - численное значение амплитуды высокочастотного тока в индукторе;

R – сопротивление скин-слоя индуктора;

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

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

ρ - удельное сопротивление меди.

В исследовании использовались индукторы, изготовленные из меди. В этом случае (2.33) можно привести к следующему виду:

$$q \approx 13.5 \times I^2 \text{ Вт/м}^2 \quad (2.34)$$

Мощность в индукторе выделяется в тонком поверхностном слое. Однако из-за соображений удобства применения использованной в работе программы ANSYS данная мощность вводится в индуктор путем задания падающего потока тепла равномерно распределенного по длине на внешнюю поверхность трубки индуктора с плотностью потока, определяемой в (2.34). Именно эта мощность по закону сохранения энергии излучается с поверхности индуктора в окружающее пространство, в том числе на элементы конструкции ВЧИД.

Теплопроводный поток, идущий от индуктора, через места его крепления на сопряженные элементы учитывается в программе автоматически при задании параметров термического контакта.

2.4.6.2 Потери ВЧ-мощности на вихревые токи в электродах ионно-оптической системы

Величина потерь ВЧ мощности на образование вихревых токов в электродах ИОС, преимущественно в эмиссионном, в значительной степени определяется конструкцией ионно-оптической системы, а именно взаимным расположением самого нижнего витка индуктора относительно электродов. Очевидные рекомендации по уменьшению вихревых потерь в электродах является возможно более далекое расположение витка индуктора от электродов. Но это эта рекомендация вступает в противоречие с необходимостью обеспечения более равномерной картины магнитного поля в камере, с тем, что бы максимально использовать объем ГРК для образования плазмы. Это касается, в первую очередь, краевой области ГРК в районе периферии ЭЭ. В данном исследовании отдельной составляющей теплового потока от вихревых токов не вводится. Предполагается, что при конструировании двигателя будут выполнены необходимые мероприятия по уменьшению потерь входной ВЧ мощности на вихревые токи в электродах ИОС.

В следующем разделе из уравнения баланса входной ВЧ мощности определяется численное значение электронной температуры, определяющее величины почти всех внешних тепловых потоков. Отсутствие данной составляющей потери ВЧ мощности подразумевает немного увеличенное рассчитываемое значение T_e по сравнению с реальным значением. Соответственно и величины всех внешних потоков, зависящие от T_e , будут незначительно

завышены, в том числе и внешний тепловой поток, падающий на ЭЭ. Таким косвенным образом, данный тепловой поток учитывается при расчете.

2.4.7 Баланс ВЧ-мощности. Полезная часть ВЧ-мощности.

В приведенных выше выражениях для тепловых потоков, падающих на различные узлы конструкции ВЧИД, кроме задаваемых заранее ионного тока из двигателя I_0 и вводимой ВЧ мощности $W_{ВЧ}$ определяющим параметром является электронная температура T_e . В расчетной модели она определяется из уравнения баланса вводимой ВЧ мощности путем подсчета всех составляющих потерь входной мощности, теряемой при выпадении компонент плазмы на узлы конструкции, с учетом мощности, уносимой произведенным ионным потоком. Используя закон сохранения энергии (мощности), вносимой в разряд, уравнение баланса мощностей можно представить в следующем виде:

$$W_{ВЧ} = W_+ + W_{ГРК} + W_{ЭЭ} + W^* + W_R, \quad (2.35)$$

где W_+ – единственное слагаемое, характеризующее “полезную” часть вводимой ВЧ мощности, затрачиваемую на образование ионов основного потока и их предварительное ускорение до уровня энергии, соответствующей пристеночному падению потенциала $\Delta U_{ЭЭ}$ (2.9). Очевидно, что

$$W_+ = I_0(\Delta U_{ЭЭ} + V_i) \quad (2.36)$$

Остальные слагаемые в правой части (2.35) 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;

W^* – потоки радиационной мощности, равные потерям ВЧ мощности на возбуждение атомов и ионов в плазме;

W_R – совокупные индукционные потери на вихревые токи в индукторе в электродах ИОС и других проводящих элементах конструкции источника.

Слагаемыми, представленными в правой части (2.35), ограничивается круг потерь исходной ВЧ мощности, рассматриваемых в предлагаемой расчетной модели.

Подставляя в (2.35) выражения для слагаемых потерь ВЧ мощности из (2.11), (2.13), (2.31), (2.32), (2.36) с учетом выражений для входящих в них параметров, определенных в

(2.10), (2.12), (2.14), (2.17-2.18), (2.20), (2.26), а также потерь на возбуждение атомов и вихревые токи, можно получить уравнение баланса ВЧ мощности в следующем виде:

$$W_{BЧ} = I_0(\Delta U_{ЭЭ} + V_i) + \frac{I_0}{\gamma\sigma} \frac{S_{ГРК}}{S_0} \left(\Delta U_{ГРК} + V_i + \frac{5}{2} T_e \right) + I_0 \frac{1-\gamma\sigma}{\gamma\sigma} (\Delta U_{ЭЭ} + V_i) + \frac{I_0}{\gamma\sigma} \frac{5}{2} T_e + 0,2W_{BЧ} \quad (2.37)$$

В последнем слагаемом (2.37) объединены потери ВЧ мощности на вихревые токи в индукторе и на возбуждение атомов и ионов. Выражение (2.37) является уравнением относительно T_e . Для модельной конструкции ВЧИД – 16, изображенной на Рисунке 2.1, при проведении оценочных расчетов принималось, что $W_{BЧ} = 300$ Вт и $I_0 = 1$ А. При численных значениях параметра $\gamma \approx 1,1$ и прозрачности эмиссионного электрода $\sigma_{ЭЭ} = 0,5$ (оптимальной и поэтому часто встречающейся в различных конструкциях ВЧИД) баланс правой и левой части выражения (2.37) достигается при следующем значении T_e :

$$T_e = 3,96 \text{ В} \quad (2.38)$$

Используя рассчитанные значения T_e , определяются все входящие тепловые потоки, падающие на элементы конструкции и задаваемые в начале каждого счета.

2.5 Упрощения и допущения в расчетной модели, принятые для сокращения объема вычислений

2.5.1 Упрощенная сетка разбиения ВЧ индуктора

Как было указано в главе 1, индуктор представляет собой, как правило, полую медную трубку с внутренним и внешним диаметрами порядка 3 и 4 мм соответственно. В предлагаемой модели индуктор представлен в упрощенном виде, а именно сплошным с квадратным поперечным сечением, смотри Рисунок 2.7. Сторона квадрата выбиралась таким образом, что бы внешняя поверхность исходного трубчатого и модельного сплошного и квадратного были одинаковы. Таким образом, сохранялась величина тепловых потоков, исходящих с поверхности индуктора, нагреваемого проходящим по нему высокочастотным током, на окружающие элементы конструкции ВЧИД.

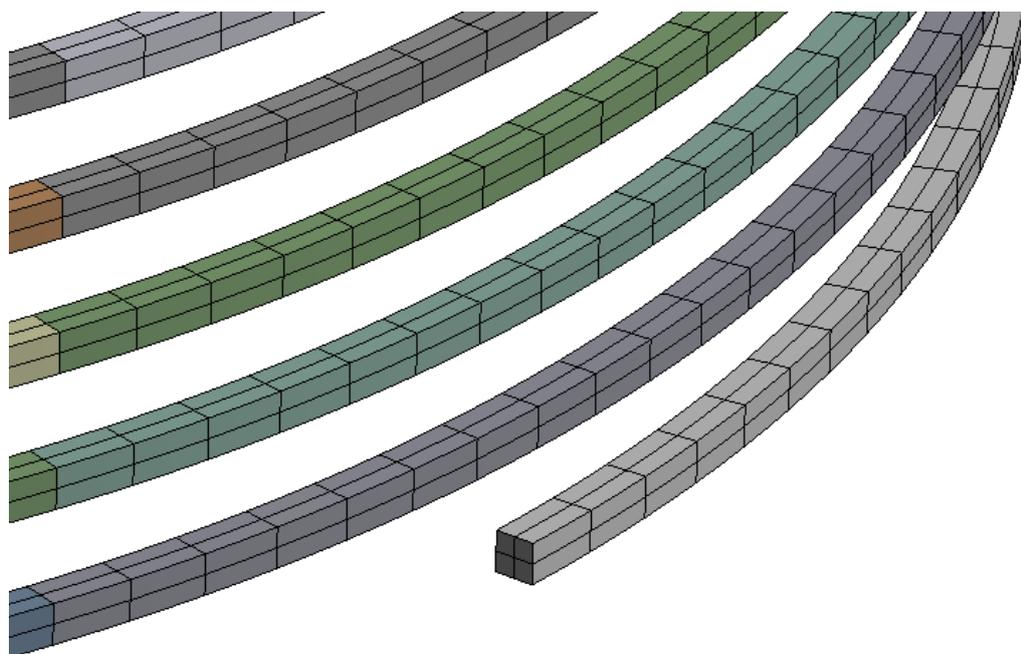


Рисунок 2.7 – Модель индуктора квадратного сечения

Как видно из рисунка 2.7, сетка существенно упрощается, что позволяет использовать увеличенные геометрические размеры отдельных элементов сетки разбиения. Эта процедура позволила более, чем в два раза сократить количество элементов сетки, на которые разбивается индуктор.

2.5.2 Упрощенная сетка разбиения эмиссионного электрода и ускоряющего электрода

Число отверстий в электродах ИОС в конструкции ВЧИД-16, изображенной на Рисунке 2.1, превышает 2000. Для такого количества отверстий число элементов разбиения объекта столь велико, что при существующих компьютерных мощностях счет занимает несколько суток. Для уменьшения продолжительности счета были выполнены следующие мероприятия:

- уменьшено количество отверстий приблизительно в 10 раз с сохранением прозрачности электродов в реальной конструкции ВЧИД – 16, т.е. в расчетах использовались отверстия большего диаметра;

- отверстия в ЭЭ и УЭ ИОС были выбраны гексагональными, вместо круглых. Изменение формы отверстий позволило уменьшить количество элементов разбиения,

приходящихся на одно отверстие за счет увеличения их геометрических размеров (см. Рисунок 2.8).

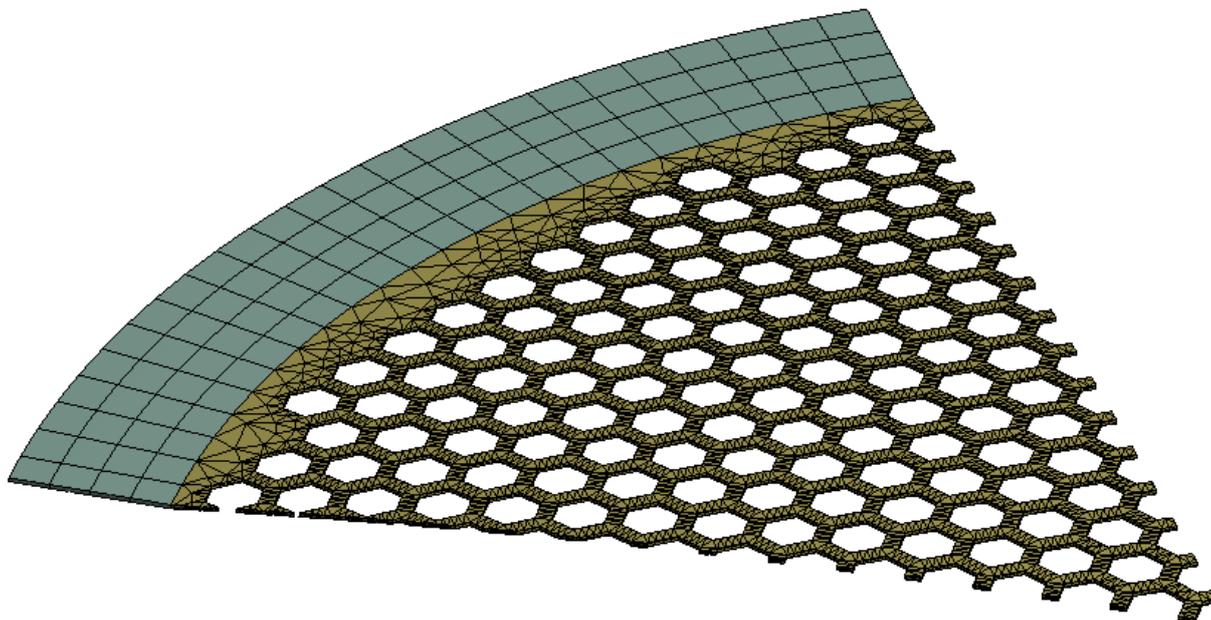


Рисунок 2.8 – Сектор упрощенной конструкции эмиссионного электрода ИОС

Были проведены сравнительные расчеты с числом отверстий $N_{\text{отв}} = 283$ и $N_{\text{отв}} = 187$ вместо $N_{\text{отв}} = 2515$. Максимальные различия температур на поверхностях узлов конструкции ВЧИД-16 в обоих вариантах расчетов составили менее $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с полномасштабным счетом для исходного количества отверстий $N_{\text{holes}} = 2000$. Ввиду малости указанного отличия принято решение о проведении дальнейших расчетов с меньшим числом отверстий $N_{\text{holes}} = 187$ в целях сокращения времени счета. Число элементов сетки разбиения при этом составило $N \sim 70000$. Время отдельного расчета на компьютере Xeon X-5660 при использовании двух ядер составило около 4 часов, что вполне приемлемо для проведения инженерных расчетов.

2.5.3 Учет теплового контактного сопротивления между элементами конструкции

Представленные на Рисунке 2.4 температурные распределения в ВЧИД-16 рассчитаны в приближении идеального теплового контакта для всех имеющихся сочленений различных узлов в конструкции ВЧИД-16. В пакете программ ANSYS расчетной программе это производится введением чрезвычайно малого контактного сопротивления R_c . Удобно использовать обратную величину K , называемую термическая проводимость контакта [53], и определяемой следующим образом:

$$K = \frac{1}{R_c} \quad (2.39)$$

Тогда теплопроводный поток в контакте определяется следующим выражением:

$$q = K \cdot \Delta T, \quad (2.40)$$

где q - плотность теплового потока через контакт;

ΔT - разность температур сопряженных поверхностей.

Идеальный контакт в программе моделируется выбором большого числового значения $K = 10^6 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ для всех контактов в расчетной модели.

Для верификации расчетной модели по степени тепловых контактов были проведена серия расчетов при различных значениях K для различных пар в контактах. Наименьшая проводимость K осуществляется в контакте между керамической ГРК, проставкой между ГРК и силовым кольцом, изготовленной из керамики Al_2O_3 .

Термические проводимости для различных типов контактов в рассматриваемой модели ВЧИД-16 были выбраны следующими:

$$K = \begin{cases} 1.3 \cdot 10^3, & \text{керамика} - \text{керамика} \\ 5 \cdot 10^4, & \text{керамика} - \text{металл} \\ 10^5, & \text{металл} - \text{металл} \end{cases}, \quad (2.41)$$

При данных значениях термических проводимостей был проведен сравнительный расчет с аналогичными входными данными. На рисунке 2.6 приведено распределение температур на участке контакта с максимальной разницей температур по обе стороны контакта. Такое отличие, как и следовало ожидать, получено в зоне контакта керамика-керамика в зоне крепления ГРК к силовому кольцу через тонкую изолирующую керамическую проставку. Разница температур с разных сторон контакта составила 6 К (см. рисунок 2.6).

Температуры в характерных точках основных узлов конструкции ВЧИД, а именно в центре ЭЭ и УЭ, а также наиболее нагретой верхней части купола ГРК в контрольном расчете с реальными контактными проводимостями отличаются не более, чем на один градус по сравнению с вариантом аналогичного расчета с идеальными тепловыми контактами.

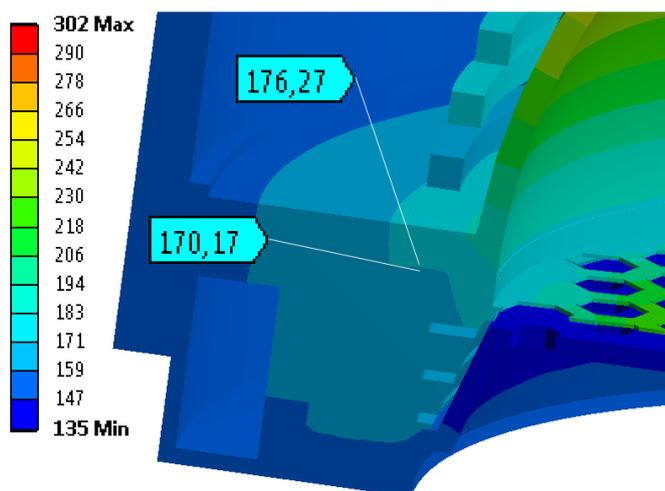


Рисунок 2.9 – Температуры ГРК и силового кольца вблизи границы раздела при неидеальном контакте

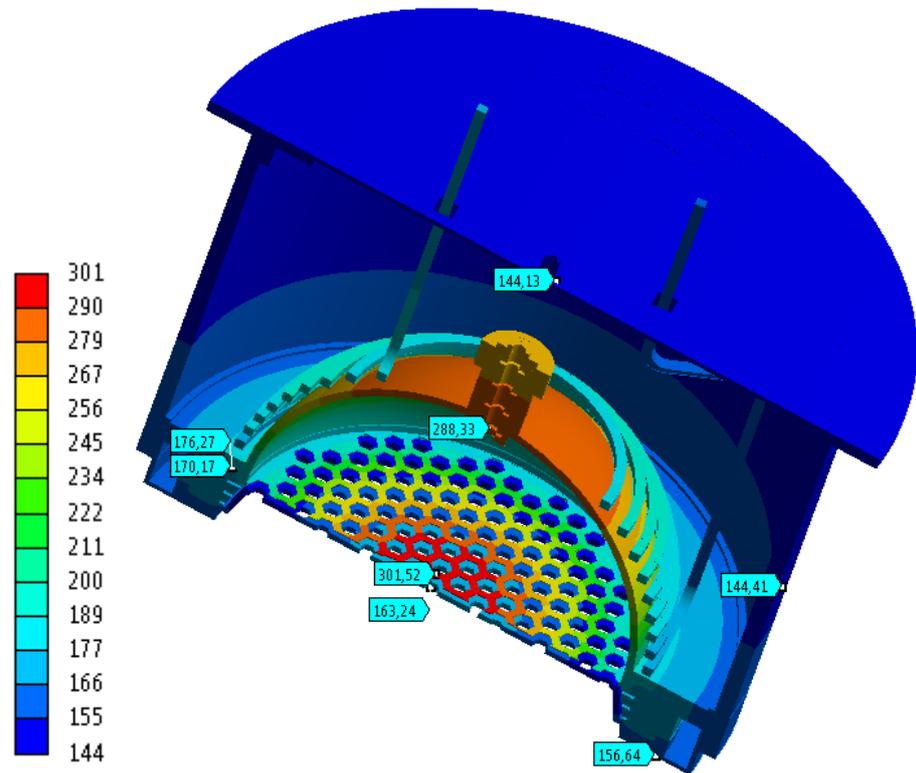
2.5.4 Численный расчет температур в модельной конструкции ВЧИД – 16

Процедура подготовки расчетной модели к счету включает в себя задание в диалоговом режиме следующих начальных данных:

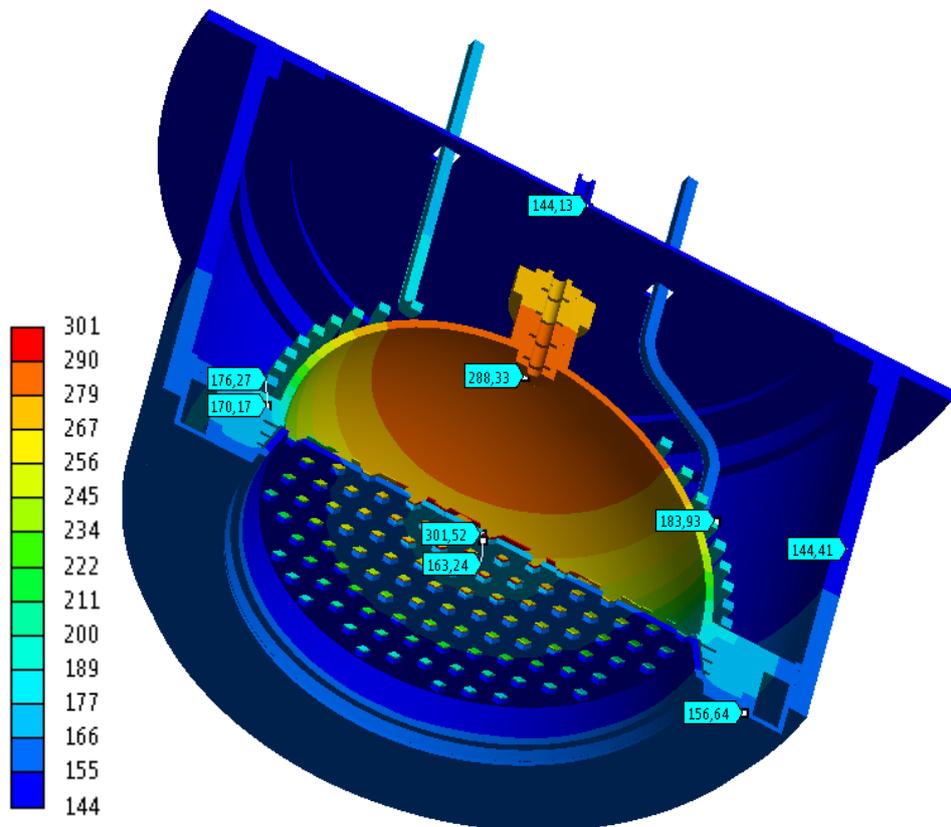
- сеточная модель ВЧИД, аналогичная изображенной на рисунке 2.2;
- теплофизические параметры, а именно коэффициенты теплопроводности λ_i и степени черноты ε_i для всех элементов сетки разбиения;
- граничные условия I и II рода в виде температур окружающей среды и внешних тепловых потоков, падающих на элементы конструкции ВЧИД;
- начальные условия в виде распределения температур для всех элементов сетки разбиения ВЧИД;
- контактные сопротивления в узлах сопряжения сеточных элементов, принадлежащих различным узлам (в случае задания реального контакта).

Также задается погрешность расчета.

Характерное распределение температур, полученное расчетным способом для модельной конструкции ВЧИД – 16 приведено на рисунке 2.10. Для удобства объект изображен в разрезе.



А)



Б)

Рисунок 2.10 – Распределения температур в ВЧИД – 16

Время счета приблизительно пропорционально $N_{\text{сетки}}^2$, поскольку в процессе компьютерного расчета постоянно вычисляются взаимные потоки тепловой мощности (лучистой и теплопроводной) между элементами сетки разбиения объекта.

Для сокращения объема вычислений на данном этапе исследования принят ряд упрощений, целью которых являлось сокращение времени отдельного счета. Упрощения проводились для уменьшения количества элементов сетки разбиения ВЧИД. Для ряда узлов конструкции допускалось изменение их формы. Однако все изменения и упрощения проверялись на сохранении физической адекватности расчетной модели и требуемой точности расчетов температур элементов конструкции ВЧИД на уровне не хуже 3%. Верификация расчетной модели производилась путем проведения сравнительных расчетов температурных распределений при использовании упрощений и без них. Упрощения расчетной модели изложены ниже.

2.5.5 Влияние зачернения эмиссионного электрода на температуры электродов ИОС

Одним из известных способов уменьшения температур поверхностей является нанесение покрытий с возможно большей степенью черноты для увеличения лучистого сброса тепла. Рассматривалась возможность уменьшения температуры ЭЭ, как наиболее нагретого и в то же наиболее критического элемента двигателя. Покрытие ЭЭ должно быть проводящим, учитывая необходимость обеспечения ухода электронов из плазмы разряда для сохранения зарядового баланса в ГРК, о чем было сказано выше. В случае использования ЭЭ под плавающим потенциалом при наличии в ГРК анода покрытие может быть изолирующим. Высокую степень черноты покрытия, которое может быть нанесено на ЭЭ, можно получить оксидированием его поверхности, технологии которых достаточно известны. В случае проводящей поверхности ЭЭ можно порекомендовать графитизацию поверхности ЭЭ, что тоже хорошо известно.

Наличие компьютерной модели расчета температур во ВЧИД позволяет проверить предположение об уменьшении температуры ЭЭ увеличением степени черноты его поверхности. Численно выполнен численный расчет температур в модельном ВЧИД-16, где вместо значения $\varepsilon_{\text{ЭЭ}}=0,3$, принятого для использованного молибдена, было использовано значение $\varepsilon_{\text{ЭЭ}}=0,95$, т.е. степени черноты зачерняющего покрытия. Все остальные параметры расчета, включая входные тепловые потоки, падающие на поверхности узлов конструкции двигателя, были в точности такими же.

Результаты расчета температур приведены на Рисунке 2.11.

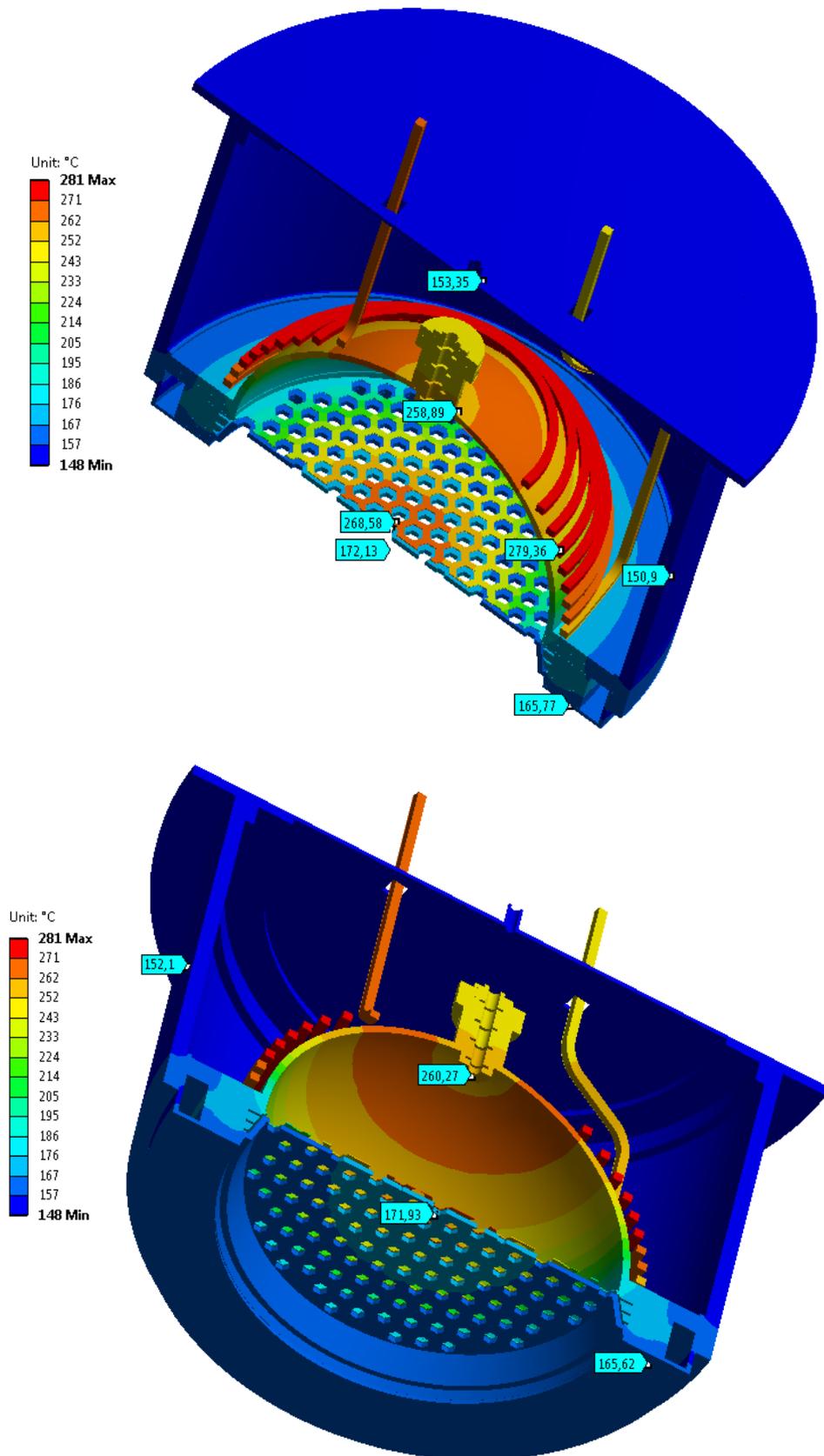


Рисунок 2.11 Расчетные температуры в ВЧИД-16 при зачернении ЭЭ

По сравнению с температурными распределениями, приведенными на Рисунке 2.10, видно, что температура ЭЭ уменьшилась почти на 40° , что довольно существенно.

Профили температур электродов ИОС изображены на Рисунке 2.12. Видно, что температура УЭ увеличилась примерно на 10° , что можно объяснить увеличением теплового потока на него от ЭЭ из-за повышения степени черноты последнего.

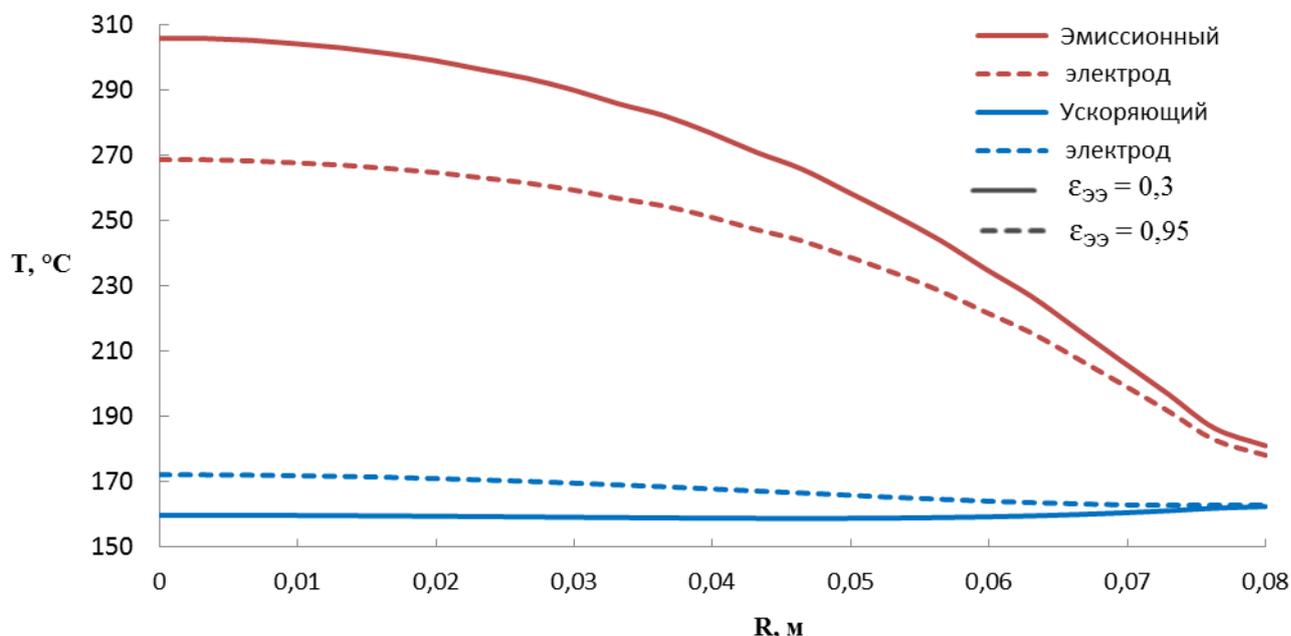


Рисунок 2.12 Профили температур электродов ИОС

Такое увеличение температуры УЭ менее существенно, чем более заметное уменьшение температуры ЭЭ.

Таким образом, численный расчет показал, что можно уменьшить температуру ЭЭ почти на 40° , если на его поверхность нанести покрытие со степенью черноты 0,95.

2.6 Заключение к главе

Подробно изложена физико-математическая модель численного расчета температур в ВЧИД. Приведены система уравнений для расчета, граничные и начальные условия задачи. Описаны упрощения и допущения, принятые при разработке расчетной модели для сокращения объема вычислений при соблюдении физической адекватности расчетной модели. Приведены результаты модельного расчета температурных распределений в модельной конструкции ВЧИД – 16.

В следующем разделе изложены некоторые результаты расчетов температурных распределений в узлах конструкции ВЧИД различного типоразмера.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ВЧИД РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ

В данной главе приводятся результаты исследований температурных полей в разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ моделях и опытных образцах ВЧИД. Исследования проводились на этапе их проектирования и разработки конструкторской документации. По мере их разработки, изготовления и испытаний проводилось экспериментальное исследование температурных полей, результаты которых приведены в главе 4. Там же приведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных на предмет подтверждения адекватности расчетных моделей, разработанных в диссертации. Расчетные исследования имели целью выявление работоспособности создаваемых двигателей при тех температурах, которые прогнозировались на основании расчета, выявления режимов, при которых в определенных элементах конструкций достигаются критические температуры. Выявленные таким образом режимы являются предельными. По результатам температурных расчетов давалась оценка рабочих параметров двигателя, определялся основной режим работы двигателя, делалось предварительное заключение о соответствии параметров этого режима требованиям ТЗ. Температурные исследования проводились в рамках ОКР «ЭРДНП» по заданию ОКБ «Факел», НИОКР «ВЧИД ММ» при индустриальном партнерстве АО КБХА и по ОКР «ВЧИД» по заданию АО КБХА.

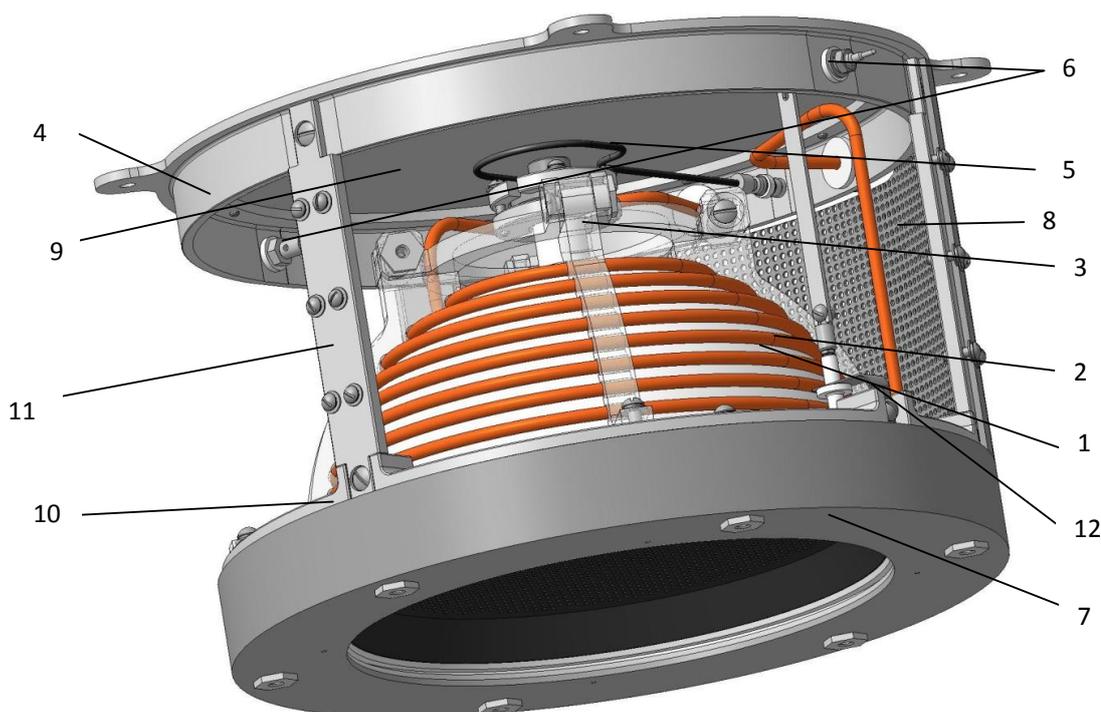
В данной главе представлены результаты расчетного исследования распределения температур в узлах конструкции лабораторного образца ЛО ВЧИД – 16 (ОКР «ЭРДНП»), ВЧИД – 49 (ОКР «ВЧИД») и двигательного блока ДБ ВЧИД – 8 (ОКР «ВЧИД ММ»). Для ДБ ВЧИД – 8 были выполнены более детальные расчеты для конструкции, включающей в себя кроме двигателя, блок системы электрического питания и управления (СПУ ВЧИД), а также блок управления газораспределением (БУГР). Для ВЧИД – 16 и ВЧИД – 49 температурные расчеты выполнены только для двигателей. Расчеты проводились для различных значений входной ВЧ мощности и прогнозируемых величин ионного тока. Рассчитываемые из значений этих параметров входные тепловые потоки, падающие на поверхность ГРК, электродов ЭЭ и УЭ, а также выделяющиеся в ВЧ индукторе, определялись в соответствии с методикой, изложенной в главе 2. Из уравнения баланса ВЧ мощности (2.33) рассчитывалось значение электронной температуры, которое в качестве параметра определяло численные значения плотностей тепловых потоков по выражениям, приведенных выше в главе 2.

Во всех расчетах, излагаемых в данной главе, при определении плотности бомовского тока в соответствии с уравнений (2.13) было учтено значение кривизны мениска плазмы в отверстии ЭЭ введением коэффициента $\gamma = 1.1$.

3.1 Расчет температур в элементах конструкции ЛО ВЧИД –16.

3.1.1 Исходные данные по конструкции ЛО ВЧИД-16

Для теплового моделирования был представлен компоновочный чертеж лабораторного образца двигателя (ЛО ВЧИД-16). Чертеж общего вида образца приведен на рисунке 3.1.



1 – корпус ГРК; 2 – индуктор; 3 – узел крепления индуктора; 4 – крепежный фланец; 5 – газовод; 6 – узел клеммы; 7 – узел ИОС; 8 – перфорированный кожух; 9 – термоизолирующая пластина; 10 – опорный фланец; 11 – стойка; 12 – прижим изолятора токоподвода ускоряющего электрода

Рисунок 3.1 – Чертеж общего вида ЛО ВЧИД-16 с секцией кожуха

Фотографии модели без кожуха и с кожухом, играющим роль теплового экрана, приведены на рисунке 3.2.

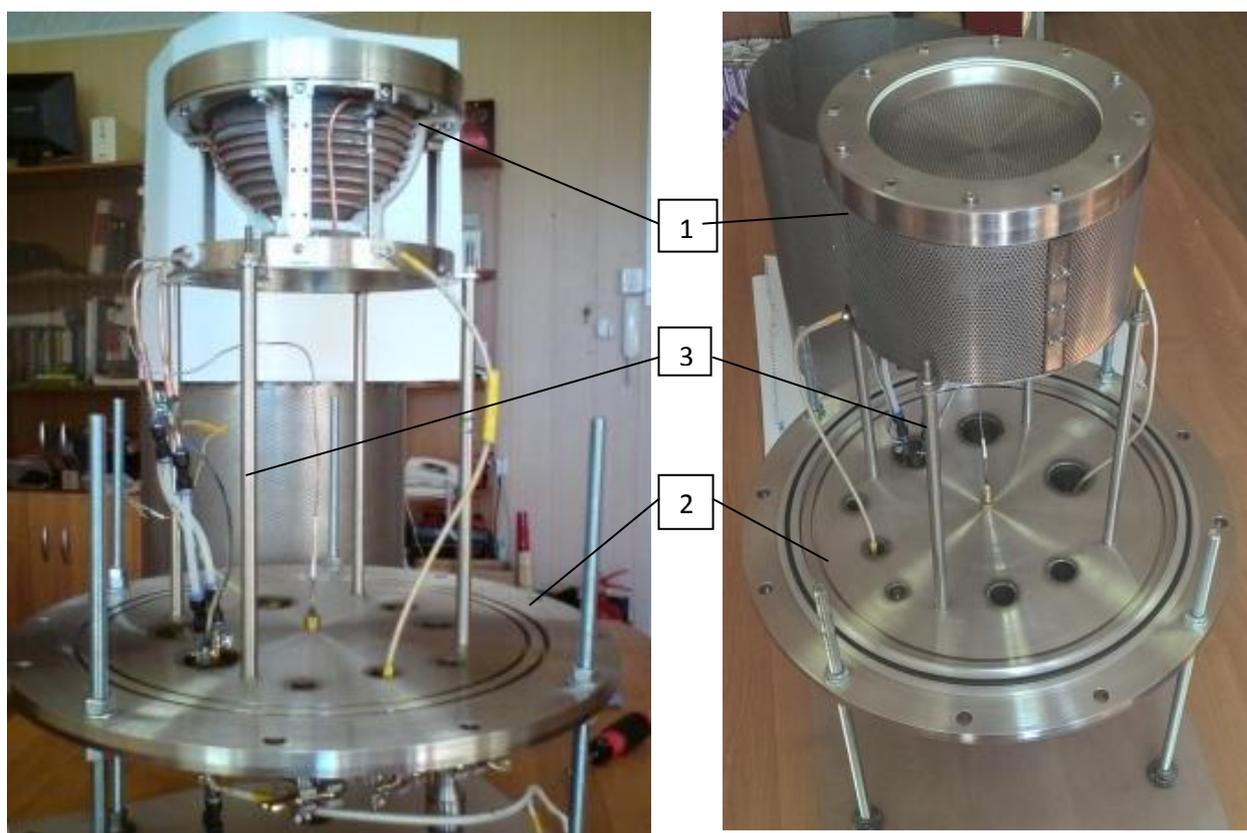


Рисунок 3.2 – Фотографии ЛО ВЧИД-16 без кожуха (слева) и с кожухом (справа)
 Материалы, из которых выполнены элементы конструкции ЛО ВЧИД-16, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Состав материалов для ЛО ВЧИД-16

№ варианта	Материал электродов ИОС	Материал изолирующих колец	Материал корпуса ГРК	Материал корпуса двигателя
1	Титановый сплав ВТ1-0	Кремний органический стеклопластик	Кремний органический стеклопластик	Нержавеющая сталь
2	Титановый сплав ВТ1-0	Кремний органический стеклопластик	Нитрид кремния	Нержавеющая сталь

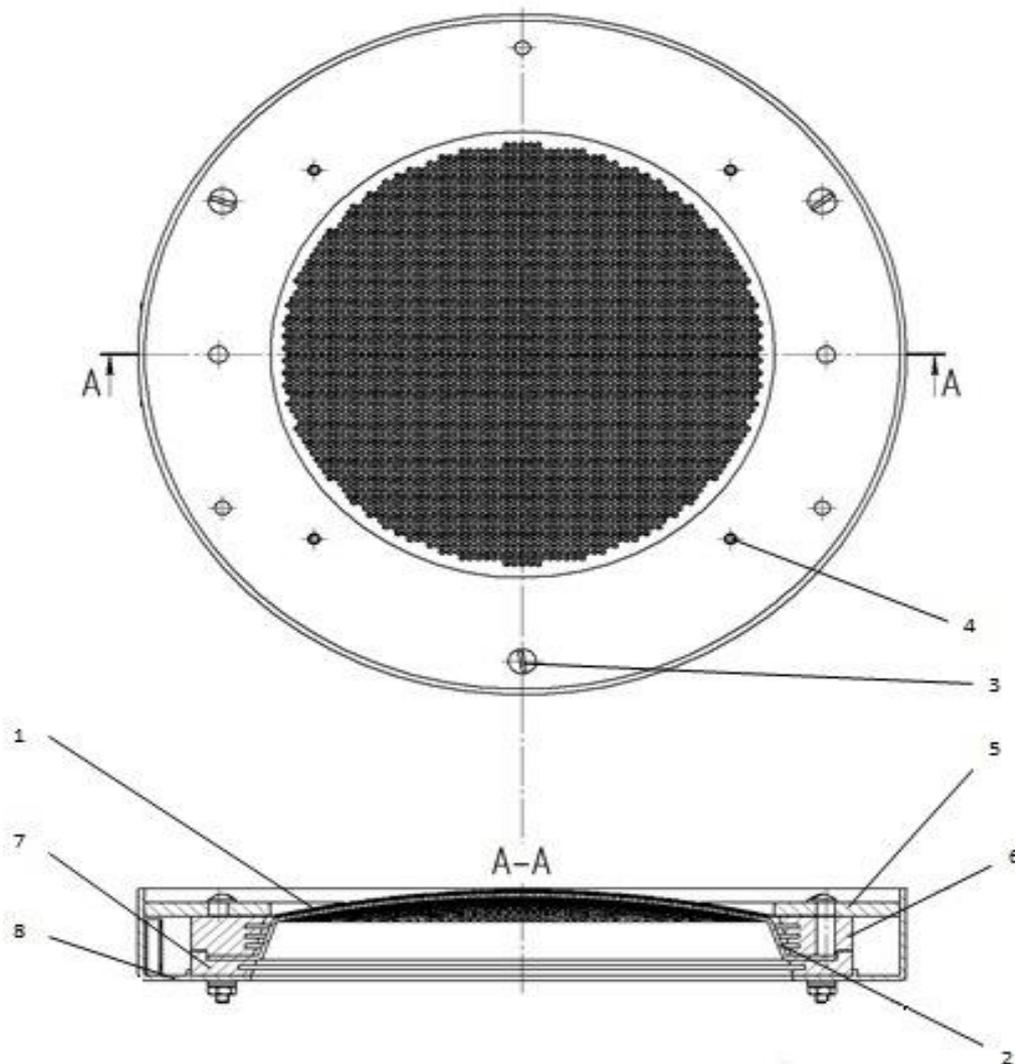
ЛО ВЧИД – 16 имеет полусферическую ГРК, изготовленную из Al_2O_3 . Планируемые значения ионного тока для двух мощностей 200 Вт и 300 Вт (рабочий режим) составляют 0,66 А и 1 А соответственно. Характеристики ЛО ВЧИД – 16 вместе с планируемым током индуктора приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные технические характеристики и параметры разряда в ЛО ВЧИД - 16

ВЧ мощность, Вт	Ток на индукторе, А	Ток пучка, А
200	5	0,66
300	6	1

3.1.2 Сетка разбиения численной модели ЛО ВЧИД – 16

В компьютерной модели невозможно отобразить исследуемую конструкцию во всех деталях. Особую сложность представляет отображение густо перфорированных электродов ионно-оптической системы двигателя и индуктор. Чертеж узла ионно-оптической системы (ИОС) приведен на рисунке 3.3.



1 – эмиссионный электрод; 2 – ускоряющий электрод; 3 – стяжной болт; 4 – штифт; 5 – силовой изолирующий фланец ИОС; 6 – промежуточный кольцевой изолятор; 7 – опорный кольцевой изолятор для ускоряющего электрода; 8 – внешний кожух ИОС

Рисунок 3.3 – Узел ИОС

Эмиссионный электрод (ЭЭ) (рисунок 3.3) представляет собой профилированную тонкостенную оболочку толщиной 0,3 мм и являющуюся сегментом сферы радиусом 350 мм. В ЭЭ выполнены отверстия диаметром 2,5 мм в виде гексагональной плотной упаковки с расстоянием между центрами соседних отверстий 3 мм. Число отверстий в ЭЭ составило 2515, геометрическая прозрачность ЭЭ равна 0.51. В ускоряющем электроде (УЭ) диаметры отверстий составили 1,6 мм с тем же шагом. Толщина УЭ выбрана равной 2 мм.

На рисунке 3.4 представлена сетка разбиения компьютерной модели ЛО ВЧИД – 16. Для сокращения объема вычислений для данной модели ВЧИД были сделаны следующие упрощения:

- число отверстий в электродах ИОС уменьшено примерно в 13 раз, и составило 187 вместо 2515 при сохранении геометрической прозрачности электродов,
- круглые отверстия в ЭЭ и УЭ ИОС заменены гексагональными.

Для индуктора, выполненного в виде спирали из медной трубки 4х0,5 круглого сечения, была выбрана модель сплошной спирали квадратного сечения.

За счет этих упрощений узлов конструкции удалось увеличить линейные размеры отдельных элементов сетки разбиения данных узлов, используя соответствующую симметрию - квадратную и гексагональную.

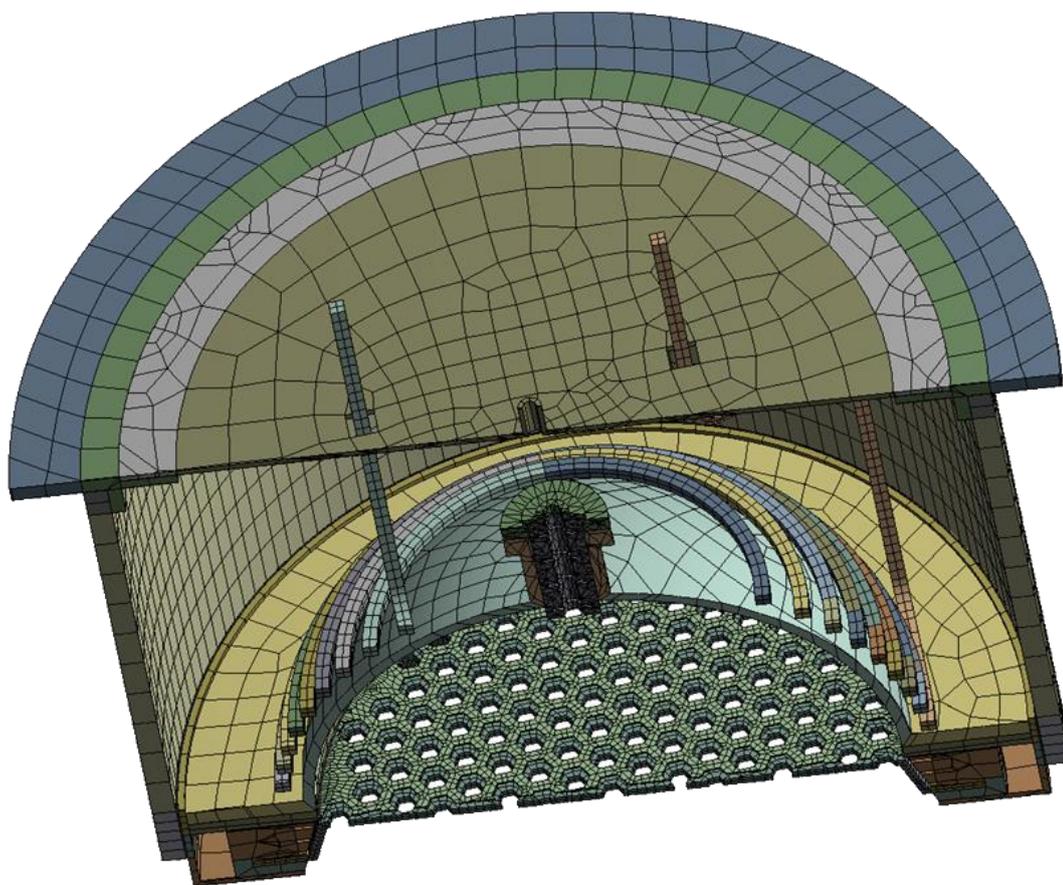


Рисунок 3.4 – Сетка разбиения ЛО ВЧИД – 16

3.1.3 Расчеты температур при $W_{ВЧ} = 200 \text{ Вт}$

Значение электронной температуры T_e при $W_{ВЧ} = 200 \text{ Вт}$, рассчитанное по (2.33), оказалась равным 4,02 В. Для $W_{ВЧ} = 300 \text{ Вт}$ значение T_e составило 3,96 В, т.е. практически не изменилось. Слабая зависимость T_e от ВЧ мощности характерна для индукционного разряда. Расчетные значения находятся в хорошем согласии с измеренными с применением зондов [33, 34]

Входные тепловые потоки, падающие на поверхность ГРК, электродов ЭЭ и УЭ, а также ВЧ индуктора, были определены в соответствии с методикой, изложенной в главе 2, в соответствии с выражениями (2.7), (2.19), (2.20), (2.24) – (2.28), (2.30). В компьютерных расчетах в качестве исходных граничных условий задаются плотности входных тепловых потоков, которые получаются из значений данных потоков делением на соответствующие площади поверхностей.

3.1.3.1 Входные тепловые потоки

Численные значения плотностей входных тепловых потоков при $W_{Вч} = 200$ Вт и $I_0 = 0,66$ А приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Плотности тепловых потоков на элементы ВЧИД при 200 Вт ВЧ мощности

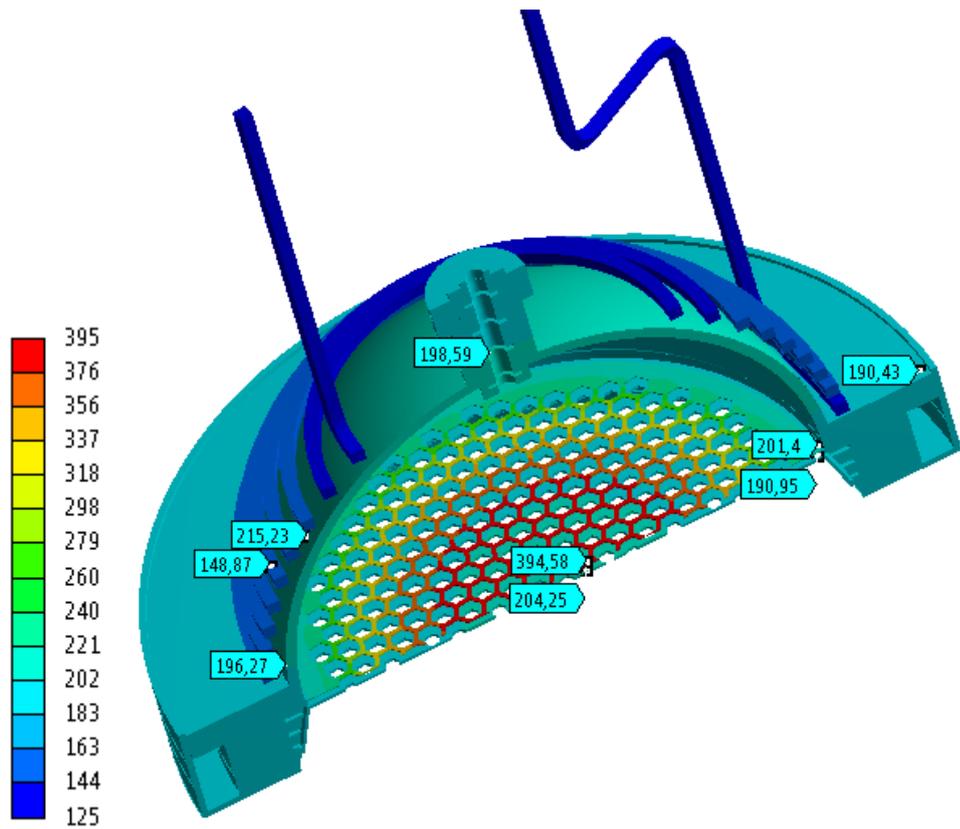
	Элементы конструкции ВЧИД	Плотность теплового потока, Вт/м ²
1	ГРК	2906
2	ЭЭ, область перфорации	3481
3	ЭЭ, кольцевая область	3736
4	УЭ, от перезарядных ионов	108
5	УЭ, излучением из плазмы и от стенок ГРК	382
6	Индуктор	27

Отметим, что плотности тепловых потоков на ЭЭ в кольцевой и перфорированной части отличаются приблизительно на 10%, что происходит вследствие описанного в главе 2 механизма стягивания ионного пучка в отверстия в ЭЭ, что приводит к уменьшению плотности ионного тока на области между отверстиями в ЭЭ.

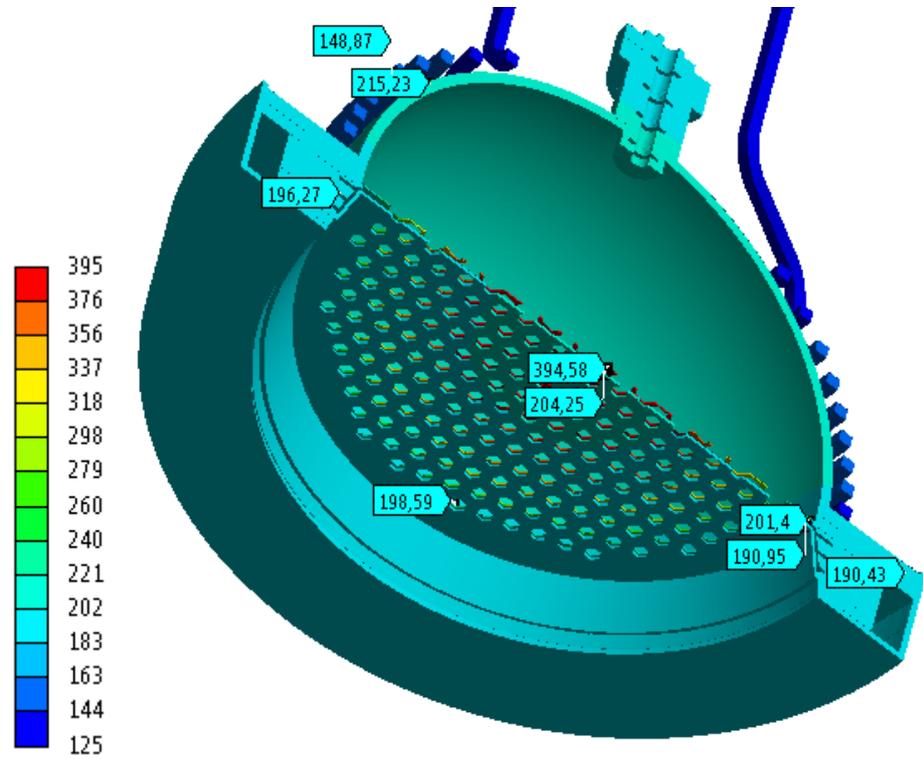
В таблице 3.3 отдельно выделены (4 – 5 строчки) составляющие теплового потока на УЭ от перезарядных ионов, а также от излучения, падающего на ЭЭ из плазмы разряда и со стенок ГРК при рекомбинации на ней ионов и электронов. Видно, что поток от дополнительного излучения более чем в 3,5 раза превосходит тепловой поток, приносимый на поверхность УЭ ионами перезарядки.

3.1.3.2 Результаты расчета температур

Рассчитанные температурные распределения в ВЧИД – 16 при $W_{Вч} = 200$ Вт и значениях плотностей тепловых потоков, приведенных в таблице 3.3, приведены на рисунке 3.5.



А



Б

Рисунок 3.5 - Распределения температур (в $^{\circ}\text{C}$) в ЛО ВЧИД-16 при $W_{\text{ВЧ}} = 200 \text{ Вт}$,
 $I_0 = 0,66 \text{ А}$

Наиболее нагретыми элементами конструкции ЛО ВЧИД-16 являются центральная область ЭЭ - до температуры, близкой к 400 °С. Температура ГРК - заметно ниже и изменяется от 215 °С в верхней наиболее нагретой части до примерно 200 °С в районе крепления ГРК к силовому кольцу. Индуктор нагрет практически равномерно по всей длине до температуры 148 °С. Ускоряющий электрод также нагрет почти равномерно: его температура изменяется в диапазоне 190...204 °С. Температура силового кольца оказалась вблизи 200 °С. Оно аккумулирует значительное количество тепла, «стекающее» к нему со стенок ГРК (несмотря на малую толщину и плохую теплопроводность керамики стенок ГРК).

Таблица 3.4 – Максимальные и минимальные температуры элементов ВЧИД при 200 Вт ВЧ мощности

Название элемента	Максимальная температура, °С	Минимальная температура, °С
ГРК	215	200
ЭЭ	395	201
УЭ	204	190
Индуктор	154	125

Температура в центре эмиссионного электрода, как видно из таблицы 3.4, находится вблизи критического значения температуры $T_{Г1} = 400$ °С. Поверхности, с которых происходит сброс тепла в окружающее пространство, а именно: ГРК, УЭ и силовое кольцо нагреты до температур около 200 °С.

3.1.4 Расчеты температур при $W_{Вч} = 300$ Вт

3.1.4.1 Входные тепловые потоки

Был выполнен численный расчет температур в конструкции ЛО ВЧИД – 16 при $W_{Вч} = 300$ Вт и $I_0 = 1$ А, что соответствует рабочему режиму двигателя. Значение T_e на этом режиме, как указано в пункте 3.1.3, практически совпадает с T_e при $W_{Вч} = 200$ Вт. Это подтверждает известный ранее экспериментальный факт, что в высокочастотном разряде не удается повысить значение T_e увеличением $W_{Вч}$, что было бы выгодно с точки зрения уменьшения цены иона. При

увеличении $W_{вч}$ происходит увеличение концентрации n_e и, следовательно, n_i , что приводит к росту ионного тока из двигателя I_0 .

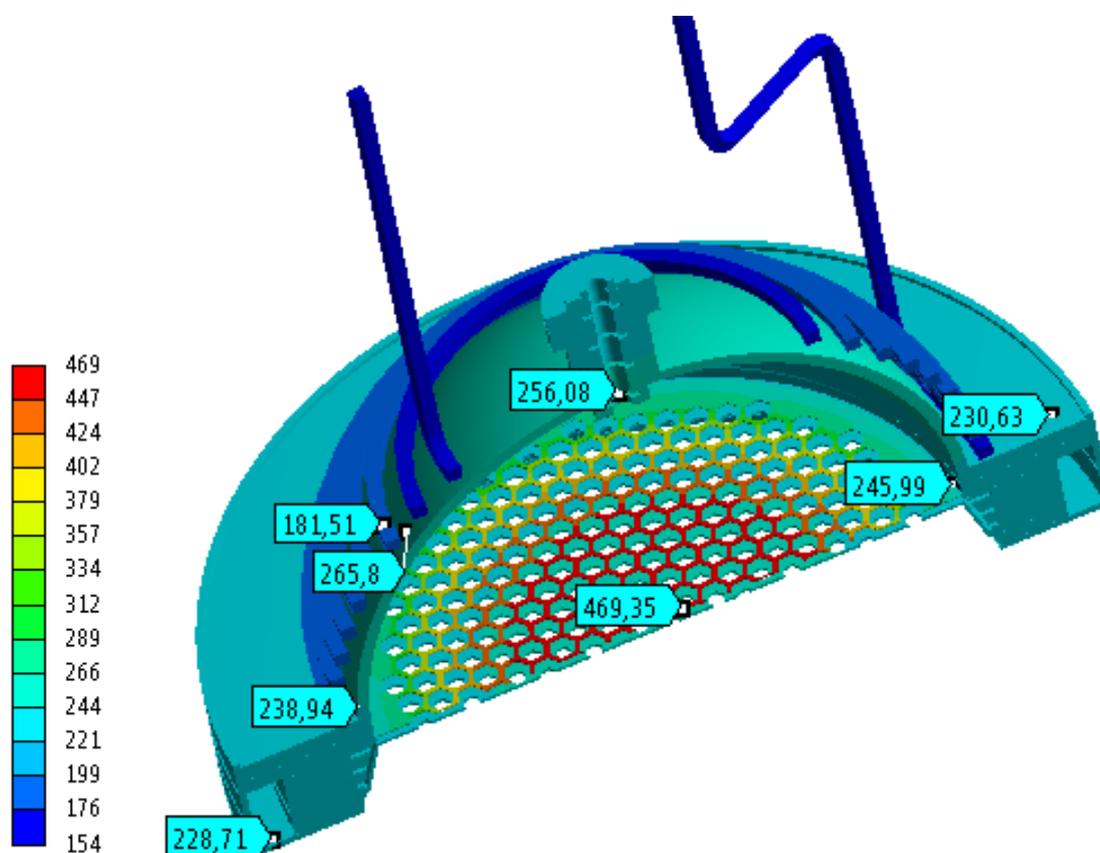
В таблице 3.3 приведены численные значения плотностей входных тепловых потоков.

Таблица 3.5 – Плотности тепловых потоков на элементы ВЧИД при 300 Вт ВЧ мощности

	Элементы конструкции ВЧИД	Плотность теплового потока, Вт/м ²
1	ГРК	4360
2	ЭЭ, область перфорации	5223
3	ЭЭ, кольцевая область	5607
4	УЭ, от перезарядных ионов	164
5	УЭ, излучением из плазмы и от стенок ГРК	574
6	Индуктор	39

3.1.4.2 Результаты расчета температур

Результаты расчета температурных распределений в ЛО ВЧИД – 16 при $W_{вч} = 300$ Вт, $I_0 = 1$ А изображены на рисунке 3.6.



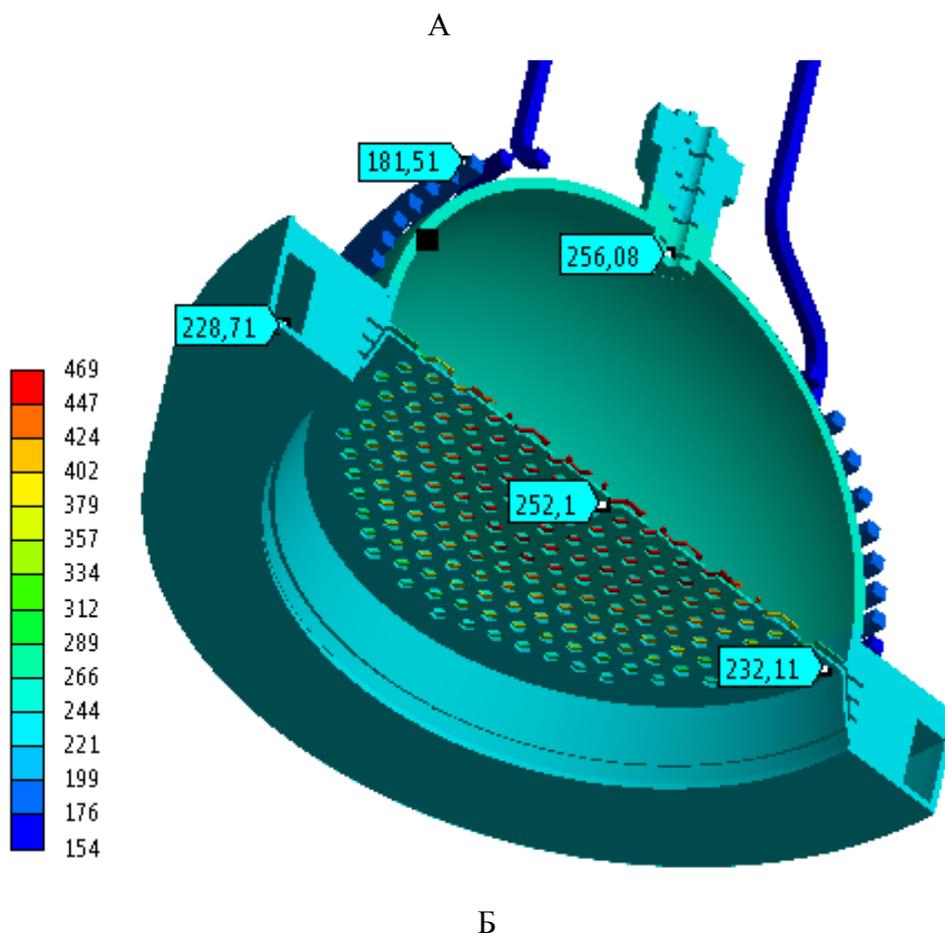


Рисунок 3.6 - Распределения температур (в $^{\circ}\text{C}$) в ЛО ВЧИД-16 при $W_{\text{вч}} = 300$ Вт,
 $I_0 = 1$ А

Таблица 3.6 – Максимальные и минимальные температуры элементов ВЧИД при $W_{\text{вч}} = 300$ Вт и $I_0 = 1$ А

Название элемента	Максимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	Минимальная температура, $^{\circ}\text{C}$
ГРК	265	238
ЭЭ	469	246
УЭ	252	232
Индуктор	181	154

Центральная часть ЭЭ нагрета до температур, превышающих 460°C . Температура ГРК увеличилась до $240\dots 265^{\circ}\text{C}$. Температура индуктора увеличилась до 180°C . Температура ускоряющего электрода изменяется в диапазоне $230\dots 252^{\circ}\text{C}$.

Заметно увеличились градиенты температур в обоих электродах ИОС. Так, для ЭЭ перепад температур от центра к краю электрода вырос со 190 °С до 240 °С. Для УЭ изменение температур от центра к краю составило 20 °С вместо 10 °С в расчете для $W_{ВЧ} = 200$ Вт.

Температура силового кольца увеличилась примерно до 230 °С. И соответственно поверхности, с которых происходит сброс тепла в окружающее пространство, оказались нагретыми до примерно 250 °С против 200 °С.

3.1.5 Профили температур на эмиссионном и ускоряющем электродах ИОС

Профили температур по радиусу электродов были рассчитаны по полученным температурным распределениям, приведенным на рисунке 3.2 и рисунке 3.3. Профили температур ЭЭ и УЭ по радиусу для значений ВЧ мощности 200 Вт и 300 Вт показаны на рисунке 3.7.

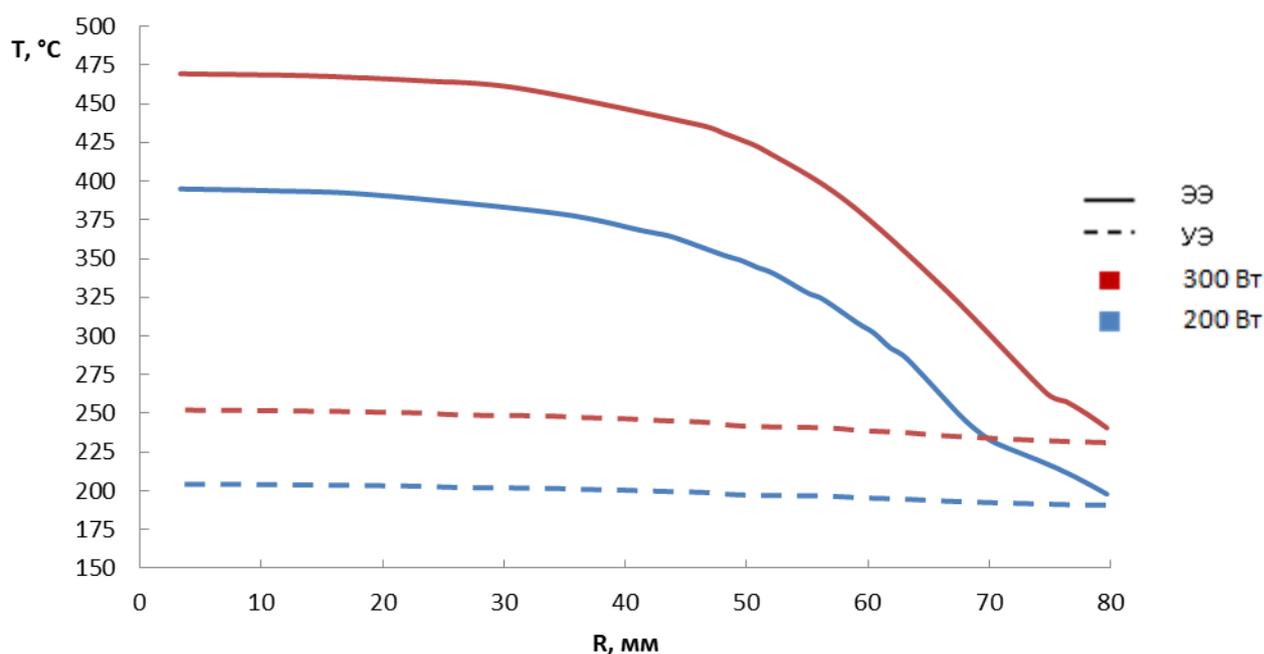


Рисунок 3.7 - Радиальные распределения температур ЭЭ и УЭ

Как видно, температуры УЭ изменяются от центра к краю на небольшую величину, в отличие от температуры ЭЭ, которая обнаруживает значительный градиент при обоих значениях ВЧ мощности. Максимальный градиент температуры достигается приблизительно на расстоянии 0,75 от радиуса ЭЭ.

3.1.6 Выводы по результатам расчета температур

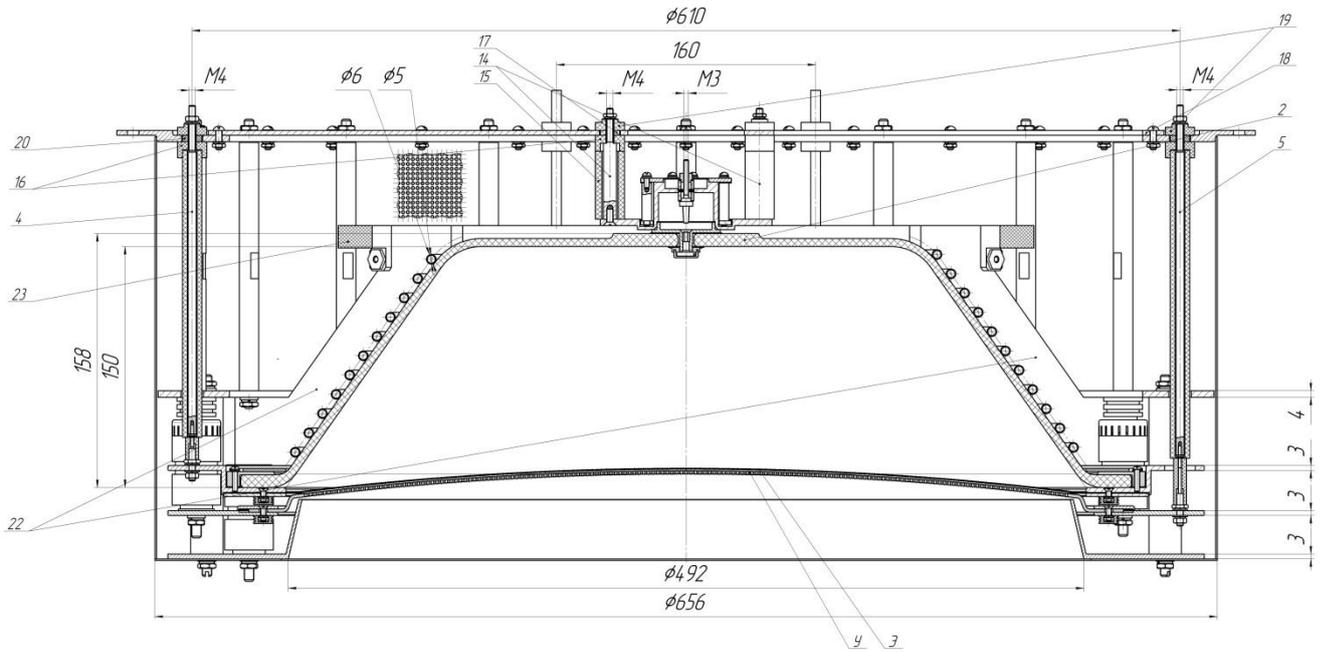
Термомеханические свойства титанового сплава ВТ-14 таковы, что критическая температура его использования оценивается на уровне 400 °С. Выше этой температуры тонкие электроды, изготовленные из данного сплава теряют устойчивость – их термическая деформация становится настолько значительной, что изменение величины межэлектродного промежутка становится чрезмерным и применение данного сплава в конструкции ВЧИД выше указанной температуры нецелесообразно. Расчеты температур в ВЧИД – 16, выполненные для двух значений ВЧ мощности, выявили, что при ВЧ мощности, равной 300 Вт, температуры центральной части ЭЭ переходят в закритическую область. Значение ВЧ мощности в 200 Вт, видимо, близко к предельной в случае использования сплава ВТ-14 в качестве материала для изготовления, по крайней мере эмиссионного электрода.

Проведенные тепловые расчеты определили режим мощности 300 Вт как предельный для ЛО ВЧИД-16 при использовании титановых сплавов для изготовления электродов ИОС.

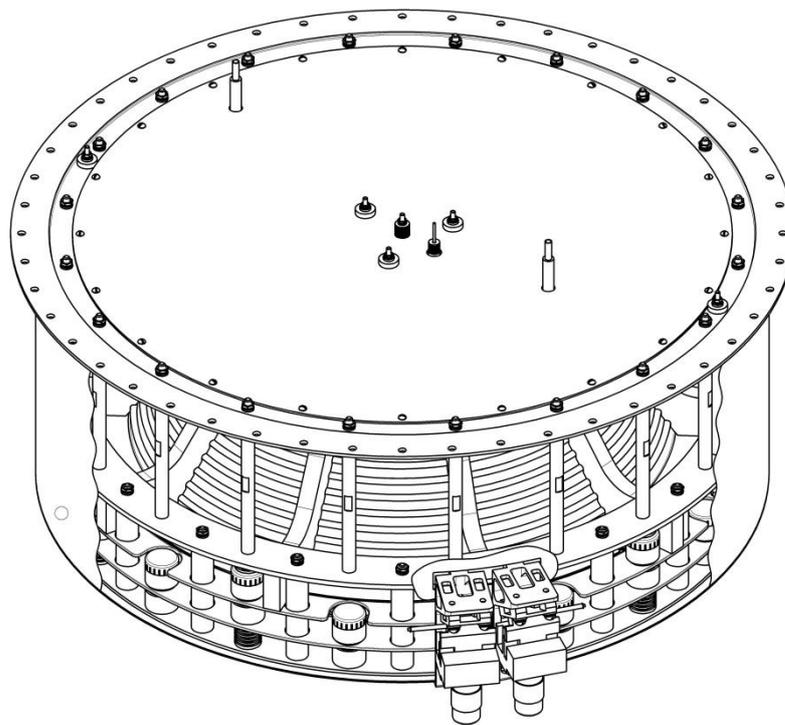
3.2 Расчет температур в элементах конструкции ВЧИД – 49 М

3.2.1 Исходные данные по конструкции ВЧИД – 49 М

Двигатель ВЧИД – 49 М, рассматривается в качестве прототипа опытного образца ВЧИД мощностью 15 – 20 кВт. В настоящее время двигатель разрабатывается в НИИ ПМЭ МАИ по заданию АО КБХА. Чертеж опытного образца двигателя изображен на рисунке 3.8.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Чертеж общего вида двигателя ВЧИД – 49М [66]

Трехмерная модель ВЧИД – 49 М представлена на рисунке 3.9. Материалы, используемые в конструкции ВЧИД – 49 М такие же, как и в конструкции ЛО ВЧИД – 16, приведенные в таблице 3.1. Основное отличие в конструкции от ЛО ВЧИД – 16 М сводится к изменению формы ГРК двигателя, которая выполнена в форме усеченного конуса.

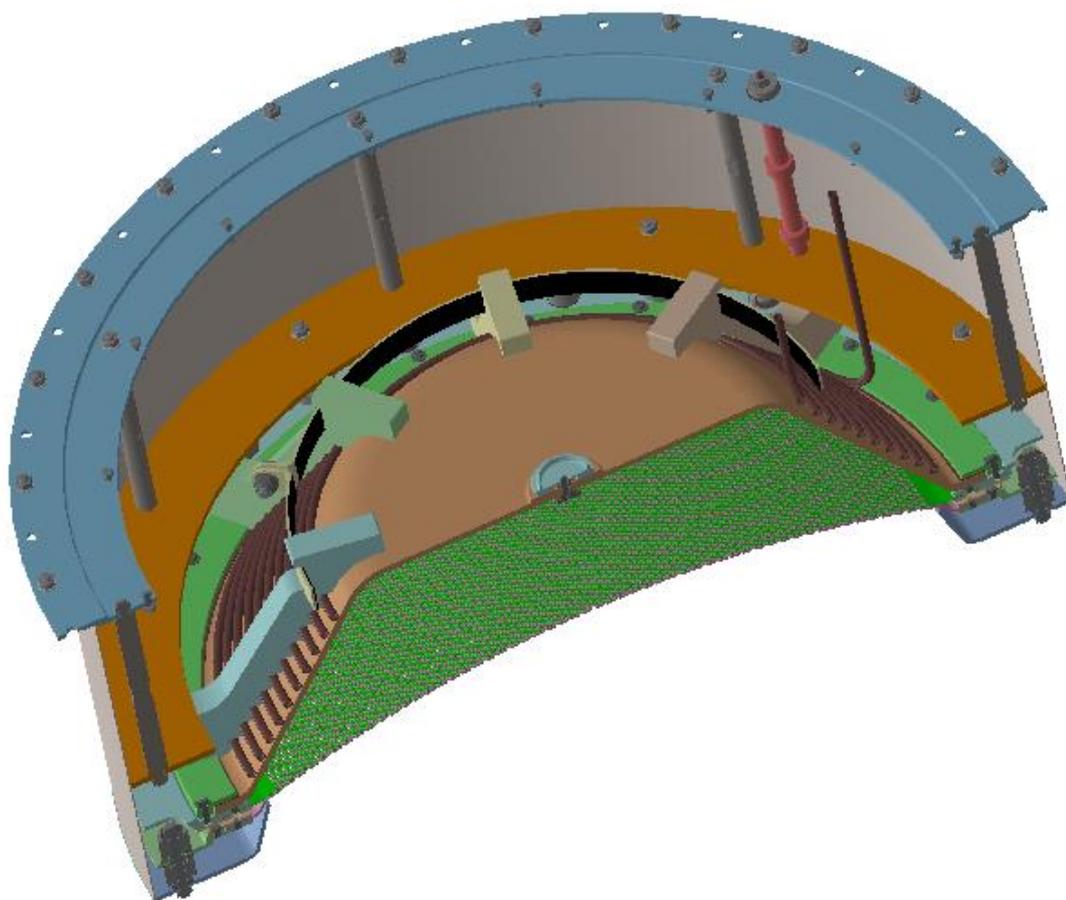


Рисунок 3.9 – Трехмерная модель ВЧИД - 49 М

По сравнению с ЛО ВЧИД – 16 в тепловой модели ВЧИД - 49 М добавлен узел катода – нейтрализатора (КН), выполненный по схеме полого катода [67]. Выбор данной схемы КН обусловлен низкими затратами энергии на получение и перенос электронов до плазменной струи двигателя, а также высоким ресурсом работы.

Расчеты температур выполнялись также, как и для ЛО ВЧИД – 16 для двух значений ВЧ мощности 2400 Вт (основной режим работы) и 2800 Вт. Планируемые значения ионного тока для этих двух мощностей ожидаются 6 А и 7 А соответственно. Указанные мощности не включают дополнительную тепловую мощность, выделяемую при работе КН и составляющую 200 Вт на обоих режимах работы ВЧИД – 49 М. Данная мощность вводилась в расчет заданием теплового потока, падающего (и целиком поглощаемого) на поверхность катода – нейтрализатора.

3.2.2 Сетка разбиения численной модели ВЧИД – 49 М

Сеточная модель двигателя ВЧИД - 49 М вместе с катодом – нейтрализатором, для которой выполнены тепловые расчеты, представлена на рисунке 3.10.

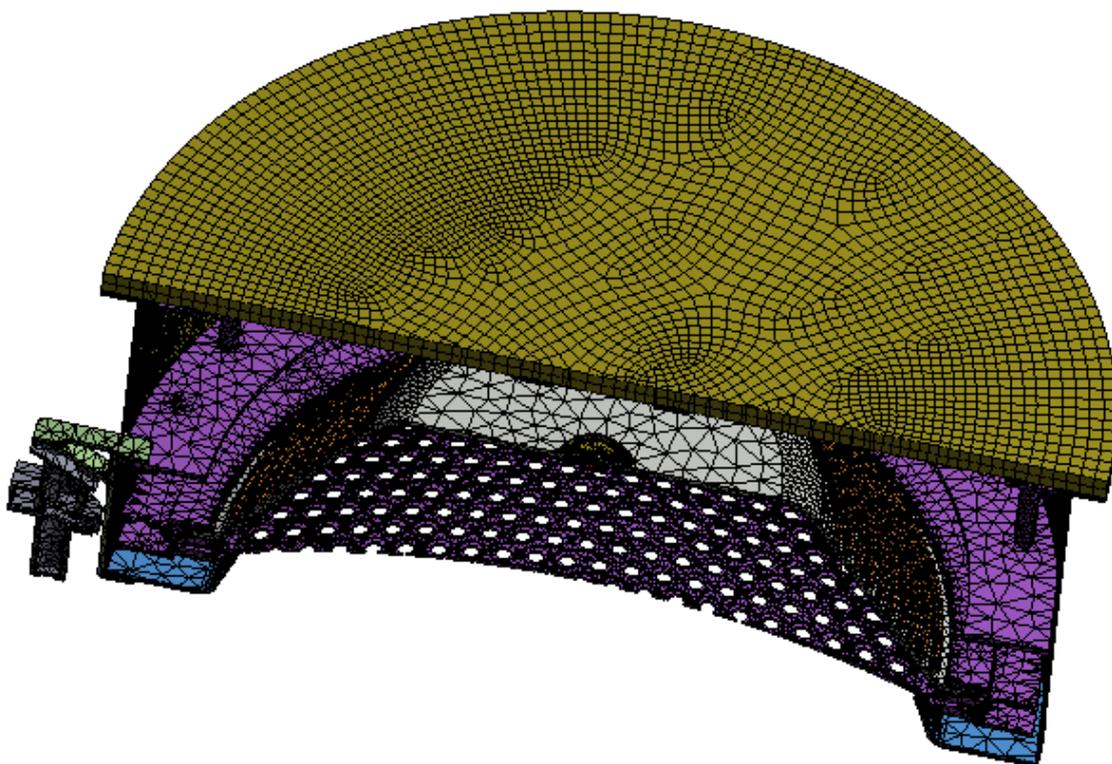


Рисунок 3.10 – Сеточная модель ВЧИД - 49 М

Количество отверстий в электродах ИОС разрабатываемой конструкции составляет 8583. В расчетной модели ВЧИД - 49 М выполнены те же упрощения и допущения, указанные в разделе 2.5 и выполненные для ЛО ВЧИД – 16, см. п. 3.1.1. Количество отверстий в электродах ИОС в упрощенной модели составило 853. Сеточная модель ВЧИД - 49 М содержит 612 520 элементов.

3.2.3 Расчеты температур при $W_{ВЧ} = 2400 \text{ Вт}$

Значение электронной температуры T_e при $W_{ВЧ} = 2400 \text{ Вт}$, рассчитанное по (2.33), оказалась равным 4,44 В. Для $W_{ВЧ} = 2800 \text{ Вт}$ значение T_e не изменилось.

Входные тепловые потоки, падающие на поверхность ГРК, электродов ЭЭ и УЭ, а также ВЧ индуктора, были определены в соответствии с выражениями (2.7), (2.19), (2.20), (2.24) –

(2.28), (2.30). Плотности входных тепловых потоков рассчитаны из значений данных потоков делением на соответствующие площади поверхностей.

3.2.3.1 Входные тепловые потоки

Плотности входных тепловых потоков приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Плотности тепловых потоков на элементы ВЧИД – 49 М при $W_{вч} = 2400$ Вт и значения тока пучка $I_0 = 6$ А

	Элементы конструкции ВЧИД	Плотность теплового потока, Вт/м ²
1	ГРК	3460
2	ЭЭ, область перфорации	4040
3	ЭЭ, кольцевая область	4217
4	УЭ, от перезарядных ионов	198
5	УЭ, излучением из плазмы и от стенок ГРК	340
6	индуктор	25
7	катод - нейтрализатор	4889

3.2.3.2 Результаты расчета температур

Рассчитанные температурные распределения в ВЧИД - 49 М при $W_{вч} = 2400$ Вт и $I_0 = 6$ А приведены на рисунке 3.11 и рисунке 3.12.

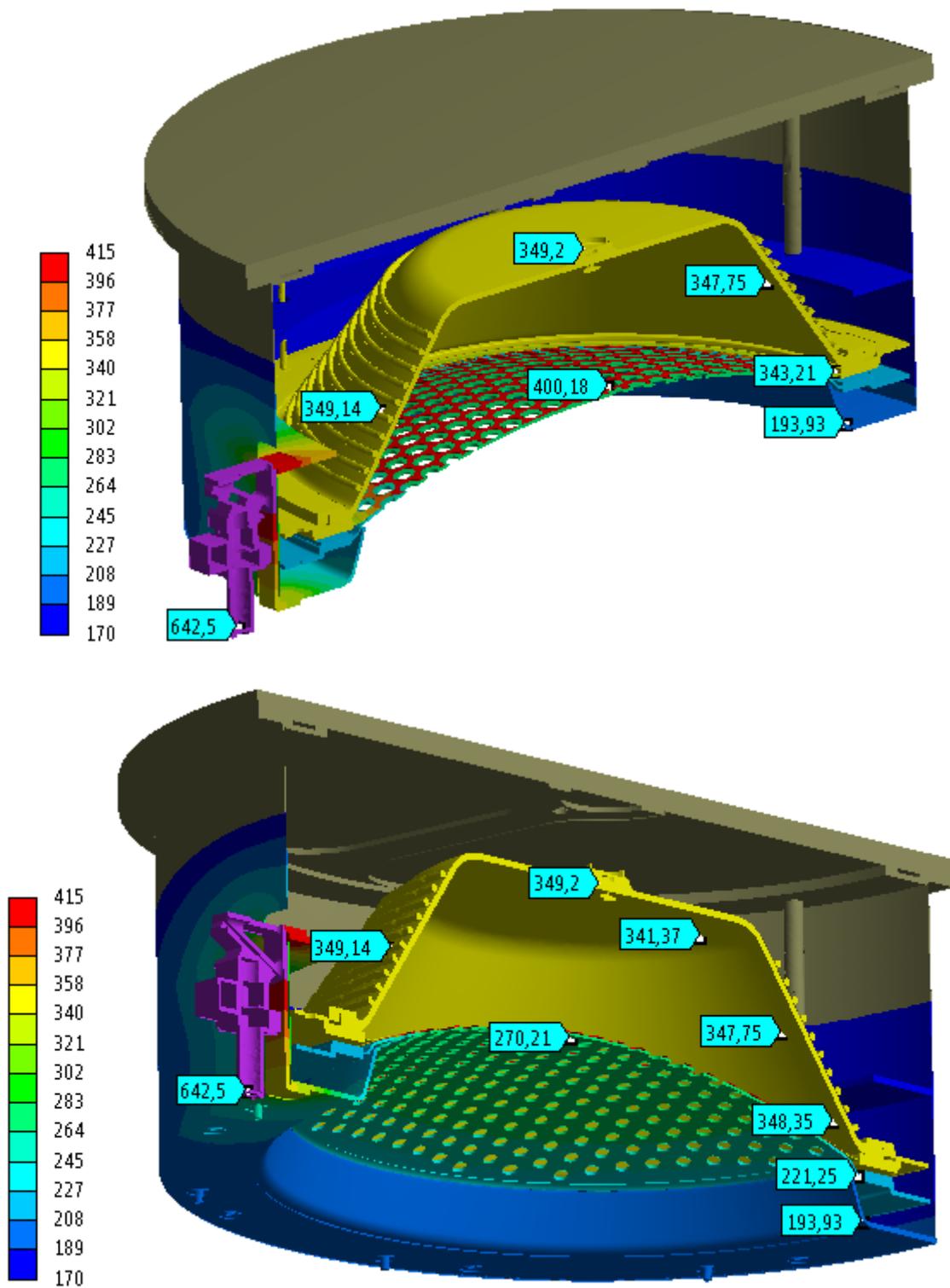


Рисунок 3.11 – Распределения температур (в °С) в ВЧИД- 49 М при $W_{ВЧ} = 2,4$ кВт и $I_0 = 6$ А

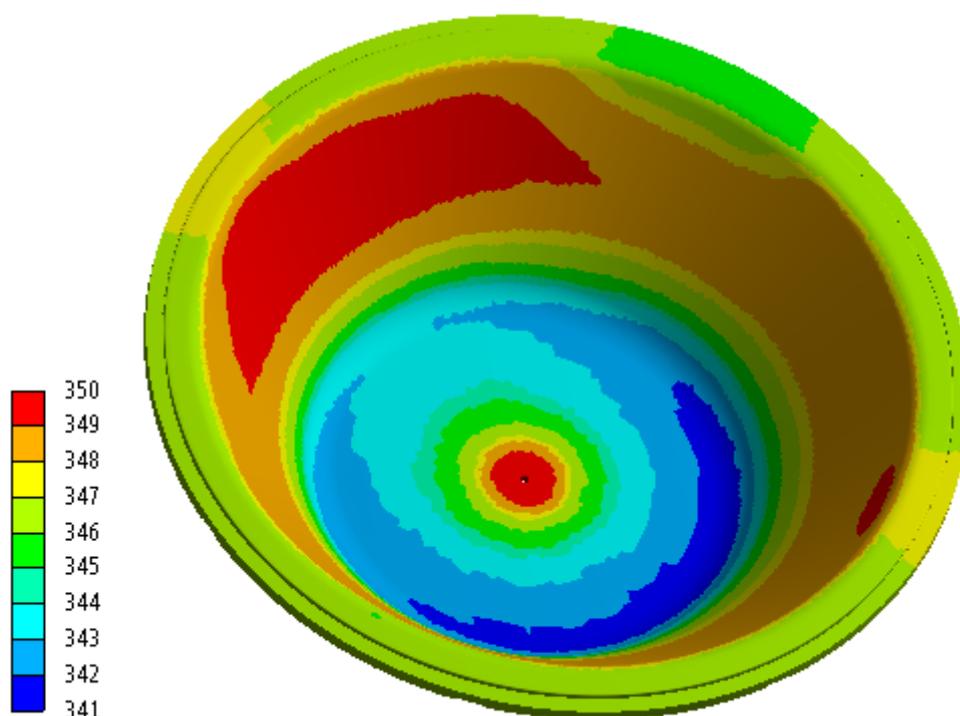


Рисунок 3.12 - Распределения температур (в °С) в ГРК ВЧИД - 49 М

Наиболее нагретым элементом конструкции является, как и следовало ожидать, катод – нейтрализатор с температурой 644 °С. Такой источник тепла незначительно влияет на общее распределение температур в двигателе, лишь на несколько градусов подогревая ГРК и силовой фланец. Это наглядно видно на рисунке 3.11, где вся шкала изменения температуры в ГРК составляет всего 9 °С. Чуть более нагретая область боковой поверхности корпуса ГРК находится вблизи от места крепления КН. Соответственно, противоположная ей область боковой поверхности корпуса ГРК холоднее на 9 °С. Локальное увеличение температуры в центре ГРК объясняется наличием в конструкции двигателя крепления газопровода к корпусу ГРК, что исключает лучистый сброс тепла с данного участка внешней поверхности ГРК. Нагрев катода – нейтрализатора не оказывает какого-либо влияния на электроды ИОС, распределение температур которых имеет осесимметричный характер.

Среди узлов конструкции, на которые выпадают тепловые потоки из плазмы разряда наиболее нагретой областью является аналогично ЛО ВЧИД – 16 центральная часть ЭЭ. В Таблице 3.8 изображены рассчитанные максимальные и минимальные значения различных элементов ВЧИД 49 – М при значениях ионного тока 6А.

Таблица 3.8 – Максимальные и минимальные температуры элементов ВЧИД- 49 М для $W_{ВЧ} = 2400$ Вт и $I_0 = 6$ А

Название элемента	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С
-------------------	-----------------------------	------------------------------

ГРК	340	350
ЭЭ	346	400
УЭ	221	270
индуктор	342	350
катод - нейтрализатор	430	644

3.2.4 Расчеты температур при $W_{ВЧ} = 2800 \text{ Вт}$

3.2.4.1 Входные тепловые потоки

Плотности входных тепловых потоков приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Плотности тепловых потоков на элементы ВЧИД- 49 М при $W_{ВЧ} = 2800 \text{ Вт}$ и значения тока пучка $I_0 = 7 \text{ А}$

	Элементы конструкции ВЧИД	Плотность теплового потока, Вт/м^2
1	ГРК	3836
2	ЭЭ, область перфорации	4481
3	ЭЭ, кольцевая область	4710
4	УЭ, от перезарядных ионов	231
5	УЭ, излучением из плазмы и от стенок ГРК	397
6	индуктор	30
7	катод - нейтрализатор	4889

3.2.4.2 Результаты расчета температур

Рассчитанные температурные распределения в ВЧИД - 49 М при $W_{ВЧ} = 2800 \text{ Вт}$ и $I_0 = 7 \text{ А}$ приведены на рисунке 3.13 и рисунке 3.14.

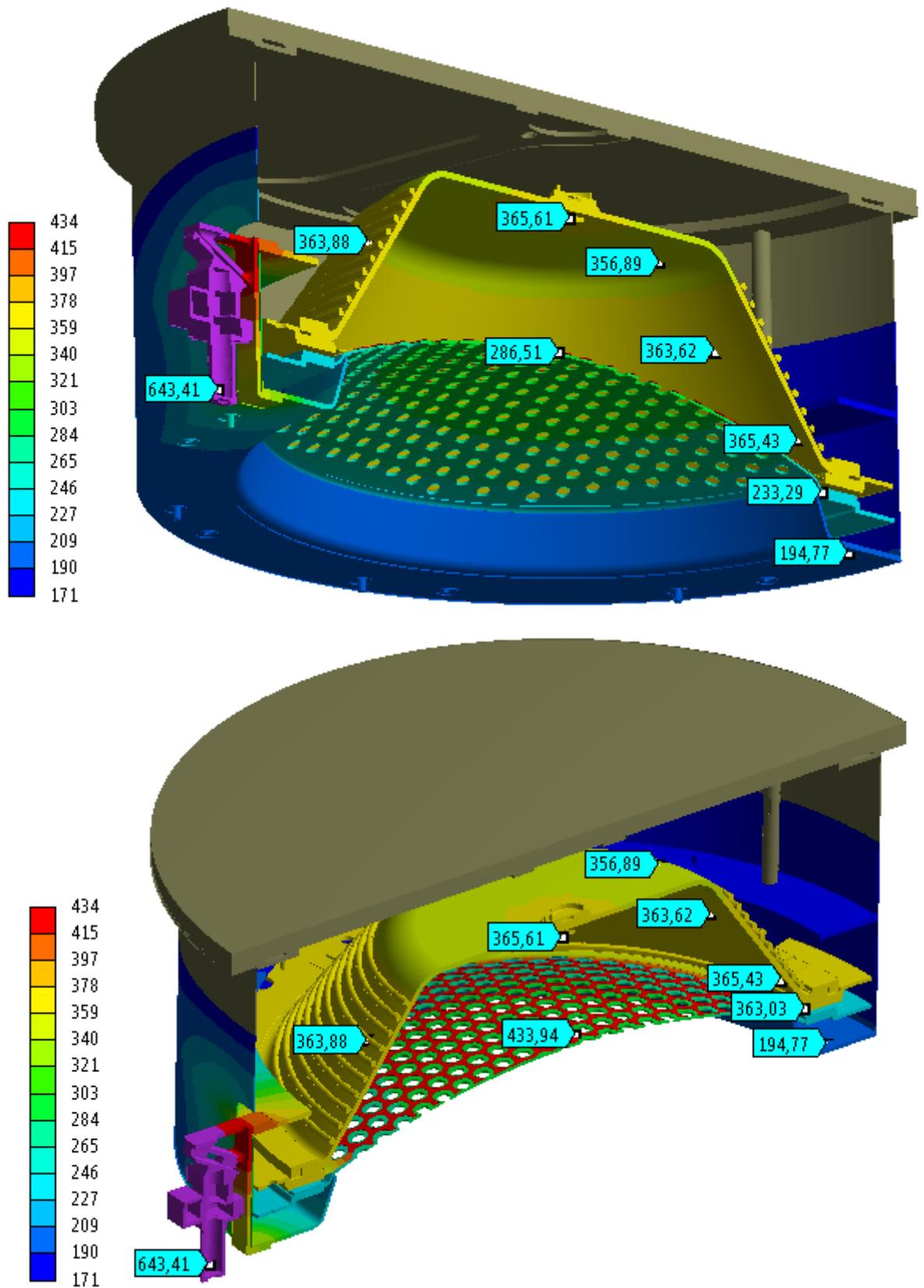


Рисунок 3.13 – Температурные поля ВЧИД - 49 М при $I_0 = 7A$

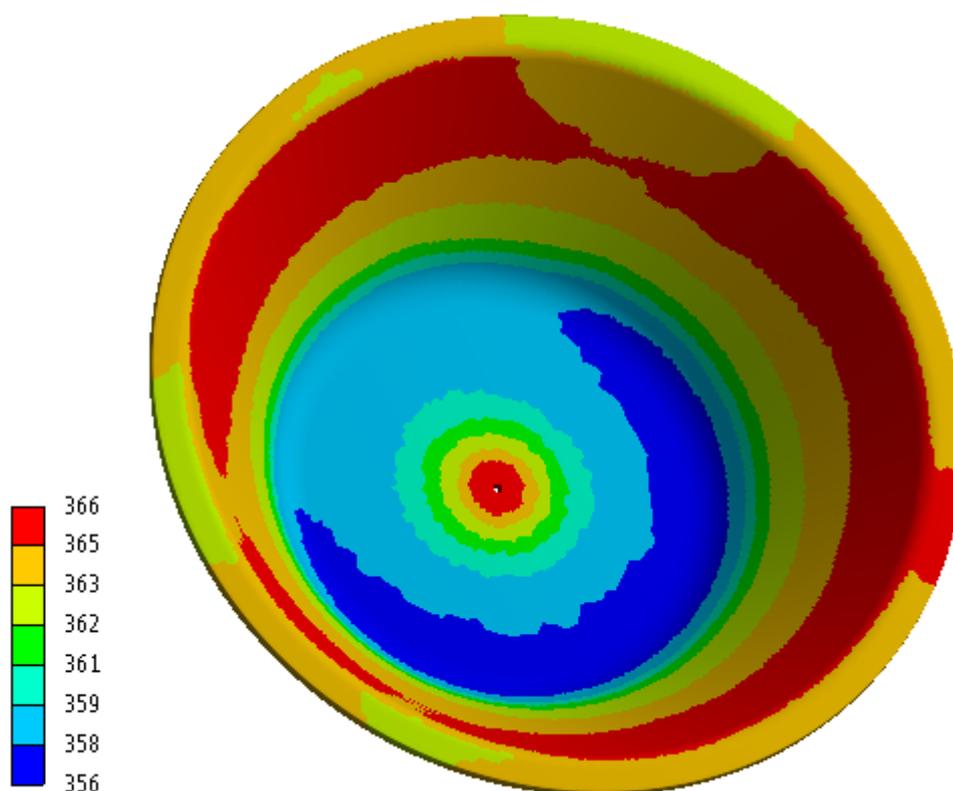


Рисунок 3.14 - Распределения температур (в °С) в ГРК ВЧИД - 49 М

Катод – нейтрализатор нагрет также как и в предыдущем расчете до той же температуры 644 °С. Очевидно, на нагрев КН не влияет увеличение ВЧ мощности, вводимой в плазму разряда. Также присутствует незначительные различия температур поверхностей ГРК в районе расположения КН и с противоположной стороны. Температуры различаются на 10 °С, см. Рисунок 3.14.

Наибольшее изменение температур при повышении ВЧ мощности отмечено для ЭЭ, температура которого в центральной части увеличилась немногим более, чем на 30 °С и на периферии чуть менее, чем на 20 °С. Температуры ускоряющего электрода увеличилась 11...17 °С. Соответственно температура корпуса ГРК увеличилась приблизительно на 15 °С по всей поверхности корпуса ГРК.

Температура центральной части ЭЭ превысила на этом режиме критические для используемого титанового сплава ВТ-14 значения в 400 °С.

В Таблице 3.10 приведены рассчитанные максимальные и минимальные значения различных элементов ВЧИД - 49 М при значениях $W_{ВЧ} = 2800$ Вт и $I_0 = 7$ А.

Таблица 3.10 – Максимальные и минимальные температуры элементов ВЧИД - 49 М для $W_{ВЧ} = 2800$ Вт и $I_0 = 7$ А

Название элемента	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С
ГРК	356	366
ЭЭ	364	434
УЭ	232	287
индуктор	358	366
катод - нейтрализатор	430	644

3.2.5 Профили температур на эмиссионном и ускоряющем электродах ИОС

Профили температур по радиусу электродов были рассчитаны из полученных температурных распределений, приведенных на рисунке 3.11 и рисунке 3.13. Профили температур ЭЭ и УЭ по радиусу для значений ВЧ мощности 2400 Вт и 2800 Вт приведены на рисунке 3.15.

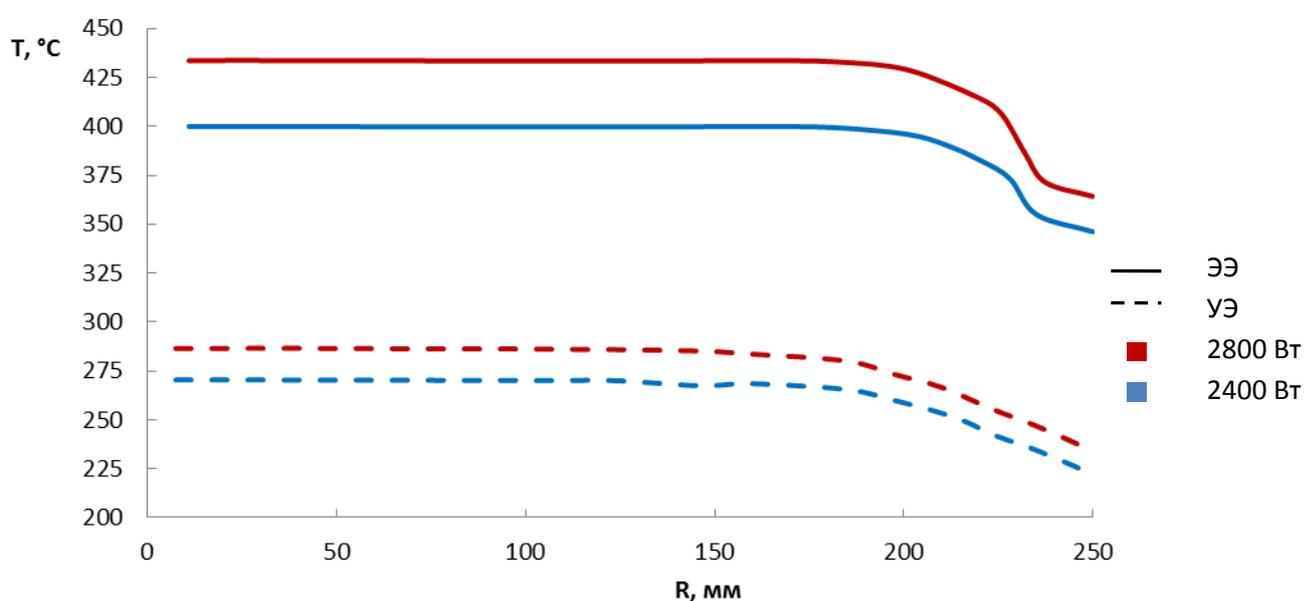


Рисунок 3.15 - Радиальные распределения температур ЭЭ и УЭ

Температуры электродов вплоть до примерно 0,8 от радиуса электродов почти постоянны и на периферии демонстрируют заметное уменьшение к краю электродов. Температура ЭЭ в достаточно узком диапазоне радиусов уменьшается примерно на 55°С при обеих мощностях. Температуры УЭ уменьшаются от центра к краю на 50 °С.

3.2.6 Заключение по тепловым расчетам ЛО ВЧИД – 16 и ВЧИД – 49 М

Проведенная серия температурных расчетов для ЛО ВЧИД – 16 и ВЧИД – 49 М показала, что использование сплава ВТ-14 и, тем более, ВТ1-0 в качестве материала эмиссионного электрода не позволяет рассматривать рабочие режимы соответствующих образцов двигателей при мощностях свыше 300 Вт для ЛО ВЧИД – 16 и 2400 для ВЧИД – 49 М. Это ограничение серьезно сказывается на эффективности двигателей. В качестве рекомендации следует предложить использование сплавов на основе молибдена и углеродных композитов, что отвечает мировому опыту и тенденциям.

Корпус ГРК нагрет приблизительно равномерно. В профиле УЭ и ЭЭ присутствует примерно равномерно нагретая центральная часть. Для ЭЭ вблизи периферии наблюдается резкое падение температуры. УЭ для ЛО ВЧИД – 16 нагрет практически равномерно, для большего двигателя ВЧИД – 49 на периферии появляется область уменьшения температур

Рассчитанные профили температур по радиусу для ЭЭ и УЭ были использованы в качестве начальных условий для решения термомеханической задачи устойчивости электродов [66].

Результаты данного исследования были представлены на международных конференциях [68, 69, 70, 71, 72, 73, 74]

3.3 Расчет температур в двигательной установке ВЧИД – ММ

Значительно более подробный тепловой расчет был выполнен для разрабатываемого в НИИ ПМЭ МАИ двигателя малой мощности ВЧИД – ММ с диаметром пучка 8 см, планируемого применения в составе КА. Расчеты проводились для конструкции двигательной установки [75], состоящей из двигательного блока с двумя катодами-нейтрализаторами, блока системы питания и управления (СПУ) с высокочастотным генератором (ВЧГ), размещенных на установочной платформе.

Конструкция ВЧИД ММ в расчетной модели была условно разделена на две отдельные области с границей их раздела, проходящей по теплоизолирующей пластине, см. Рисунок 3.16.

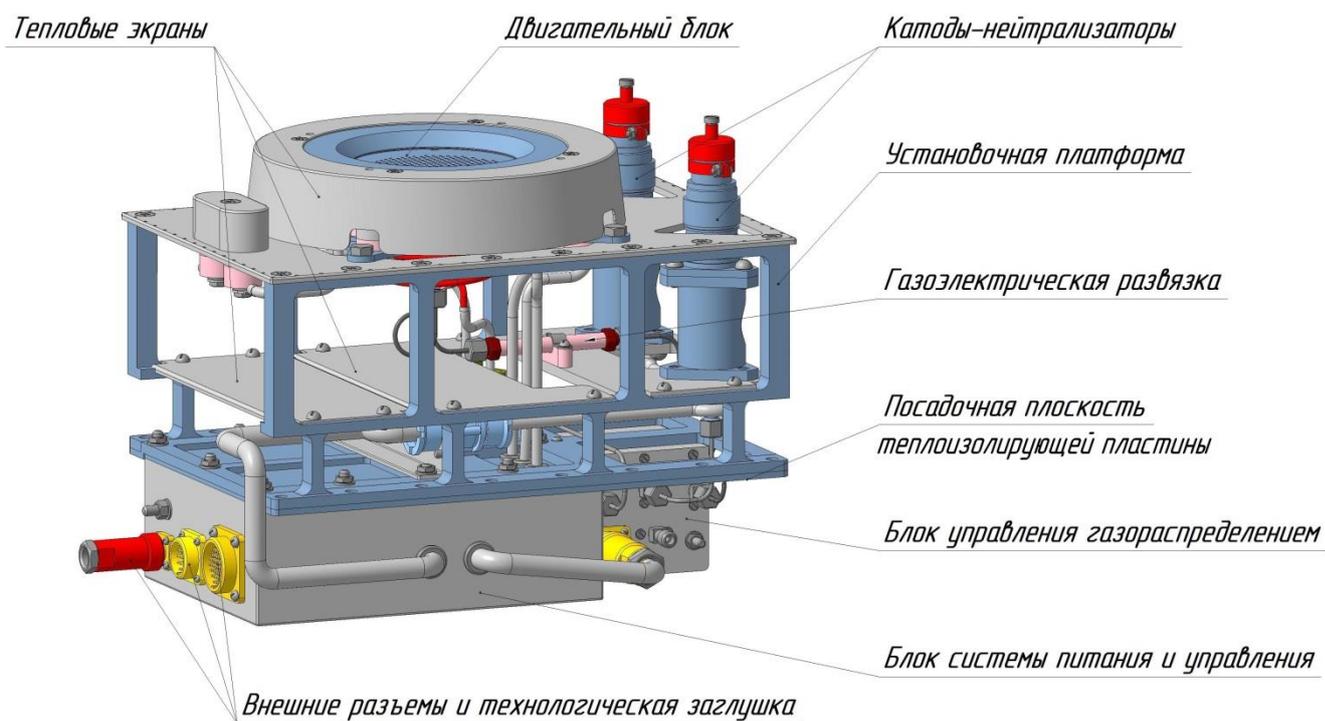


Рисунок 3.16 – Двигательная установка ВЧИД ММ [75]

Численные расчеты температур конструкции выполнялись отдельно для каждой из упомянутых областей, после чего результаты расчетов в двух областях объединялись.

3.3.1 Конструкция ВЧИД ММ

Внешний вид двигательной установки ВЧИД ММ представлен на рисунке 3.17. В её состав входят двигательный блок (ДБ), блок СПУ с ВЧГ, блок управления газораспределением, два катода-нейтрализатора, прямоугольная установочная платформа, экран двигательного блока, крышка двигательного блока (на рисунке не показана). Основные 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 космического аппарата. 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 до плюс 50 °С. Блок СПУ с ВЧГ и БУГР закреплены на раме нижнего уровня.

Двигательный блок установлен на раме установочной платформы верхнего уровня, которая ожидается, что будет заметно нагретой. По периметру верхней рамы имеются

отверстия для крепления матов экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ). Двигательный блок закрыт экраном, изготовленным из дюрэля.

Теплоотвод от «горячей» рамы верхнего уровня осуществляется излучением от верхней плоскости, не закрытой ЭВТИ, а также теплопроводностью по боковым панелям установочной платформы непосредственно 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 (экрану) крепятся катоды-нейтрализаторы, элементы газовой арматуры и элементы коммутации электрических цепей.

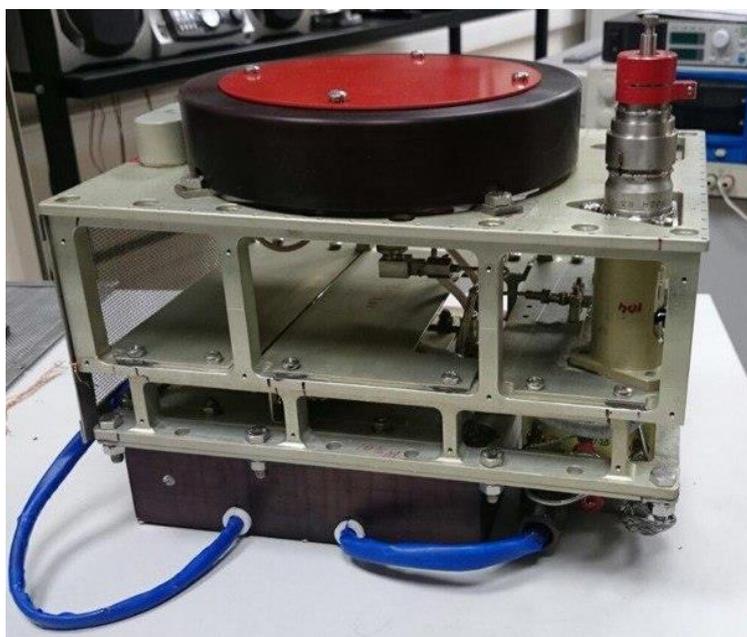


Рисунок 3.17 – Фотография опытного образца ВЧИД – ММ

3.3.2 Технические характеристики ВЧИД-ММ

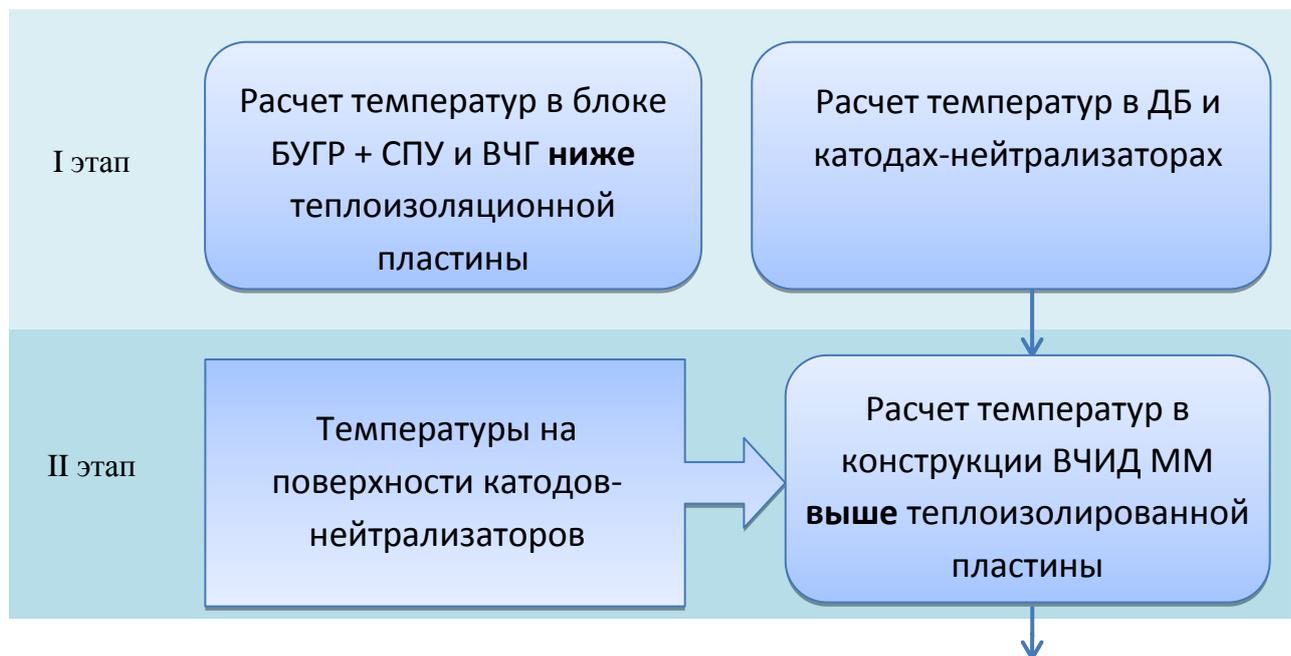
Газоразрядная камера (ГРК) и межэлектродные изоляторы выполнены из керамики (электротехнический корунд) ВК-94-1 аЯ 0.027.002 ТУ (свойства материала ВК94-1 приведены в Приложении). Эмиссионный электрод выполнен из молибдена МЧ ТУ 48-19-472-90 (содержание Мо 99,96%). Ускоряющий электрод выполнен из титанового сплава ВТ1-0 ГОСТ 19807-91 (состав Ti ~ 99%, Al ~ 1%). Толщина электродов эмиссионного – $0,3 \pm 0,05$ мм, ускоряющего – $1,5 \pm 0,05$ мм. Материал держателей электродов - титановый сплав ВТ1-0 ГОСТ 19807-91.

Основные характеристики двигателя следующие:

Потенциал эмиссионного электрода	2000 В
Потенциал ускоряющего электрода	-220 В
Полная мощность, потребляемая двигателем от блока СПУ с ВЧГ	300 Вт,
в том числе:	
Мощность, потребляемая катодом-нейтрализатором	10 Вт
Мощность, потребляемая блоком управления газораспределением	3 Вт
Мощность, подаваемая от ВЧГ на индуктор	47,1 Вт
КПД блока СПУ и ВЧГ	0,93
Ток ионного пучка	120 мА
Плотность тока на поверхности плазменного мениска	70 А/м ²
Полный КПД двигателя	0,532
Суммарная тепловая мощность, выделяемая в СПУ, составляла 66,5 Вт.	

3.3.3 Общая схема теплового моделирования

Тепловое моделирование для конструкции ВЧИД ММ, изображенной на рисунке 3.16, выполнено в три этапа. Для наглядности схема проведенных расчетов изображена на рисунке 3.18.



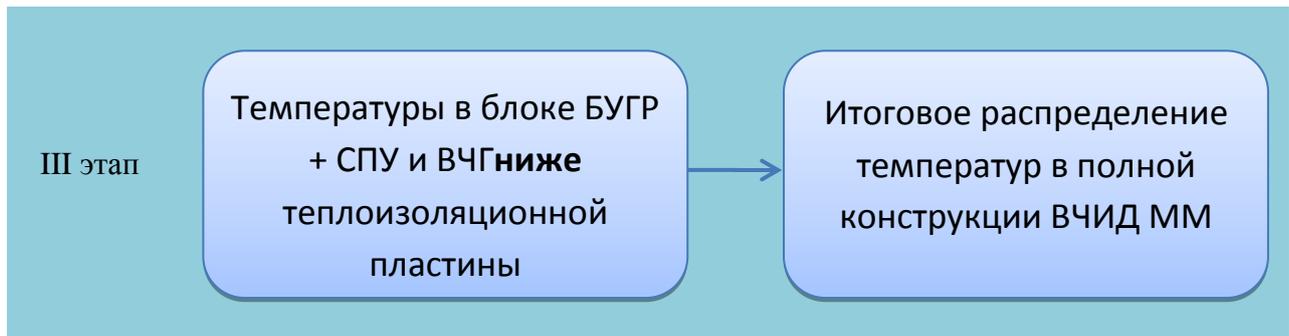


Рисунок 3.18 - Схема проведения тепловых расчетов

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 численные расчеты температур в узлах конструкции ВЧИД ММ выше теплоизолированной пластины, исключая тепловыделяющие части конструкции 1), 3). При этом, рассчитанные на первом этапе распределения температур поверхностей тепловыделяющих частей 1), 3) конструкции задавались в качестве неизменных в начале соответствующего счета, т.е. также использовались в расчетах в качестве граничных условий. Это позволило исключить из счета все внутренние элементы тепловыделяющих частей и оставить в счете только те элементы сетки их разбиения, которые расположены на их **внешних** поверхностях и поэтому определяют тепловые потоки на окружающие элементы конструкции ВЧИД ММ.

Внешней поверхностью части 1) являются внешние поверхности катодов–нейтрализаторов.

Внешняя поверхность двигательной части 3) состоит из внешней поверхности ГРК, индуктора и теплового экрана. Отметим, что верхнюю часть ДБ, а именно, электроды ИОС и силовое кольцо можно не рассматривать в окончательном расчете, т.к. лучистые потоки тепла с их поверхностей будут направлены в стороны, где нет каких-либо элементов конструкции ВЧИД ММ и поэтому они не влияют на тепловой баланс каких-либо узлов конструкции 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 в ВЧИД ММ при приемлемом объеме компьютерных затрат.

Были проведены две серии расчетов температур в узлах конструкции ВЧИД ММ при температурах теплоизолирующей пластины, равных $+50^{\circ}\text{C}$ и -20°C .

Ниже приводятся подробные описания методики проведения расчетов температур в узлах конструкции ВЧИД ММ.

3.3.4 Расчет температур в отдельных частях конструкции

Расчеты температур катодов – нейтрализаторов и БУГРа были проведены ранее в ИЦ им. М.В. Келдыша [76]. Температуры катодов-нейтрализаторов в расчете составила $T_{\text{КН}} = 220^{\circ}\text{C}$. Рассчитанные температуры на поверхностях катодов – нейтрализаторов и БУГРа задавались в начале последующих расчетов в качестве граничных условий, т.е. оставались неизменными.

3.3.4.1 Методика и результаты расчета температур в блоке БУГР и СПУ с ВЧГ

Расчетная модель блока БУГР и СПУ с ВЧГ была использована в счете в упрощенном виде, см. рисунок 3.19. БУГР и блок СПУ с ВЧГ заменялись полыми коробками. Таким образом, модель состояла из коробки блока СПУ с ВЧГ, коробки, имитирующей БУГР, жгута БУГР и теплоизолирующей пластины, закрепленной на посадочной поверхности.

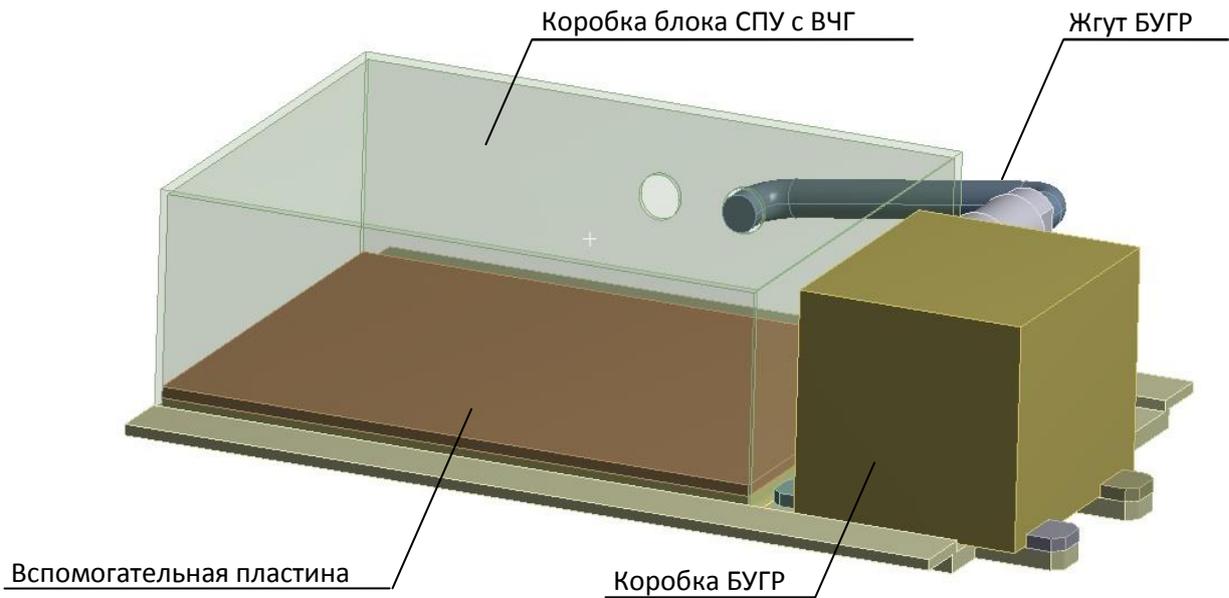
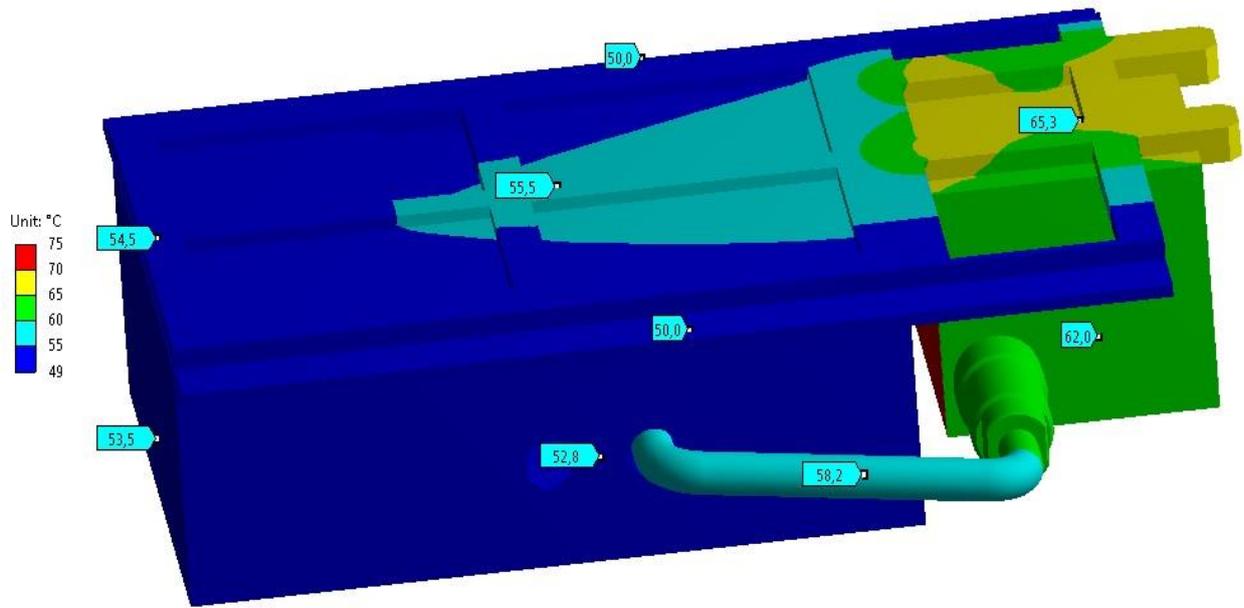


Рисунок 3.19 - Расчетная модель блока БУГР и СПУ с ВЧГ

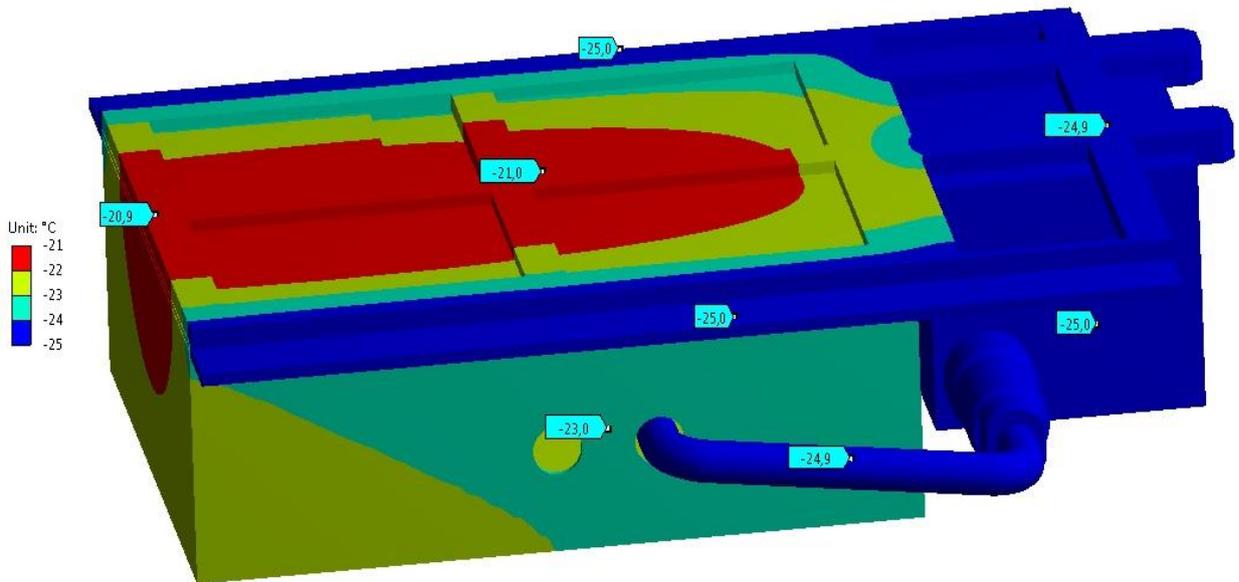
Тепловыделение в коробке блока СПУ с ВЧГ моделировалось с использованием вспомогательной пластины толщиной 3мм, прикрепленной к теплоизолирующей пластине внутри коробки. Тепловыделение из вспомогательной пластины устанавливалось равномерным по ее объему с суммарной мощностью 66.4 Вт, равной расчетной мощности, выделяемой в блоке СПУ с ВЧГ и приведенной в [77].

Другим тепловыделяющим элементом в этой модели является поверхность коробки БУГРа с заданными и неизменными в счете температурами на ее поверхности, определенные в [76].

Результаты расчетов температур приведены на рисунке 3.20.



А



Б

Рисунок 3.20 – Расчетные температуры в блоке БУГР и СПУ с ВЧГ при температуре посадочной поверхности, равной -25°C – А) и $+50^{\circ}\text{C}$ – Б)

Как видно из Рисунка 3.19, температура теплоизолирующей пластины, выполняющую в ВЧИД ММ важную роль теплоизоляции электронных блоков систем управления и питания от горячего двигательного блока, определяется в значительной степени температурой посадочной поверхности. Подогрев тепловой мощностью, поступающей из блоков СПУ с ВЧГ и БУГРа, изменяет ее температуру менее чем на 6°K .

3.3.4.2 Методика и результаты расчета температур в двигательном блоке

3.3.4.2.1 Граничные условия

Полученные в результате счета численные значения температур внешних поверхностей катодов-нейтрализаторов, БУГР и коробки блока СПУ задавались в качестве граничных условий при расчете температур в двигательном блоке, поскольку тепловые потоки от этих поверхностей попадают на поверхности ДБ. Также задавались температуры посадочной плоскости. Расчеты были проведены также для двух значений температур посадочной плоскости – плюс 50°С и минус 25 °С. Рассчитывались температуры в двух вариантах конструкции: с защитным экраном и без него. Для того, что бы определить степень влияния наличия или отсутствия экрана на температуры в ДБ.

На поверхностях элементов узлов конструкции, граничащих с плазмой, также как и для ЛО ВЧИД – 16 и ВЧИД – 49 М задавались граничные условия 2-го рода, т.е. устанавливались численные значения плотностей тепловых потоков, выпадающих из плазмы разряда.

3.3.4.2.2 Начальные условия

Начальные температуры элементов в ДБ ВЧИД - ММ, за исключением элементов с заданными граничными условиями (см. п. 1.2.4), задавались равными либо -25°С, либо +50°С, в зависимости от того, для какой температуры термостатирования двигателя ВЧИД ММ проводился расчет.

3.3.4.2.3 Входные потоки

Тепловые потоки, поступающие из плазмы разряда на поверхности, окружающие разряд, а также выделяемые на поверхности индуктора определялись по методикам, аналогичным изложенным для ЛО ВЧИД – 16 и ВЧИД – 49 М. Внешние тепловые потоки

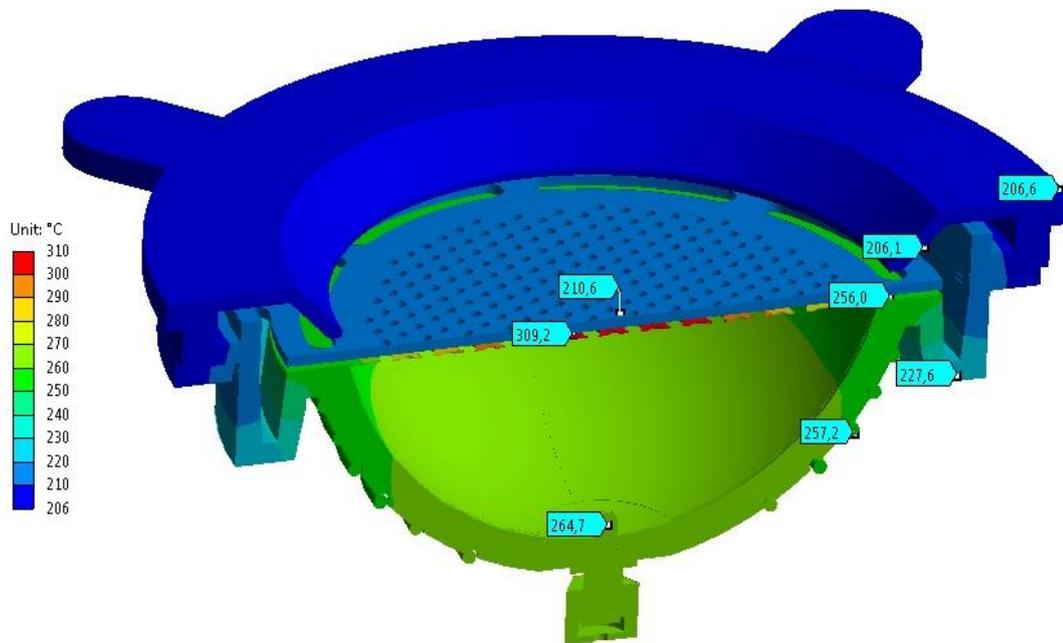
одинаковы как в расчетах для модели с защитным экраном, так и без него. Численные значения потоков приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Плотности тепловых потоков на элементы ДБ ВЧИД ММ при $W_{ВЧ} = 46$ Вт и значения тока пучка $I_0 = 0,12$ А

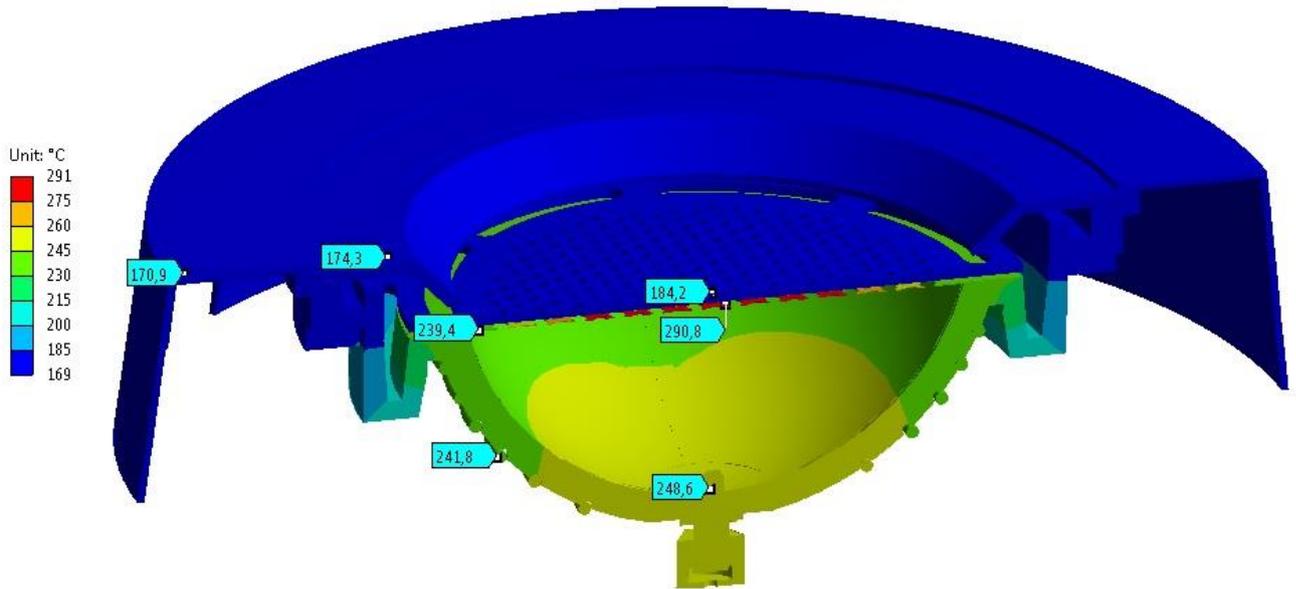
	Элементы конструкции ВЧИД	Плотность теплового потока, Вт/м ²
1	ГРК	3919
2	ЭЭ, область перфорации	4151
3	ЭЭ, кольцевая область	4384
4	УЭ, от перезарядных ионов	74
5	УЭ, излучением из плазмы и от стенок ГРК	598
6	индуктор	13,5

3.3.4.2.4 Результаты расчета температур в двигательном блоке

Результаты расчетов температур в ДБ без экрана и с экраном при температуре теплоизолированной пластины, равной +50°C приведены на Рисунке 3.21.



А



Б

Рисунок 3.21 Температуры в ДБ без теплового экрана – А и с тепловым экраном – Б при температуре теплоизолированной пластины +50 °С

Отметим неожиданный результат, состоящий в уменьшении уровня температур в ДБ примерно на 20 °С и выше практически во всех узлах ДБ при использовании в расчетном моделировании теплоизолирующего экрана. Этот результат фактически численного эксперимента объясняется теплопроводным оттоком тепла на экран через крепления его к силовому кольцу силового кольца ДБ. Этот поток оказался выше обратного лучистого потока от внутренней поверхности экрана на ГРК и другие узлы двигательного блока, что и привело к общему понижению температур в ДБ.

На Рисунке 3.22 представлены результаты расчетов температур в ДБ с тепловым экраном при температуре теплоизолированной пластины, равной -25 °С. Как видно из Рисунков 3.21 и 3.22 общее снижение температур составило 10...13 К.

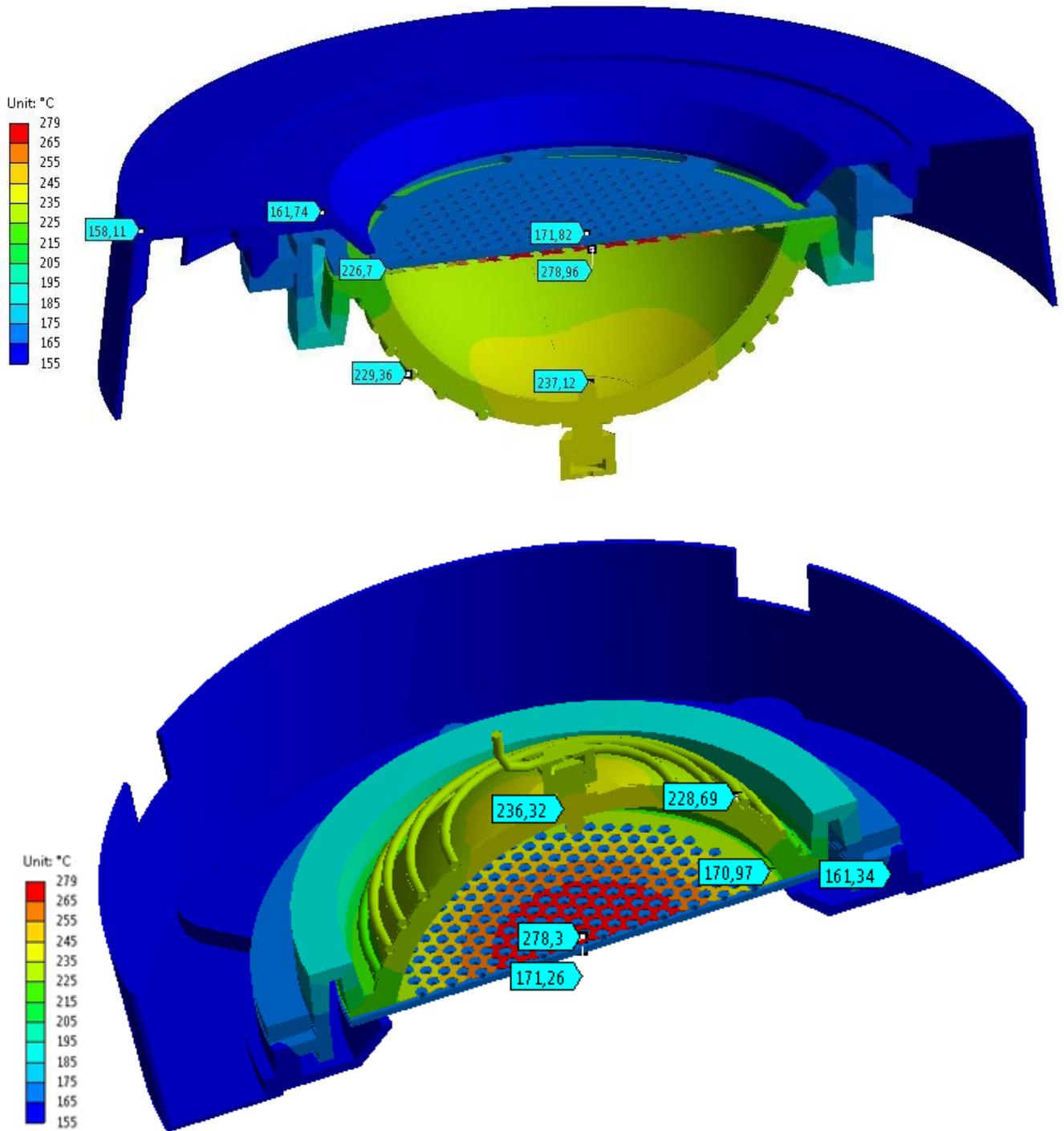


Рисунок 3.22 – Температуры в ДБ с тепловым экраном при температуре теплоизолированной пластины $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.3.4.3 Методика и результаты расчетов в верхней части конструкции ВЧИД ММ

На втором этапе моделирования расчет температур выполнен для части конструкции ВЧИД ММ, расположенной выше теплоизолирующей пластины и изображенной на рисунке 3.23.

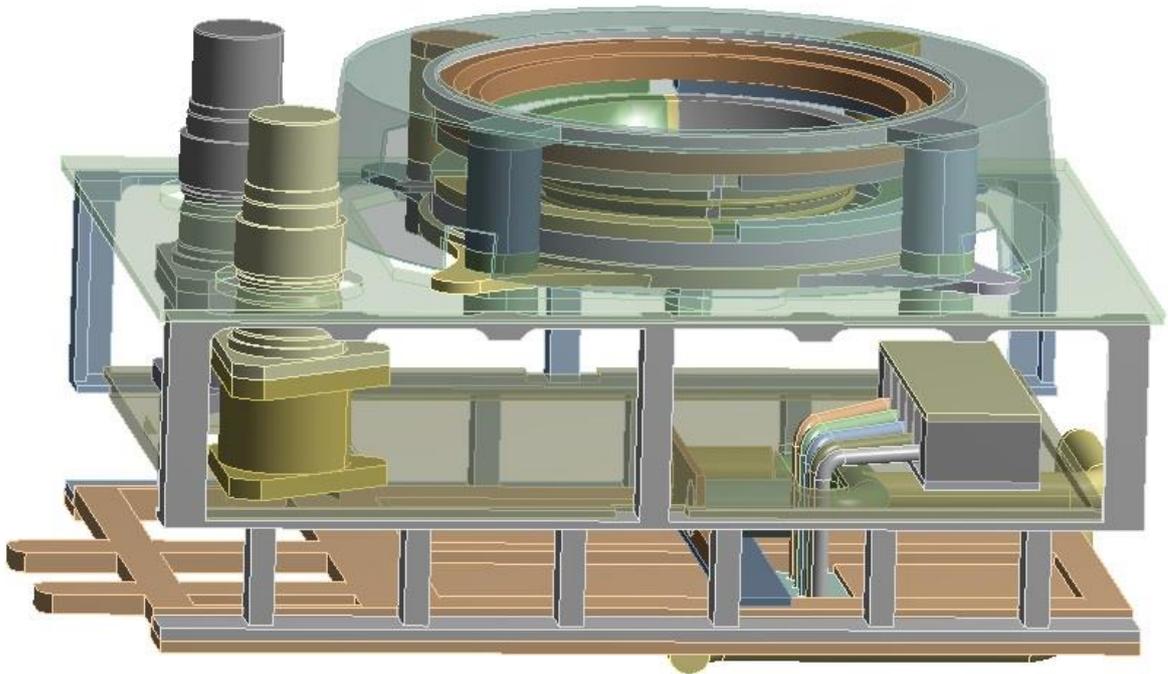
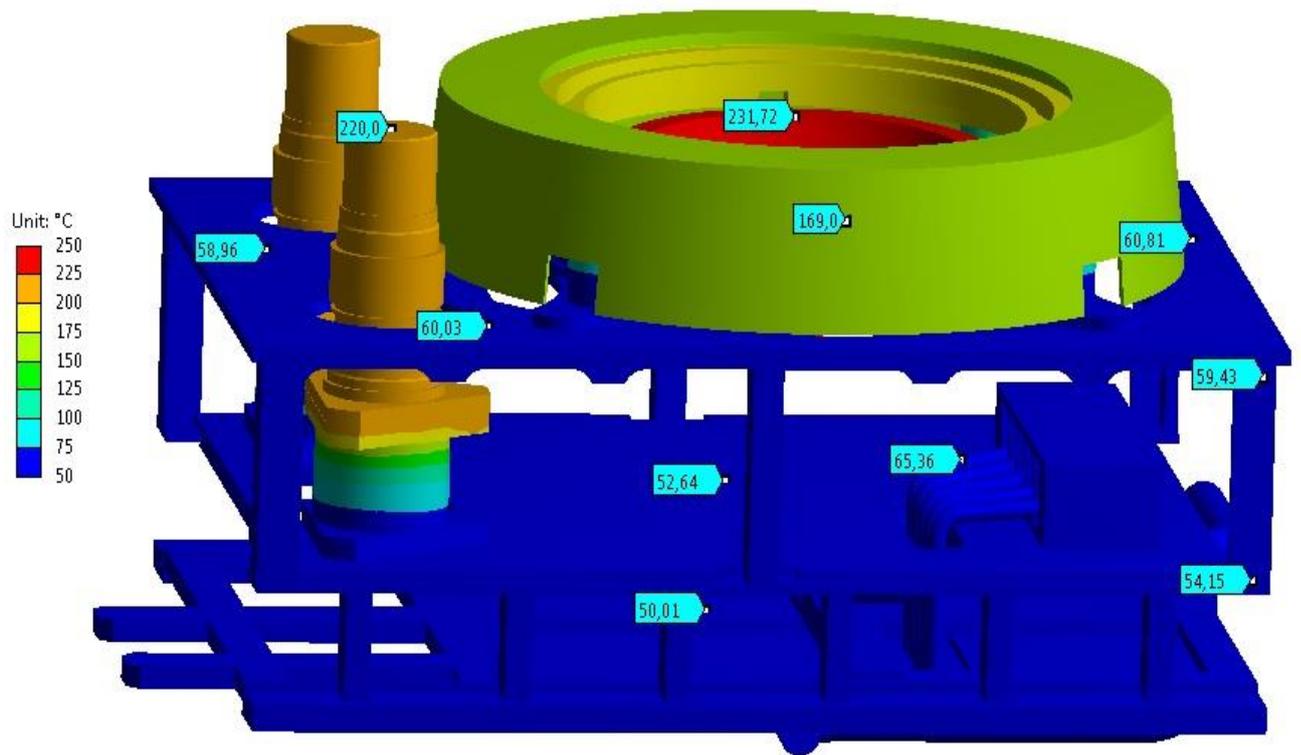
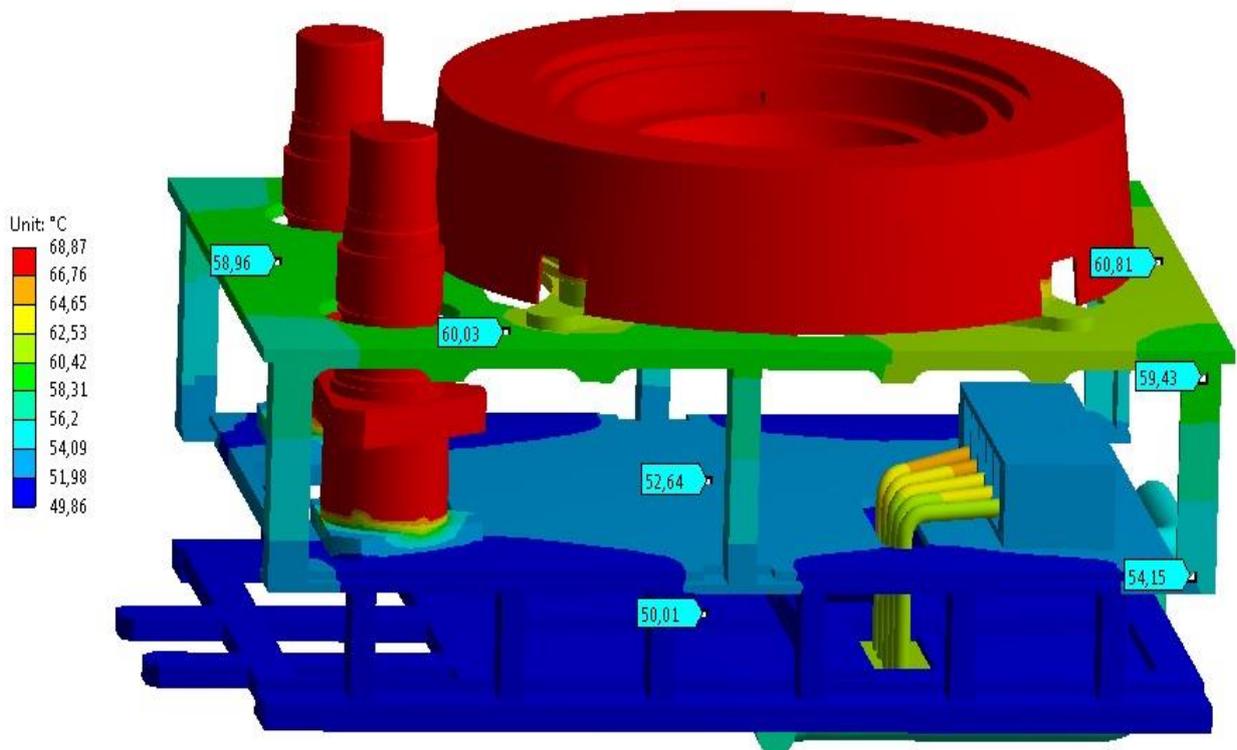


Рисунок 3.23 - Расчетная модель верхней части конструкции ВЧИД ММ

В качестве граничных условий для расчета задавались температуры на поверхности корпусов катодов-нейтрализаторов и температуры на поверхности экрана двигательного блока, рассчитанные на I этапе моделирования. Указанные температуры не изменялись в расчетах. Результаты расчетов температур в верхней части конструкции ВЧИД ММ приведены на Рисунке 3.23 и 3.24 для двух температур посадочных поверхностей ВЧИД ММ, а именно $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для наглядности в Рисунках использованы грубая и тонкая шкалы температур.



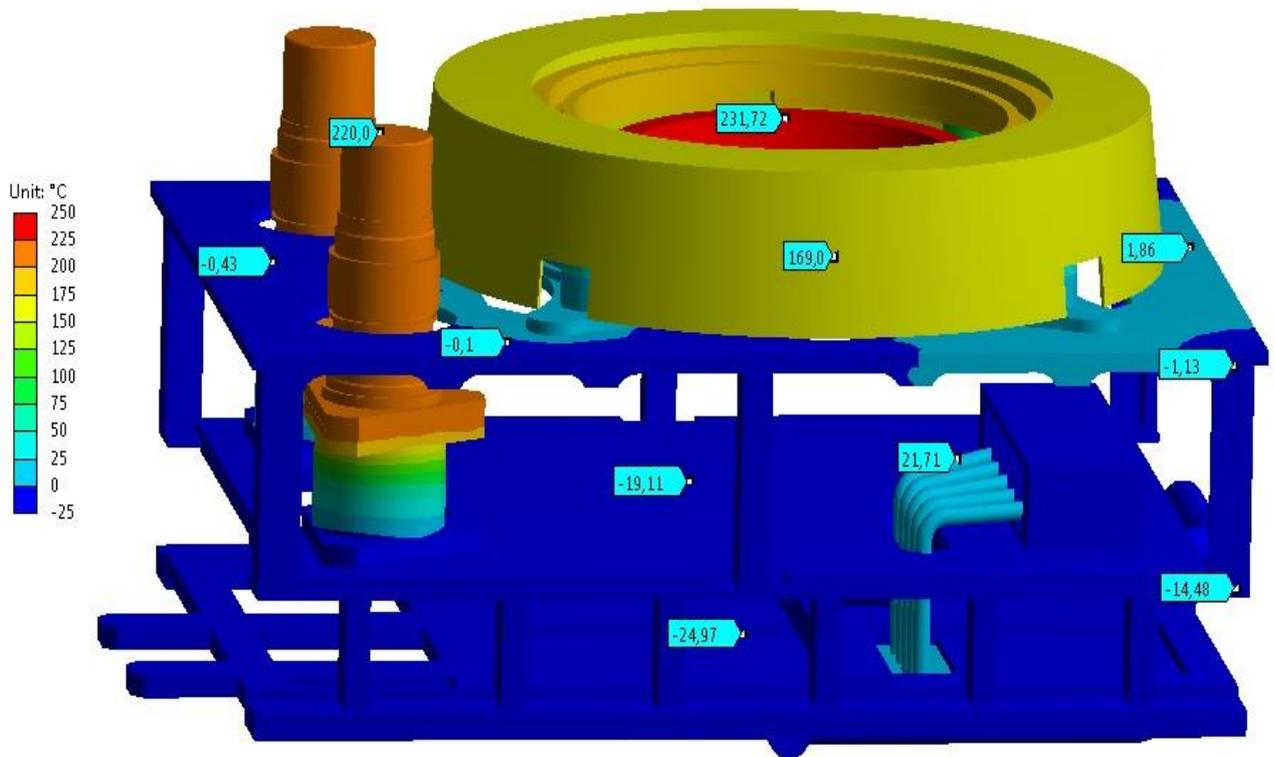
А



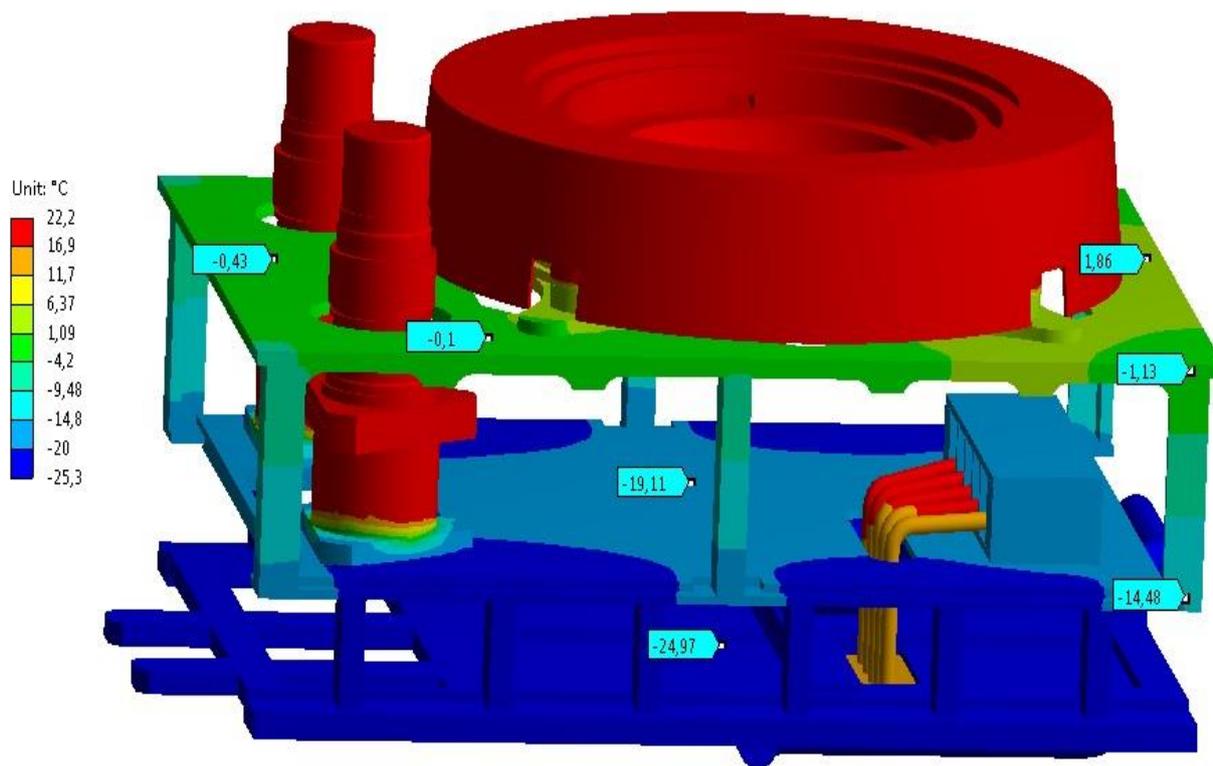
Б

Рисунок 3.24 - Расчетные температуры в верхней части конструкции ВЧИД ММ при температуре посадочной поверхности, равной $+50^{\circ}\text{C}$ для грубой – А и тонкой шкалы температур – Б

На Рисунке 3.23 Б все узлы, нагретые до температур свыше максимальной температуры шкалы 66,76 °С и те же узлы на Рисунке 3.24 Б, нагретые до температур свыше 22,2 °С изображены красным цветом. Применение тонкой шкалы температур позволяет отобразить более детально температурные распределения.



A



Б

Рисунок 3.25 - Расчетные температуры в верхней части 1) конструкции ВЧИД ММ при температуре посадочной поверхности, равной -25°C для грубой – А и тонкой шкалы температур – Б

Как видно из Рисунков 3.24 А и 3.25 А, температуры тепловыделяющих элементов в части 1) конструкции ВЧИД ММ совершенно не изменяются в зависимости от температур посадочных поверхностей ВЧИД ММ во всем диапазоне используемых температур от -25°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Дюралевые рамы верхнего и второго уровня подогреваются на 10°K и 3°K при ВЧИД ММ, равных $+50^{\circ}\text{C}$. При температуре посадочных поверхностей, равной -25°C , температуры посадочных поверхностей составляют примерно 0°C и -19°C .

Что касается теплоизолирующей пластины, то следует отметить, что дополнительный нагрев от двигательного блока повысил ее температуру менее, чем на 1 К, по сравнению с температурами посадочных поверхностей ВЧИД ММ, см. Рисунки 3.23 Б и 3.24 Б. В значительной мере это является следствием использования в конструкции ВЧИД ММ промежуточной рамы, выполняющей функцию теплового экрана между двигательным блоком и блоком СПУ. Температура ее поверхности превысила температуру посадочных поверхностей также менее чем на 6 К, несмотря на то, что на нее падает излучение от заметно нагретых ГРК, теплового экрана ДБ и катодов-нейтрализаторов. Такое маленькое увеличение температуры

может быть объяснено малым значением $\varepsilon = 0,2$ степени черноты дюрала, из которой изготовлена промежуточная рама. При таком значении 80% лучистого потока от тепловыделяющих ГРК и катодов-нейтрализаторов отражаются от поверхности рамы. Поглощенная рамой часть лучистого потока тепла в большей части стекает через боковые панели теплопроводным путем и в значительно меньшей части высвечивается в окружающее пространство.

3.3.5 Температуры узлов в общей конструкции ВЧИД ММ

Расчеты, выполненные на втором этапе отдельного моделирования, выявили преимущественное влияние тепловых потоков, идущих на теплоизолирующую пластину со стороны блоков БУГР + СПУ с ВЧГ, на температуру пластины. Под действием этих тепловых потоков температура теплоизолирующей пластины – элемента конструкции, разделяющего две расчетные области – увеличивается примерно на 5°K , относительно температуры посадочной поверхности. Потоки тепла от наиболее нагретых в конструкции ВЧИД ММ двигательного блока и катодов-нейтрализаторов увеличивают температуру теплоизолирующей пластины менее, чем на 1°K . Такое относительно небольшое изменение температуры теплоизолирующей пластины относительно уровня температуры посадочных поверхностей ВЧИД ММ является весомым аргументом в пользу первоначальной стратегии проведения отдельных расчетов **ниже** и **выше** теплоизолирующей пластины.

Температурные распределения, рассчитанные для нижней и верхней части конструкции, и приведенные на Рисунках 3.24 и 3.25 объединены в единые температурные распределения и изображены на Рисунках 3.26 и 3.27 для температур посадочных поверхностей ВЧИД ММ, равных -25°C и $+50^{\circ}\text{C}$ соответственно. При объединении расчетов для температур на поверхности теплоизолирующей пластины были взяты результаты численных расчетов, выполненных для нижней части конструкции ВЧИД ММ.

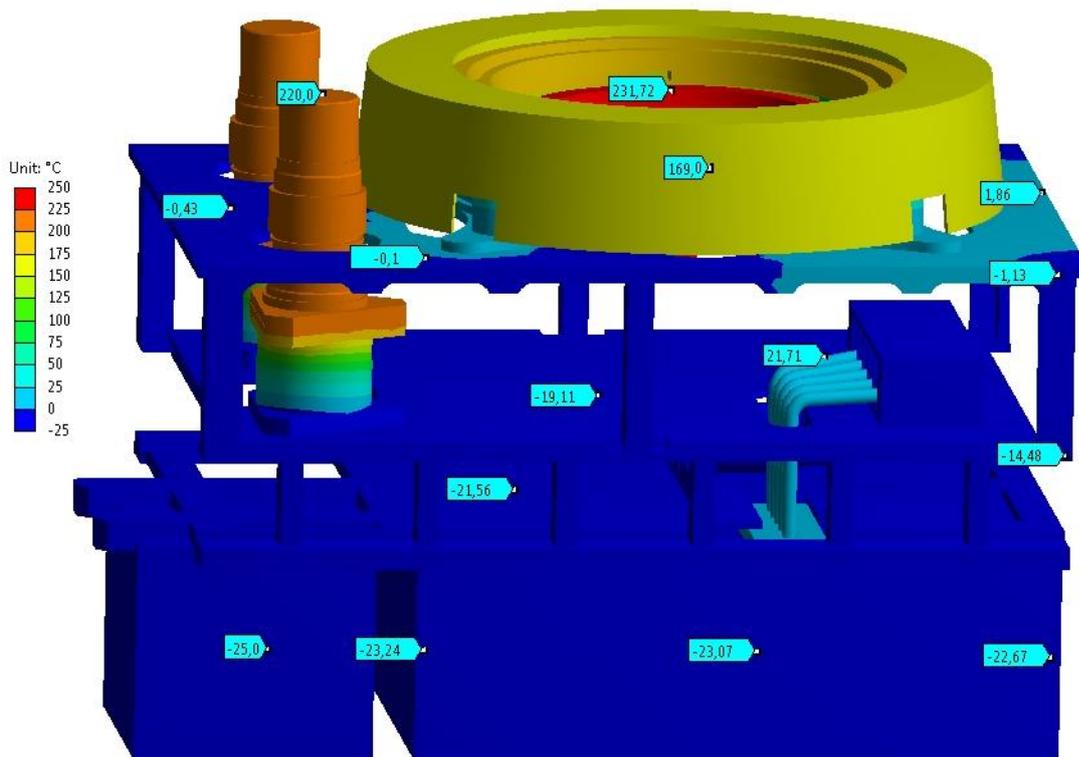


Рисунок 3.26 - Расчетные температуры в конструкции ВЧИД ММ при температуре посадочной поверхности, равной -25°C

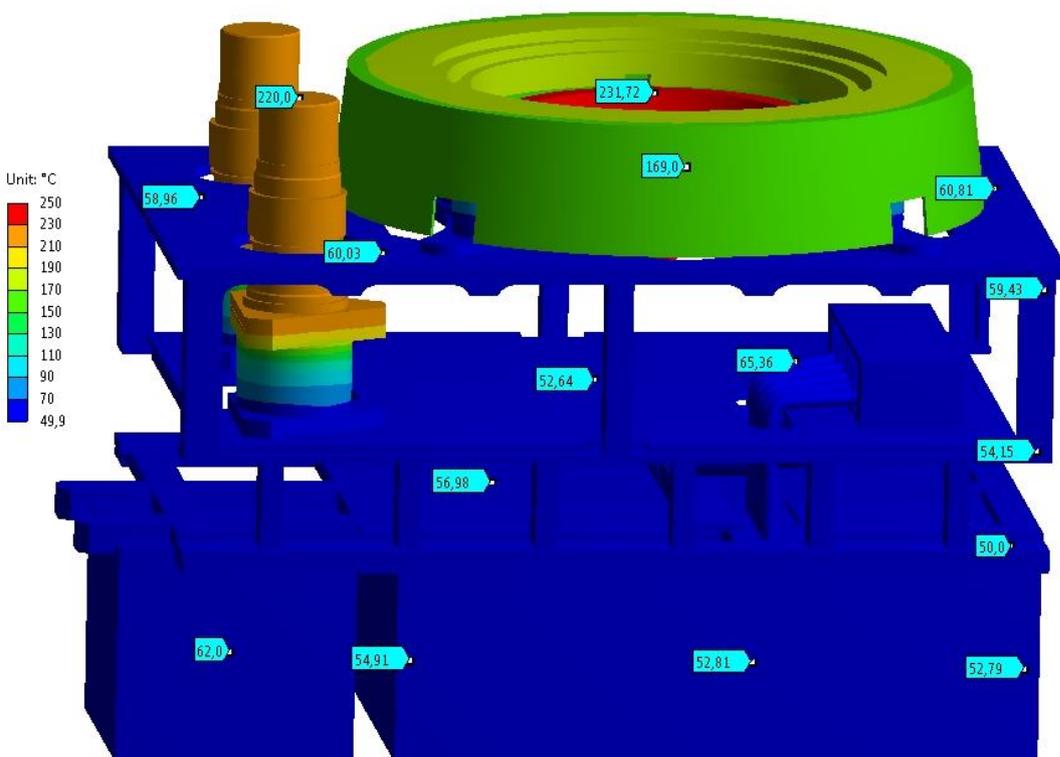


Рисунок 3.27 - Расчетные температуры в конструкции ВЧИД ММ при температуре посадочной поверхности, равной $+50^{\circ}\text{C}$

3.3.6 Выводы по тепловым расчетам ВЧИД – ММ

На данной стадии разработки конструкции двигательной установки ВЧИД ММ проведено расчетное моделирование тепловых процессов, протекающих при ее работе на номинальном режиме. Разработана численная модель расчета температур в узлах конструкции ВЧИД ММ, в которой применен принцип отдельного моделирования в частях конструкции ВЧИД ММ. Сопряжение результатов расчетов температур элементов в общей конструкции ВЧИД ММ выполнено по теплоизолирующей пластине, температурное состояние которой определяется температурами посадочных поверхностей ВЧИД ММ, и отличается от них менее, чем на $5...6^{\circ}\text{K}$.

Рассчитаны и представлены температуры элементов конструкции ВЧИД ММ на номинальном режиме при температурах посадочных поверхностей ВЧИД ММ, равных -25°C и $+50^{\circ}\text{C}$.

Проведенная серия отдельных расчетов температур узлов конструкции ВЧИД ММ позволяет утверждать, что использование предлагаемой конструкции двигателя 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.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБРАЗЦАХ ВЧИД, СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В ходе выполнения диссертационной работы были проведены расчетно–теоретические и экспериментальные исследования высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) различной размерности (малой мощности (ММ), средней мощности (СМ), большой мощности (БМ)).

В экспериментальных исследованиях режим работы двигателя задается техническими требованиями к объекту исследования. Сравнение расчетных и экспериментальных температурных распределений должно производиться при одинаковых значениях ионного тока.

4.1 Методика исследования температурных полей в ВЧИД

Экспериментальное исследование температурных полей проводилось для образцов двигательного блока на основе двигателя ВЧИД-8 (ДБ ВЧИМД ММ) и лабораторного образца (ЛО) ВЧИД-16.

Измерения температур в двигателях проводились при помощи тепловизора FLIR SC645 [78]. Тепловизор измеряет тепловой поток, падающий на микроболометрическую матрицу с объекта в поле зрения и позволяет получить распределение температуры в поле, спроектированном оптикой тепловизора на болометрическую матрицу.

Использование тепловизора имеет свою специфику, которую необходимо учитывать при разработке методики температурных измерений с учетом условий эксперимента. Излучение, измеряемое тепловизионной камерой, исходит от трех различных источников. Камера принимает собственное излучение исследуемого объекта, отраженное от его поверхности и излучение окружающей среды, поскольку атмосфера поглощает часть излучения и у нее также появляется собственное излучение как третья составляющая измеряемого потока. Первые две компоненты излучения ослабляются при прохождении сквозь атмосферу. При измерении тепловых потоков в программном обеспечении ThermoCAM Research тепловизора FLIRSC645 предусмотрена возможность учета всех составляющих излучения.

Такая возможность демонстрируется изображенном на Рисунке 4.1 диалоговом окне программы ThermaCAM Research.

Рисунок 4.1 - Диалоговое окно программы ThermaCAM Research для установки необходимых параметров

При тепловизионных измерениях вводятся значения степени черноты измеряемого объекта, расстояния до него и температура окружающих объектов, с которых также поступает на приемник тепловизора отраженное от исследуемого объекта тепловое излучение. Также необходимо ввести параметры оптических элементов: иллюминаторов и зеркал, находящихся между объектом измерения и тепловизором, а именно: их температуры, коэффициенты пропускания и отражения.

Двигатели ЛО ВЧИД-16 и ДБ ВЧИД-8 находились внутри вакуумной камеры, поэтому поглощением теплового излучения в атмосфере в работе можно пренебречь. Тогда полную мощность излучения, полученную камерой в общем случае, можно записать в следующем виде:

$$W_{\text{сумм}} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{\text{объекта}} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{\text{среды}} + (1 - \tau) \cdot W_{\text{атм}}, \quad (4.1)$$

где ε - степень черноты объекта;

τ - коэффициент пропускания атмосферы;

$(1 - \varepsilon)$ - коэффициент отражения объекта.

Первое слагаемое в правой части есть собственное излучение объекта исследования, второе слагаемое характеризует отраженное излучение от окружающих источников.

Схема измерений теплового потока от объекта показана на рисунке 4.2.

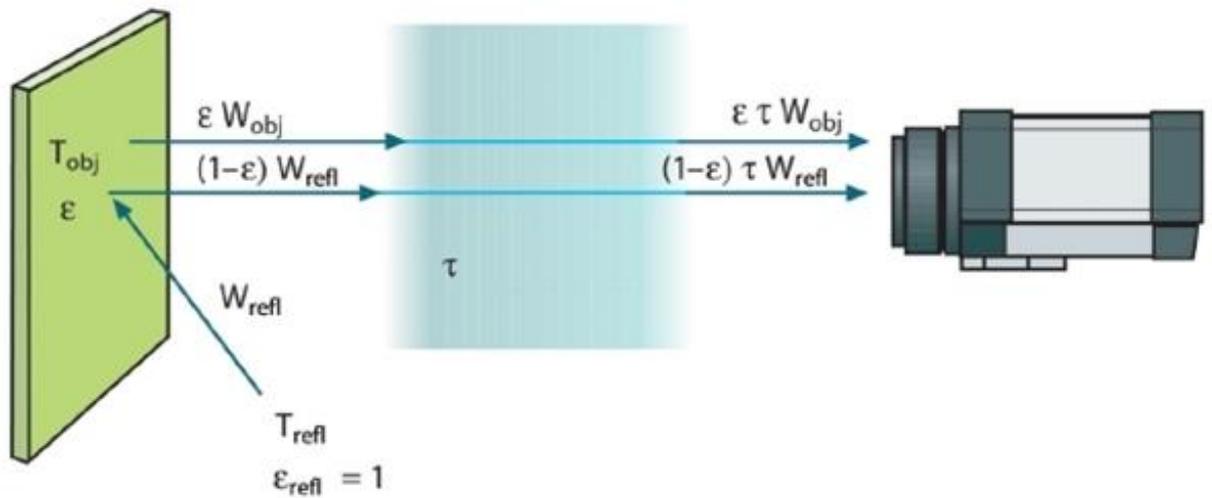


Рисунок 4.2 - Схема измерений теплового потока [78]

4.2 Методика предварительного определения теплофизических параметров материалов конструкции ВЧИД

Исследование с помощью тепловизора требует предварительного исследования теплофизических излучательных свойств объекта. Как следует из уравнения (4.1) для корректного вычисления температур исследуемого объекта нужно знать степень черноты поверхности объекта и такие параметры окружающей среды, как коэффициент пропускания и температура окружающей среды.

В различных источниках [79, 80, 81, 82] данные по степеням черноты приводятся без обозначения качества механической обработки и температуры поверхности. Попытка использования справочных данных по степени черноты материала ГРК (алюмооксидная керамика ВК-100 и ВК-94, а также нитрид кремния Si_3N_4) при первоначальных измерениях температур показала, что это может привести к значительным ошибкам. По этой причине было решено предварительно измерить степени черноты материалов, используемых в конструкции двигателя.

4.2.1 Определение индикатрисы теплового излучения с поверхностей ВЧИД и степени черноты материалов конструкции ВЧИД

Программное обеспечение, используемое в работе тепловизора, подразумевает, что индикатриса теплового излучения исследуемой поверхности соответствует «закону косинуса». Это также нуждалось в экспериментальной проверке.

Для обоснованности применения тепловизора модели FLIR SC645 для измерений теплофизических характеристик с учетом реальной индикатрисы излучения была создана установка, схематично показанная на рисунке 4.3, и проведен ряд экспериментов.

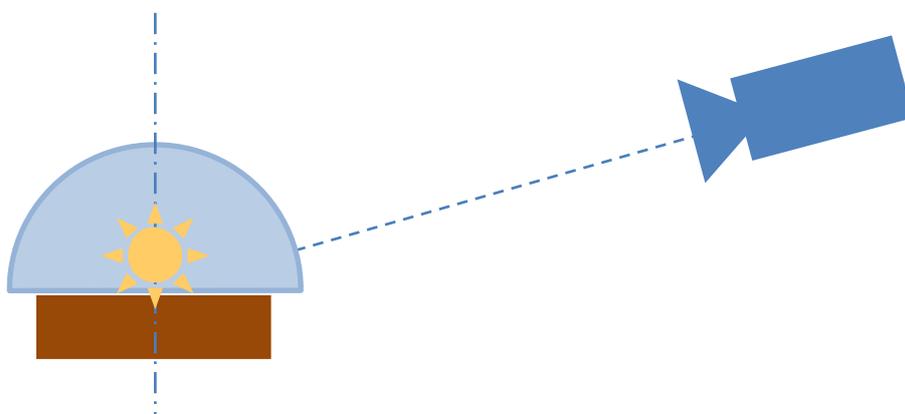


Рисунок 4.3 - Эскиз установки для теплофизических исследований

ГРК двигателя (использовалась ГРК ЛО ВЧИД-16), устанавливается на поворотный стол с нанесенными метками угла поворота. В качестве модельного источника тепла, размещаемого внутри ГРК (см. Рисунок 4.4), использовались две галогенные лампы (цоколь: R7S, длина: 78 мм.) с суммарной мощностью 300 Вт. Форма ламп и их взаимное расположение (см. рисунок 4.6) выбиралось таким образом, что бы обеспечить азимутальную симметрию прогрева поверхности ГРК. Установка позволяет регулировать мощность источника тепла. Тепловая мощность источника подобрана таким образом, чтобы температура на поверхности ГРК принимала значения, характерные для рабочих режимов ГРК (соответствовала ВЧ мощности разряда) разрабатываемых в лаборатории МАИ двигателей (~ 200-300 °С). Для подбора мощности нагрева использовался регулируемый лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) SuntexTDGC2.

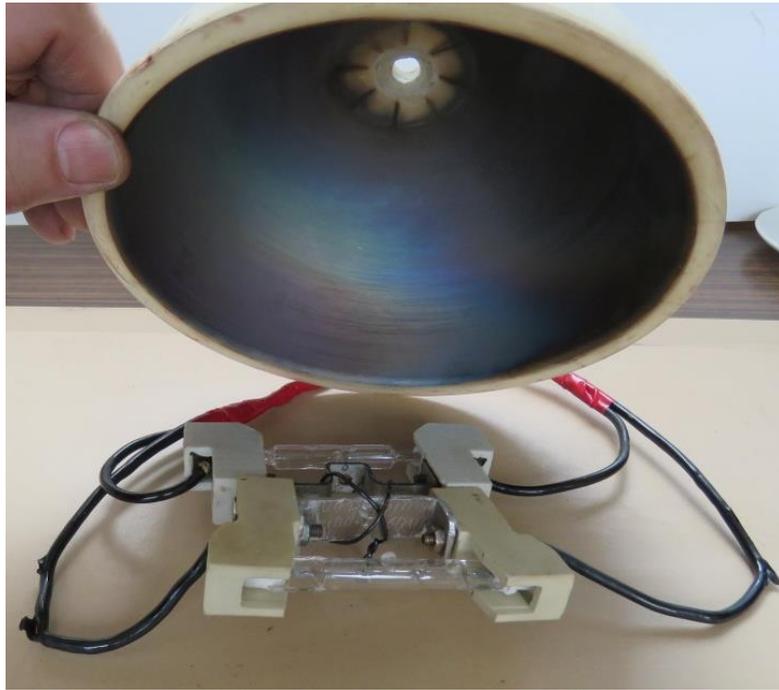


Рисунок 4.4 - Модельный источник тепла

Тепловизор устанавливался стационарно на треноге и ориентировался таким образом, чтобы оптическая ось его объектива была направлена приблизительно в геометрический центр сферы газоразрядной камеры. Масштаб увеличения объектива тепловизора подбиралось таким образом, чтобы изображение исследуемой ГРК помещалось в поле зрения тепловизора и не выходило за его границы. В качестве эталонной метки с известной степенью черноты $\varepsilon = 0,97$ [79, 82] использовалось покрытие из сажи, полученной при горении полистирола, нанесенное методом осаждения. Для получения четкой границы метки использовалась специальная маска. Изображение ГРК с нанесенной эталонной полосой сажи показано на Рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 - ГРК ЛО ВЧИД-16 с нанесенной меткой

Выход на стационарный тепловой режим контролировался по показаниям тепловизора. Время выхода на стационарный режим при данных измерениях составляло в среднем 20 минут. После установления стационарного теплового режима проводилось снятие показаний температур на термограмме тепловизора вблизи границы сажи на одной выбранной широте ГРК с разных сторон от границы нанесенного слоя сажи, как показано на Рисунке 4.6.

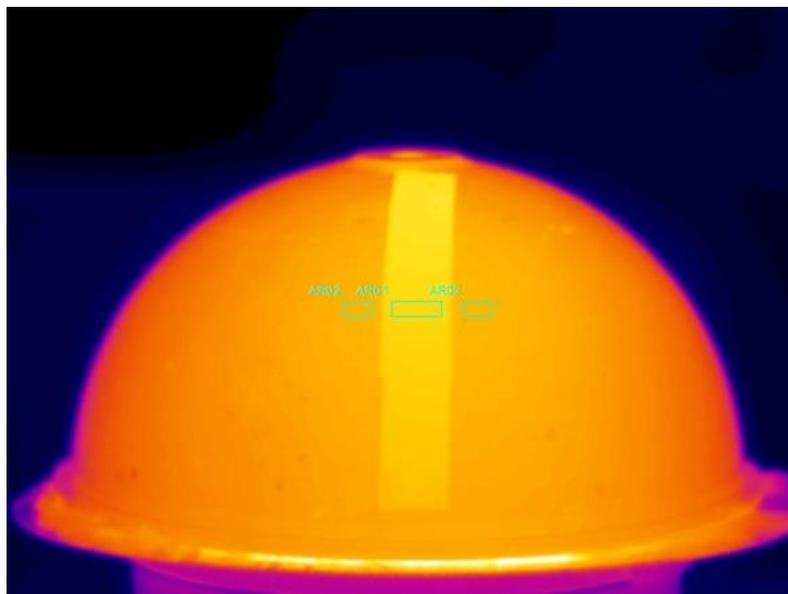


Рисунок 4.6 - Термограмма с отмеченными областями измерения

Принято, что в близких точках с разных сторон границы нанесенной на ГРК метки температура одинакова.

Для определения степени черноты газоразрядной камеры ВЧИД-8 было невозможно использовать установку, описанную в разделе 4.2.1. Из-за малого диаметра камеры подобрать источник теплового излучения необходимых для его размещения внутри камеры размеров было затруднительно. Поэтому для нагрева ГРК двигателя было решено использовать внешние источники тепла. Для этого использовалась муфельная печь, температура в которой устанавливалась на пульте управления. Независимый контроль производился с помощью термопар, размещенных внутри печи.

Газоразрядная камера с нанесенной меткой по методике, описанной в разделе 4.2.1, изображена на Рисунке 4.7. ГРК устанавливалась в печь таким образом, чтобы влияние отраженного излучения от ТЭНов было минимальным. Также для контроля равномерности прогрева камеры устанавливались две термопары: вблизи точки измерения на внешней и внутренней поверхностях камеры (см. Рисунок 4.8).



Рисунок 4.7 - Газоразрядная камера ВЧИД-8 с нанесенной меткой из сажи

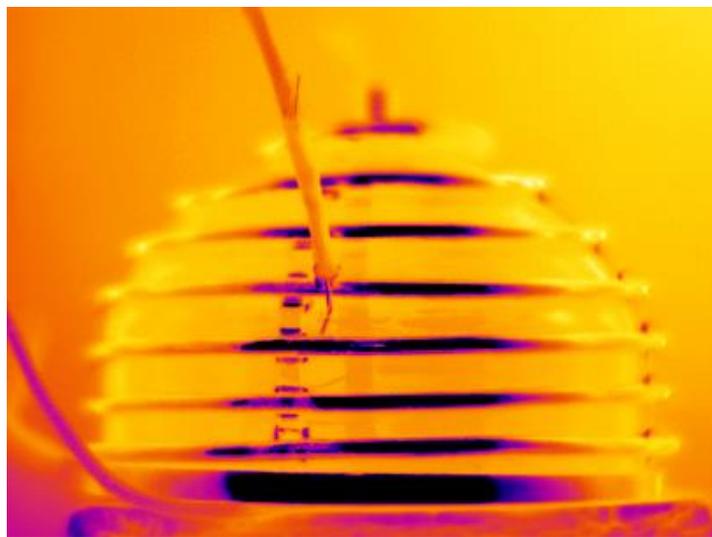


Рисунок 4.8 - Размещение термопар на газоразрядной камере ВЧИД-8

По показаниям значений температур с разных сторон от границы эталонной метки и известной степени черноты сажи степень черноты материала объекта выводилась в поле диалогового окна тепловизора (см. Рисунок 4.9).

Old emissivity:	<input type="text" value="0,700"/>
New emissivity:	<input type="text" value="0,345"/>
Result temperature:	<input type="text" value="150,0"/>
Known temperature:	<input type="text" value="150"/>
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Рисунок 4.9 - Пример диалогового окна ThermoCAM Researcher для вычисления степени черноты

Возможность этого обусловлена тем, что в тепловизоре производится автоматический расчет степени черноты, используя соотношение (4.2):

$$\varepsilon_{\text{мат}} = \varepsilon_{\text{черн}} \frac{T_{\text{мат}}^4}{T_{\text{черн}}^4}, \quad (4.2)$$

где $\varepsilon_{\text{мат}}$ - степень черноты исследуемого объекта;

$\varepsilon_{\text{черн}}$ - степень черноты эталонной метки;

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

$T_{\text{мат}}$ - радиационная температура исследуемого объекта при $\varepsilon = \varepsilon_{\text{черн}}$.

4.2.2 Результаты определения степени черноты материалов

Таблица 4.1. Степени черноты различных материалов ГРК ЛЮ ВЧИД – 16 в зависимости от мощности модельного источника

Материал камеры	Мощность модельного источника		
	150 Вт	225 Вт	300 Вт
Si ₃ N ₄	0.89	0.891	-
ВК-100(Al ₂ O ₃)	0,949	0,947	0,947

Таблица 4.2. Степени черноты ГРК ДБ ВЧИД – ММ в зависимости от температуры

Температура, °С	200	250	300
ВК-94 (Al ₂ O ₃)	0,91	0,91	0,92

Для определения индикатрисы теплового излучения $I(\theta)$, выходящего с поверхности ГРК, проводились измерения тепловых потоков при различных углах поворота ГРК в диапазоне от 0° до 70° с шагом в 5° и на разных уровнях (по широте) ГРК.

Выбиралась широта на поверхности ГРК, с соответствующей высотой h , отсчитываемой от основания ГРК. Через радиус ГРК R_0 определялся радиус окружности $r_{\text{метки}}$, соответствующий выбранной широте. Для определенности, долгота точки, на которой проводились измерения, выбиралась на меридиане, соответствующем левой границе сажи.

Для построения индикатрисы оптическая ось тепловизора должна совпадать с нормалью к измеряемой точке, однако добиться такого точного позиционирования достаточно сложно. Поэтому угол θ между оптической осью и нормалью определяется из векторного представления, в соответствии с рисунком 4.10:

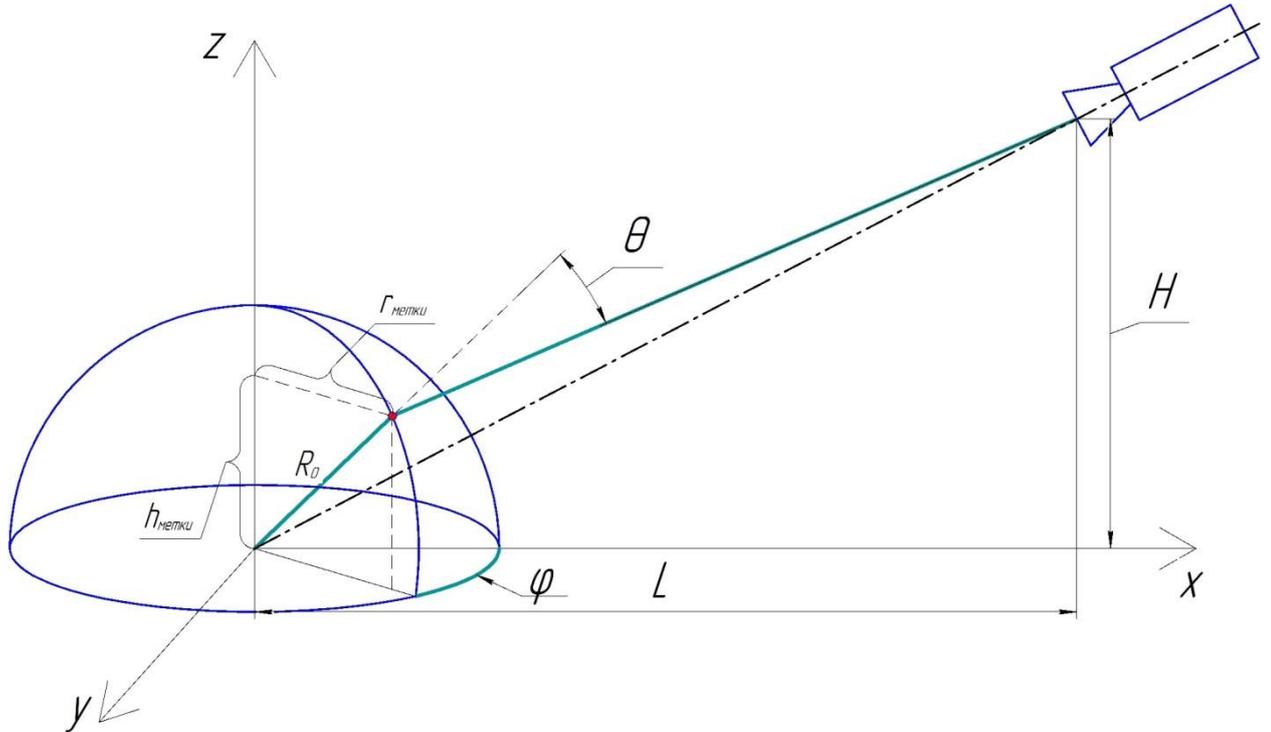


Рисунок 4.10 - Схема взаимного расположения тепловизора и газоразрядной камеры во время эксперимента

Определение угла θ в индикатрисе теплового излучения $I(\theta)$ производится из координат точки наблюдения и угла поворота φ по формуле (4.3)

$$\cos \theta(x, y, z) = \frac{L \cdot r_{метки} \cdot \cos \varphi + h_{метки}(H - h_{метки}) - r_{метки}^2}{R_0 \cdot \sqrt{L^2 + r_{метки}^2 + (H - h_{метки})^2} - 2 \cdot L \cdot r_{метки} \cdot \cos \varphi}, \quad (4.3)$$

где $r_{метки} = \sqrt{R_0^2 - h_{метки}^2}$;

R_0 – внешний радиус ГРК;

L – расстояние от оси ГРК до объектива тепловизора;

H – высота тепловизора относительно основания ГРК;

φ – угол поворота стола;

$h_{метки}$ – высота метки относительно основания ГРК.

Нормированная индикатриса приведена на Рисунке 4.11. Полученная индикатриса теплового потока с большой точностью описывается косинусоидальной зависимостью.

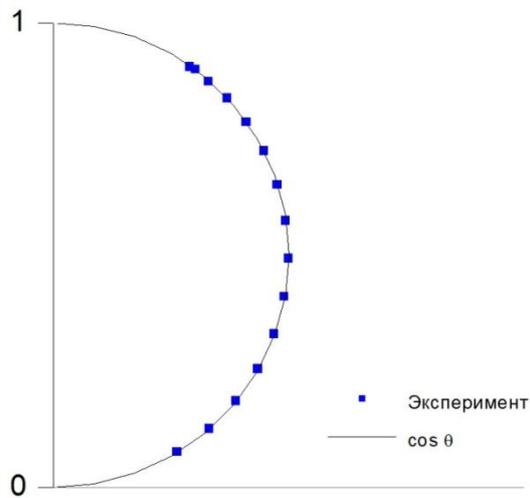


Рисунок 4.11 - Нормированное угловое распределение теплового потока

4.3 Методика и результаты измерения температурных полей на внешних поверхностях ГРК и ускоряющего электрода ИОС

4.3.1 Измерения температур в ЛО ВЧИД-16

Измерение температур в ЛО ВЧИД-16 проводилось на вакуумном стенде У-2В-2 (см. Рисунок 4.12).

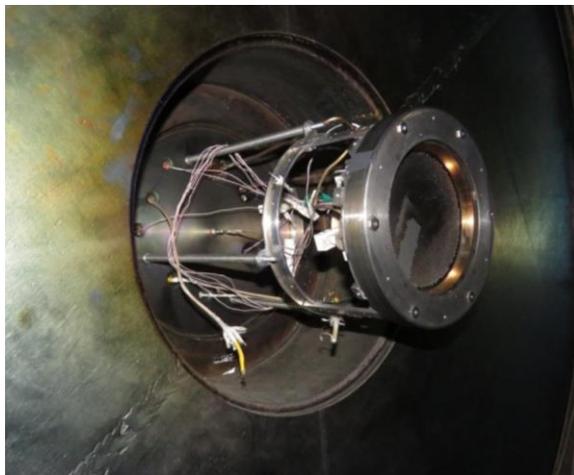


Рисунок 4.12 - Лабораторный образец ВЧИД-16 на стенде У-2В-2

Стандовый комплекс У-2В-2 предназначен для испытаний ионных двигателей в вакуумной камере (см. рисунок 4.13) при давлении не выше 1.333×10^{-3} Па при работающем двигателе. Стенд оснащен криогенными насосами типа «Velco» с общей быстротой действия по ксенону, который является рабочим телом ВЧИД до $230 \text{ м}^3/\text{с}$ при указанном давлении.



Рисунок 4.13 - Вакуумная камера стандового комплекса У-2В

Схематическое изображение оптических и измерительных систем представлено на Рисунке 4.14:

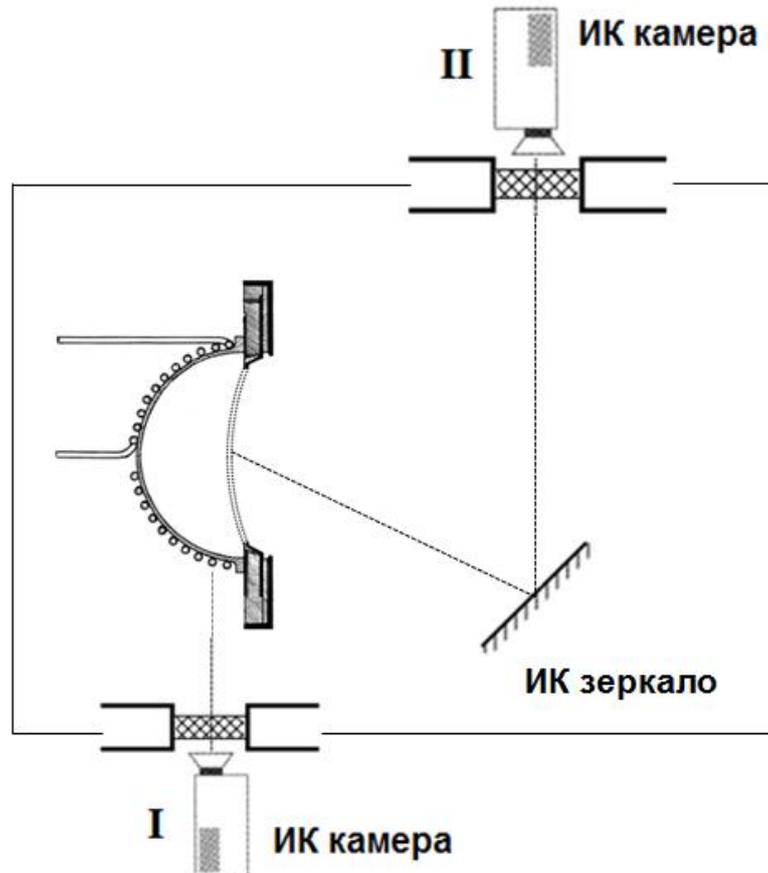


Рисунок 4.14 - Схематическое изображение измерительных систем

Тепловизор был установлен снаружи вакуумной камеры, и измерение проводилось через специальный иллюминатор с кристаллом (ZnSe), на который нанесено просветляющее покрытие. Коэффициент пропускания определялся экспериментально и в диапазоне ($\lambda = 7 - 14$ μm) равен 0,95. Для измерения температур поверхности ускоряющего электрода обращенной наружу, внутри вакуумной камеры было установлено ИК-зеркало с коэффициентом отражения 0,95 в диапазоне длин волн от 2 до 20 μm [83], который перекрывает диапазон работы тепловизора.

4.3.2 Результаты измерения температур в ЛО ВЧИД-16

На Рисунке 4.15 и Рисунке 4.16 представлены изображения, полученные при помощи тепловизора во время работы двигателя ВЧИД-16. Степень черноты устанавливается для всей термограммы и равна степени черноты сажи $\varepsilon = 0,97$.

На рисунке (4.15) видно, что газоразрядная камера прогрета почти равномерно. Ближе к газовводу температура падает. Определение профиля температуры перфорированной части ускоряющего электрода затруднено из-за недостаточного разрешения тепловизионной камеры. Однако можно сделать выводы о корректности расчетных данных

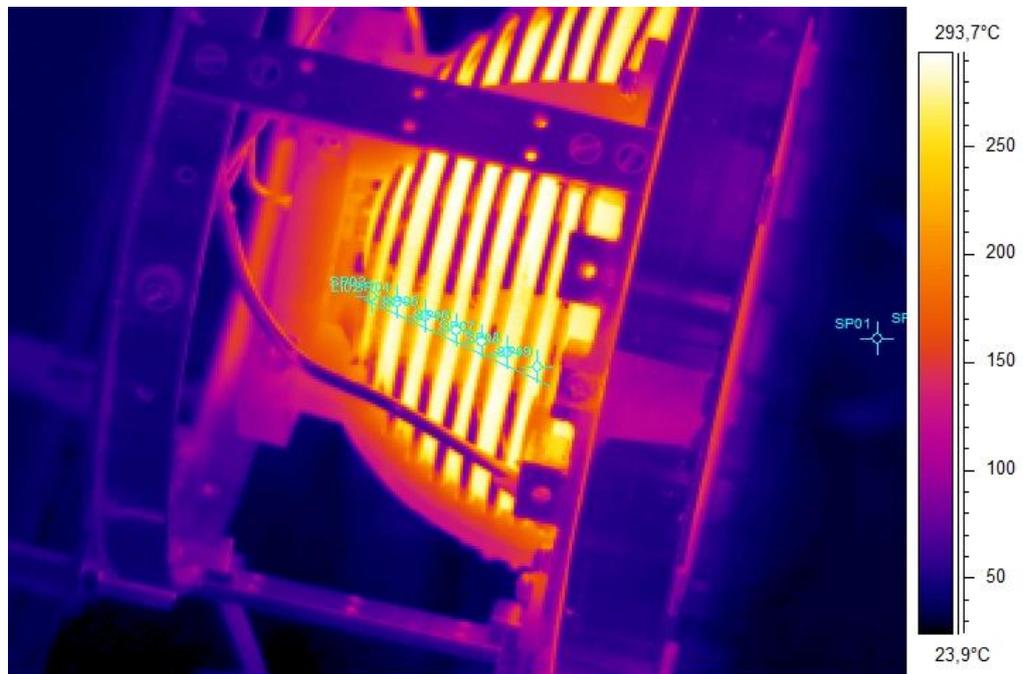


Рисунок 4.15 - Термограмма ГРК ВЧИД-16 при мощности разряда 200 Вт

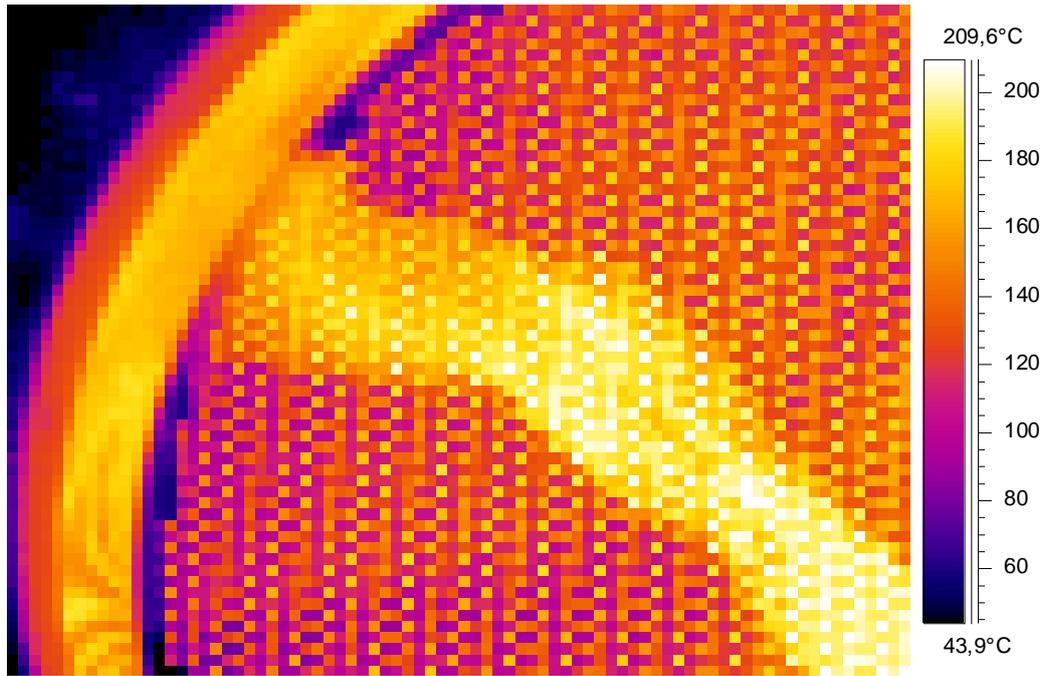


Рисунок 4.16 - Термограмма ускоряющего ВЧИД-16 при мощности разряда 200 Вт

4.3.3 Измерение температурных полей в ДБ ВЧИД-ММ

Измерение температур в ДБ ВЧИД-ММ проводилось на вакуумном стенде ИУ-2 (Рисунок 4.17, 4.18). Схема стендовой установки изображена на рис. Вакуумный стенд ИУ-2 предназначен для проведения кратковременных исследовательских испытаний ВЧИД мощностью до 1 кВт и длительных испытаний ВЧИД мощностью до 100 Вт. Стенд также был оборудован иллюминатором с кристаллом (ZnSe).



Рисунок 4.17 - Вакуумный стенд ИУ-2

Характеристики вакуумного стенда ИУ-2: Диаметр вакуумной камеры составляет 1 м., длина 2,5 м. Вакуумный стенд оснащён безмасляными средствами откачки. Для получения предварительного разрежения в вакуумной камере используется безмасляный форвакуумный насос Kashiyama MU-603 со скоростью откачки 166 л/сек, для достижения высокого вакуума используются: криогенный насос Velco 402 Хе со скоростью откачки 6800 л/с (по ксенону) при давлении 10^{-5} Торр, криогенный насос СТИ-CryogenicsOn-board 400 со скоростью откачки 5000 л/с (по ксенону) при давлении 10^{-5} Торр, турбомолекулярный насос ShimadzuTMP-3403 LM со скоростью откачки 3100 л/с (по ксенону) при давлении 10^{-5} Торр. Предельное разрежение (с учетом натекания) составляет $5,0 \times 10^{-7}$ Торр.



Рисунок 4.18 - Вакуумный стенд ИУ-2

Измерения температур проводились при различной ВЧ-мощности. Для учета прозрачности плазмы и собственного излучения плазмы была проведена серия сравнительных экспериментов с плазмой и без плазмы разряда.

4.3.4 Результаты измерения температур в ДБ ВЧИД-ММ

Профиль измерения температур ГРК ДБ ВЧИД-ММ изображен на Рисунке 4.19 и Рисунке 4.20.

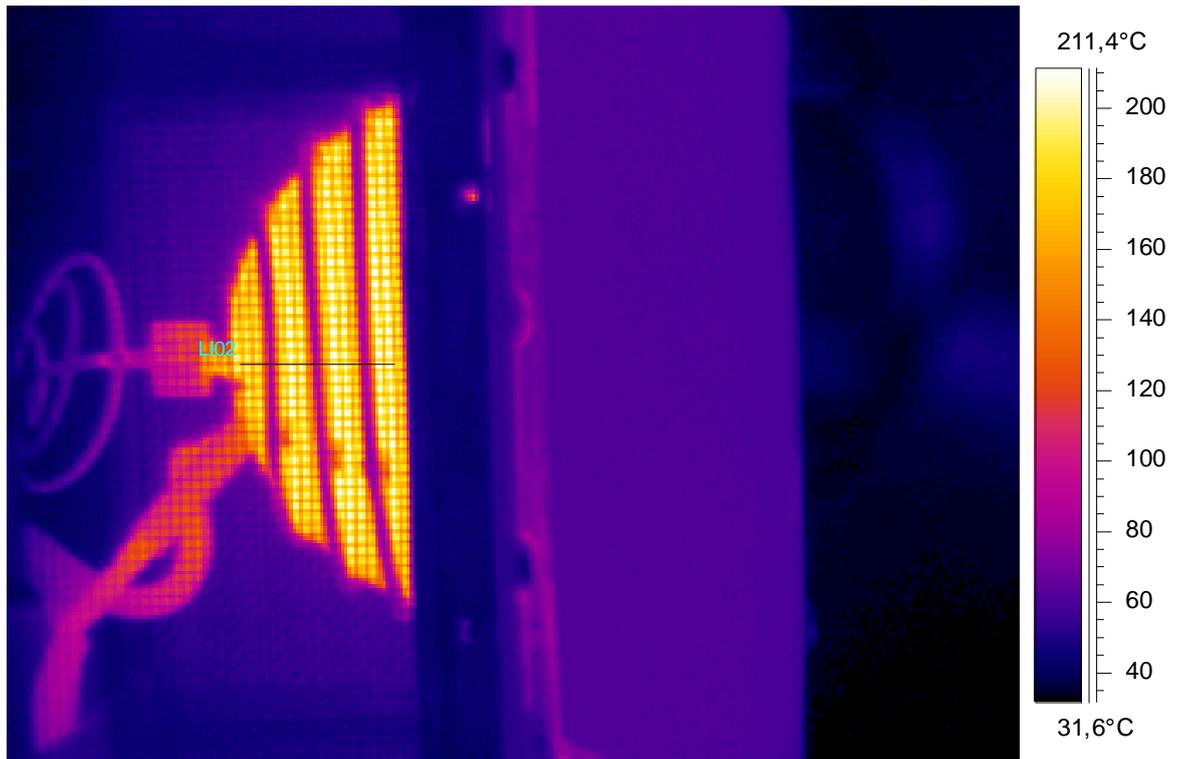


Рисунок 4.19 - Термограмма ДБ ВЧИД-8. L02 – обозначение линии профиля измерения температуры

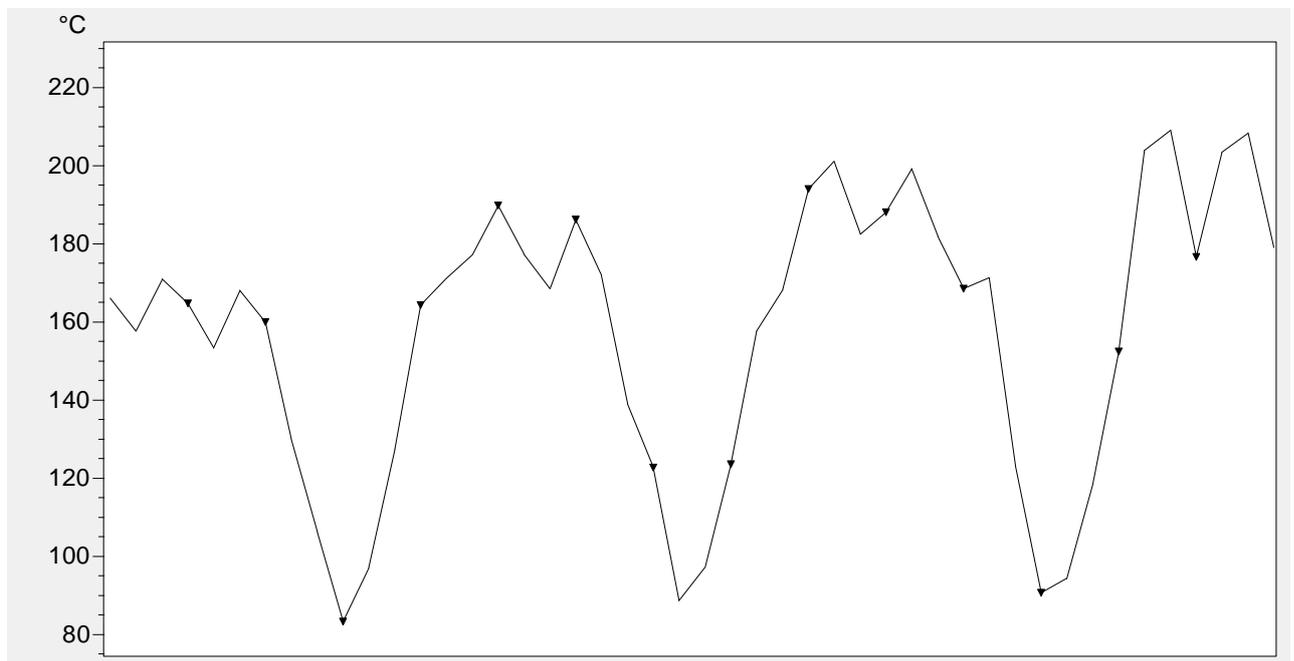


Рисунок 4.20 - Измеренный профиль температуры ГРК ДБ ВЧИД-8 при мощности разряда 55 Вт

4.4 Сравнение измеренных и расчетных температур

Далее приведены графики распределения температур профилю газоразрядной камеры для двигателей

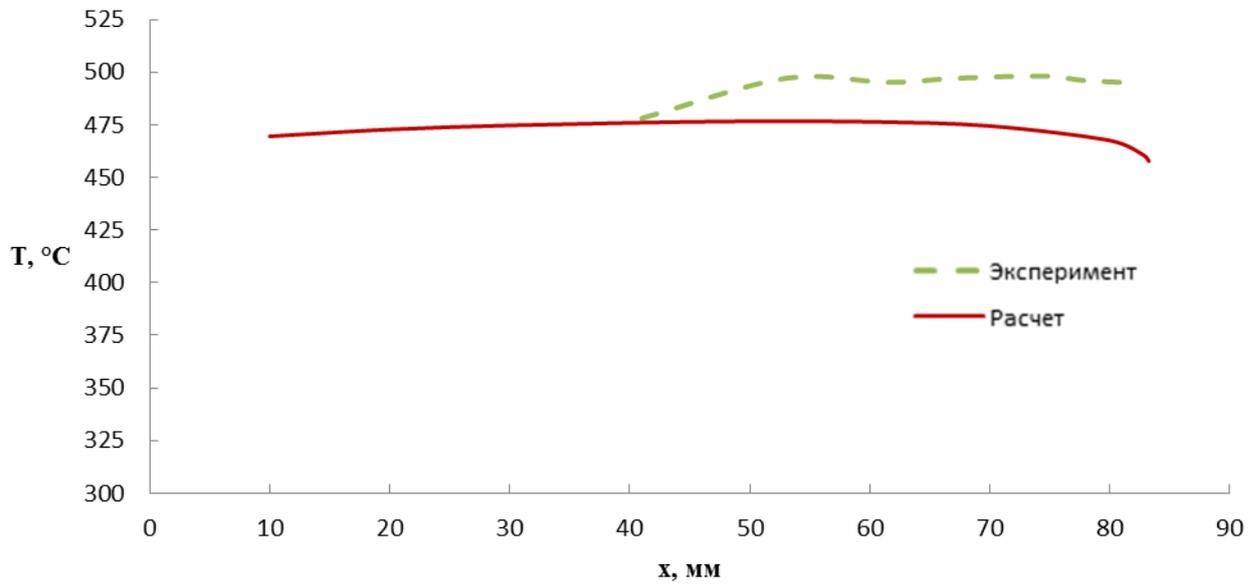


Рисунок 4.21 - Распределение температур на стенке газоразрядной камеры ВЧИД-16 при мощности разряда 170 Вт

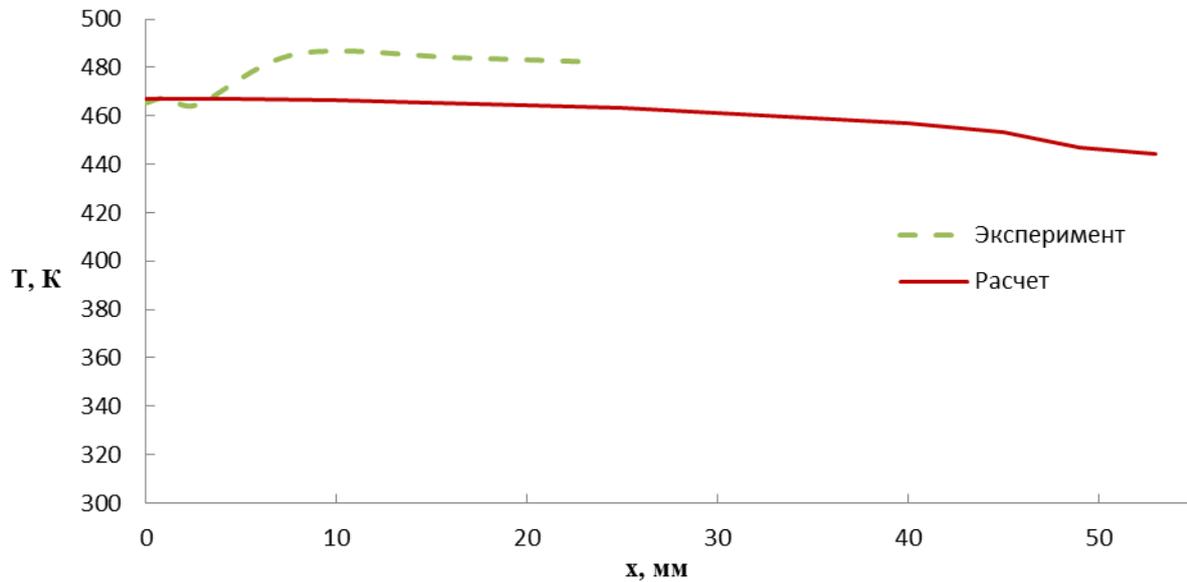


Рисунок 4.22 - Распределение температуры по образующей внешней поверхности ГРК ДБ ВЧИД-ММ при мощности разряда 55 Вт

4.5 Выводы раздела 4

Проведенные измерения температур ЛО ВЧИД-16 и ДБ ВЧИД-8 демонстрируют соответствие расчетных и экспериментальных температур на поверхности ГРК в пределах требуемой инженерной точности в 5%, что позволяет использовать предлагаемую численную тепловую модель расчета температурных распределений при проведении прогнозных расчетов с целью определения нагрева элементов конструкции высокочастотных ионных двигателей.

Результаты данного исследования были представлены на международных конференциях [84, 85].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ плазменных процессов в газоразрядной камере и ионно-оптической системе ВЧИД, определяющих тепловую нагрузку элементов конструкции двигателя, разработана модель теплофизических процессов, связывающая основные параметры плазмы индукционного высокочастотного разряда с тепловыделением в элементах конструкции двигателя.

2. Разработана тепловая модель ВЧИД, допускающая последовательное ее усложнение путем повышения уровня детализации объекта исследований, рассчитанная на использовании программного комплекса ANSYS.

3. Проведено численное моделирование температурных распределений 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, проведено определение теплофизических параметров алюмооксидной керамики и титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ1-4 необходимых для проведения тепловизионных измерений температур.

5. Проведено экспериментальное исследование температурных распределений в двигательном блоке на основе двигателя ВЧИД ММ и в лабораторном образце двигателя ВЧИД-16. Показано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

6. На этапе эскизного проектирования ВЧИД мощностью 15-20 кВт разработана тепловая модель и проведены расчеты температурных распределений, на основе которых выполнены расчеты термической деформации электродов ИОС и определены предельные режимы работы двигателя.

7. 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 ведущих предприятий космической отрасли.

Список литературы

1. Исследования и разработка космических высокоимпульсных высокочастотных плазмодинамических электроракетных ионных двигателей [Текст]: научно-технический отчет о НИР по Договору № 11.G34.31.0022 от 25 ноября 2010 года по Гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования / Науч.-исслед. ин-т прикладной механики и электродинамики; рук. Попов Г.А. – М., 2014. – 196 с. – Исполн.: Леб Х.В., Попов Г.А., Плохих А.П., Петухов В.Г., Константинов М.С., Шишкин Г.Г., Обухов В.А., Антропов Н.Н., Надирадзе А.Б., Хартов С.А., Абгарян В.К., Балашов В.В., Важенин Н.А., Гаврюшин В.М., Дьяконов Г.А., Кашулин А.П., Козлов В.И., Кравченко И.В., Федоров В.А., Рябый В.А., Семенихин С.А., Черкасова М.В., Ельников Р.В., Тютин В.К., Свотина В.В., Яковлев В.Н., Богатый А.В., Соганова Г.В., Тибрина М.К., Александрова А.В., Ахметжанов Р.В., Булаева М.Н., Гиль О.А., Жалялетдинова Р.А., Серов А.Д., Ситников С.А., Черный И.А., Трушина Е.Ю., Семенов В.А., Кудрявцев А.В., Абгарян М.В., Иванюхин А.В., Кожевников В.В., Круглов К.И., Машеров П.Е., Меркурьев Д.В., Могулкин А.И., Смирнов П.Г., Усовик И.В., Колесников В.А., Смирнов А.А., Смирнов П.Е., Стародубов А.И.- Библиогр. с. 185 – 196.
2. Edwards C. H. et al. The T5 ion propulsion assembly for drag compensation on GOCE // Second International GOCE User Workshop GOCE, The Geoid and Oceanography. – 2004.
3. Obukhov V. A., Petukhov V. G., Popov G. A. Application of stationary plasma thrusters for spacecraft insertion into the geostationary orbit //Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. Naples, Italy. – 2012. – Т. 9. – С. 7569-7577.
4. Попов Г. А., Константинов М. С., Петухов В. Г. Проектирование траекторий межорбитального перелёта космического аппарата с маршевыми электроракетными двигательными установками //Вестник РФФИ. – 2006. – №. 3. – 15 С.
5. Sovey J. S. et al. Development of an Ion Thruster and Power Processor for New Millennium's Deep Space 1 Mission // AIAA paper. – 1997. – Т. 97. – С. 2778.
6. Sovey J. S., Rawlin V. K., Patterson M. J. Ion propulsion development projects in US: space electric rocket test I to deep space 1 //Journal of Propulsion and Power. – 2001. – Т. 17. – №. 3. – С. 517-526.
7. Polk J. Overview of the USA electric propulsion programs // 30rd International Electric Propulsion Conference, Florence, 2007. - IEPC 2007-388.

8. Kuninaka H., Satori S. Development and demonstration of a cathodeless electron cyclotron resonance ion thruster // *Journal of Propulsion and Power*. – 1998. – T. 14. – №. 6. – C. 1022-1026.
9. Kuninaka H. et al. Flight status of cathode-less microwave discharge ion engines onboard Hayabusa asteroid explorer // *AIAA Paper*. – 2004. – T. 3438. – 10 P.
10. Brophy J. R. et al. The ion propulsion system for Dawn // *AIAA Paper*. – 2003. – T. 4542.
11. Löb, H. W. Ein elektrostatisches Raketentriebwerk mit Hochfrequenzionenquelle / H. W. Löb // *Astronautica Acta VIII*. – 1962. – T. 1. – C. 49.
12. Loeb H.W. “Principle of Radio-Frequency Ion Thrusters RIT”. Workshop RIT-22 Demonstrator Test at Astrium at Giessen University”. – Giessen. Germany. 2010.
13. Leiter, H. High Power Ion Thruster RIT-22 / H. Leiter, et al. // *Astrium TP*, Issue 1. Presented at the German-Russian Technical meeting in Giessen. 6-9 Sep., 2010.
14. Groh, K. H. State-of-the-art of radio-frequency ion thrusters / K. H. Groh, H. W. Loeb // *Journal of Propulsion and Power*. – 1991. – T. 7. – №. 4. – C. 573-579.
15. Killinger, R. ARTEMIS Orbit Raising In-flight Experience With Ion Propulsion / R. Killinger, R. Kukies, M. Surauer, A. Tomasetto, L. van Holtz // *Acta Astronautica* – 2003. – Vol. 53. – Issues 4-10. – P. 607-621.
16. Killinger R., RITA Ion Propulsion Systems for Commercial and Scientific Applications / H. Leiter, R. Kukies // *Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2007-5200, Ohaiom, USA.*– 2007.
17. Bulit A. ESA Propulsion Laboratory at ESTEC 2015. C. 1–6.
18. Muller, H. EMC Tests on the RITA Ion Propulsion Assembly for the ARTEMIS Satellite / H. Muller, R. Kukies and H. Bassner // *AIAA. Paper 92-3208*. - 1992.
19. Angelo N.G., Clark S., Wallace N., Collingwood C., Guarducci F. Qualification of the T6 Ion Thruster for the BepiColombo Mission to the Planet Mercury / N.G. Angelo, S. Clark, N.Wallace, C. Collingwood, F. Guarducci // *IEPC-2011-234, 32nd International Electric Propulsion Conference*. – September 11-15. – 2011. – 23 P.
20. Clark D.S., Hutchins S.M., Rudwan I. BepiColombo Electric Propulsion Thruster and High Power Electronics Coupling Test Performances // *Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D.C. (USA), 2013*. – *IEPC-2013-133*, 18 p.
21. Novikov I.K., Troschenkov S.V. Main Directions of Electric Propulsion Development in Russia through 2015 // *32nd International Electric Propulsion Conference, 2011*. – *IEPC-2011-331*.
22. Design of High-Power High-Specific Impulse RF-Ion Thruster / H.W. Loeb, D. Feili, G.A. Popov, A.I. Mogulkin et al. // *International Electric Propulsion Conference, 2011*. - *IEPC-2011-290*.

23. Могоулкин А.И. Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей: дис. канд. тех. наук: 05.07.05. / Могоулкин Андрей Игоревич. – М., 2015. – 161 с.
24. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике : [Учеб. для авиац. спец. вузов / В. С. Авдудевский, Б. М. Галицейский, Г. А. Глебов и др.]; Под общ. ред. В. С. Авдудевского, В. К. Кошкина. - [2-е изд., перераб. и доп.]. - М. : Машиностроение, 1992. – 518 с.
25. Abgaryan, V. K. High-Frequency Ion Sources of Inert and Chemically Active Gases / V.K. Abgaryan, H.W. Loeb, V.A. Obukhov, I.I. Shkarban // Journal of Surface Investigation, X-Rays, Synchrotron and Neutron Technologies. – 2012, V. 6, N 4. – p.p. 693-698.
26. Godyak V.A. Experimental Setup and Electrical Characteristics of an Inductively Coupled Plasma / V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85. – №. 2. – P. 703-712.
27. Обухов, В.А. Источники тяжелых ионов / В.А. Обухов, В.Г. Григорьян, Л.А. Латышев // В кн. Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М.: Наука, 1984. - С. 169-188.
28. Лёб Х. Высокочастотные источники ионов инертных и химически активных газов / В. К. Абгарян, Х. В. Лёб, В. А. Обухов, И. И. Шкарбан // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 8. – С. 70–75.
29. А.Н.Ткачев, С.И. Яковленко, Моделирование распространения и размножения электронов в однородном стационарном электрическом поле // Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова, 2007, Т. 63 С.64-101.
30. Бугров Г.Э., Кралькина Е.А. Расчет удельных энергозатрат на излучение в ксеноновом разряде низкого давления. Труды VI Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным инжекторам, Днепропетровск, СССР, 1986, С.93.
31. Кожевников, В.В. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности / В.В. Кожевников, С.А. Хартов // известия Российской академии наук. Энергетика. – 2017. – №. 3. – С. 13-20.
32. Кожевников, В.В. Исследование многоэлектродными зондами локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности / В.В. Кожевников, С.А. Хартов // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. – 2016, № 2. – С.26-33
33. Рябый В.А. Интегральная и локальная диагностики модели энергоэффективного ВЧ-источника ионного пучка / В.А. Рябый, П.Е. Машеров // Известия академии наук. Энергетика. – 2016. – №2. – С. 46-57.

34. Riaby V.A. On the Objectivity Of Plasma Diagnostics Using Langmuir Probes / V.A. Riaby, V.A. Obukhov, P.E. Masherov // High Voltage Engineering. – 2012. – Vol. 38. – P. 790-793.
35. Lotz, B. Plasma physical and material physical aspects of the application of atmospheric gases as a propellant for Ion-Thruster of the RIT-Type : дисс. PhD / Benjamin Lotz. - Justus-Liebig-Universität, 2013 – 115 с.
36. 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.
37. 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.
38. Cifali G., Misuri T., Rossetti P. et al. Experimental characterization of HET and RIT with atmospheric propellants. IEPC-2011-224//32nd Intern. Electric Propulsion Conf. Sept. 2011. Wiesbaden, Germany.
39. Cifali G., Dignani D., Misuri T., Rossetti P. et al. Completion of HET and RIT characterization with atmospheric propellants//Space Propulsion. 2012. May.
40. Патент – 116273 РФ. Источник ионов/ С.А. Хартов, А.И. Могулкин, В.А. Обухов; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - №2011148979; Заяв. 02.12.2011; Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 12.
41. Абгарян В.К. Численное моделирование высокоперевансной ионно-оптической системы с плазменным эмиттером / В.К. Абгарян, Р.В. Ахметжанов, Х.В. Лёб, В.А. Обухов, М.В. Черкасова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – №. 11. – С. 82-82.
42. Программный комплекс IGUN, [URL:http://www.egun-igun.com](http://www.egun-igun.com).
43. Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей / Е.А. Антипов, В.В. Балашов, А.И. Могулкин, А.И. Панков // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2013. - № 65.
44. Численное моделирование первичного пучка ионов и потока вторичных ионов в ионно-оптической системе ионного двигателя / В.К. Абгарян, Р.В. Ахметжанов, Х.В. Леб, В.А. Обухов // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2013. - № 71.
45. The Workshop on Electric Propulsion. Status Report / К-Н. Schartner et al. Nordwijk, 2008.

46. Goebel, D.M. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters / D.M. Goebel, I. Katz // Jet Propulsion Laboratory – California Institute of Technology / JPL Space Science and Technology Series. – 2008. – 486 p.
47. Bundesmann C. et al. In-situ temperature, grid curvature, erosion, beam and plasma characterization of a gridded ion thruster RIT-22 //31th International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, MI, September. – 2009. – C. 20-24.
48. In Situ Thermal Characterization of the Accelerator Grid of an Ion Thruster / C. Bundesmann, M. Tartz, H. Neumann, H.J. Leiter // Journal of Propulsion and Power.- 2011. – Vol.27. - № 3. – P.532-537.
49. Bundesmann C. [и др.]. Electric Propulsion Thruster Diagnostic Activities at IOM 2015. C. 1–6.
50. Bundesmann C. [и др.]. Note: An advanced in situ diagnostic system for characterization of electric propulsion thrusters and ion beam sources // Review of Scientific Instruments. 2010. № 4 (81). C. 4–6.
51. Van Noord, J. L. Thermal Development Test of the NEXT PM1 Ion Engine / J. R. Anderson, J. S. Snyder, J. L. Van Noord, G. C. Soulas // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2007-5217, Ohio. – 2007.
52. Van Noord, J. L. NEXT Ion Thruster Thermal Model. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2010.
53. Waldemar G., Lotz B., Meyer B.K. 3D Thermal Simulation of a μ N-RIT // IEPC-2013-298, 33rd International Electric Propulsion Conference, 6 – 10 October, 2013. - The George Washington University, Washington, D.C., USA. – 2013. – P. 1–6.
54. Dobkevicius M., Feili D. A coupled performance and thermal model for radio-frequency gridded ion thrusters //The European Physical Journal D. – 2016. – T. 70. – №. 11. – C. 227.
55. Fedorov V. A. Numerical Simulation of Temperature Deformation for Radio Frequency Ion Thruster Electrodes // Mogulkin A.I., Obukhov V.A., Abgaryan V.K., Balashov V.V.//Procedia Engineering. – 2017. – V. 185. – p. 24-30.
56. Piejak, R.B. A Simple Analysis of an Inductive RF Discharge / R.B. Piejak, V.A. Godyak, B.M. Alexandrovich // Plasma Sources Science and Technology. – 1992. – Vol. 1. – P. 179-186.
57. Chabert, P. Physics of Radio-Frequency Plasmas / P. Chabert, N. Braithwaite – Cambridge: University Press. – 2011. – 383 p.
58. Masherov, P.E. Integral Electrical Characteristics and Local Plasma Parameters of a RF Ion Thruster / P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.A. Godyak // Review of Scientific Instruments. – 2016. - V. 87. – 3 pp.

59. Машеров П.Е. Разработка космического источника ионов на основе высокочастотного ионного двигателя: дис. канд. тех. наук: 05.07.05./ Машеров Павел Евгеньевич – М., 2016. – 169 с.
60. Ryabiy V.A.//Technique of integral diagnostics for a radio-frequency inductively coupled plasma discharge unit of an RF ion thruster//Obukhov V.A., Kirpichnikov A.P., Masherov P.E., Mogulkin A.I.//Russian Aeronautics.-2015.-V. 58, No.4, p.448-453.
61. Wilbur, P. J. Ion thruster development trends and status in the United States / P. J. Wilbur, V. K. Rawlin, J. R. Beattie // Journal of Propulsion and Power. – 1998. – Т. 14. – №. 5. – С. 708-715.
62. Bassner H. et al. Development steps of the RF-ion thrusters RIT //27th International Electric Propulsion Conference. – 2001. – С. 01-105.
63. В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов Инженерный анализ в Ansys Workbench / Учебное пособие. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. - 271 с.
64. 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.
65. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой : Физ. распыление одноэлемент. твердых тел / [Р. Бериш, П. Зигмунд, М. Робинсон и др.]; Под ред. Р. Бериша. - М.: Мир, 1984. - 336 с.
66. Разработка на основе расчетно-теоретических и экспериментальных исследований конструкции высокочастотных ионных двигателей нового поколения и проведение их испытаний [Текст] : технический отчет по ОКР «ЭРДНП-НИИПМЭ» // Научн.-исслед. ин-т прикладной механики и электродинамики ; рук. Попов Г.А. – М., 2013. – 29 с. – Исполн.: Г.А. Попов, В.А. Обухов, В.В. Балашов, В.К. Абгарян, В.В. Свотина, А.С. Неверов, М.В. Черкасова, А.И. Могулкин, В.А. Федоров, Г.В. Кузнецов, К.И. Круглов, Г.В. Федотенков, Р.В. Ахметжанов, А.В. Шлыгин, В.А. Рябый, П.Е. Машеров, А.В. Александрова. - Библиогр.: с. 29. – № гос. рег. У-937763.
67. Антропов Н.Н. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя / Н.Н. Антропов, Р.В. Ахметжанов, А.В. Богатый, Р.А. Гришин, А.П. Плохих, Г.А. Попов, В.В. Кожевников, С.А. Хартов // известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – №. 2. – С. 4-14.
68. 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.
69. Kruglov, K.I. RFIT-450 Ion Thruster Thermal Model / K.I. Kruglov // Proc. 6th Int. Workshop and Summer School on Plasma Physics. – Sofia: University of Sofia.–2014.– P.37.
70. 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.
71. 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.
 72. 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.
 73. 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.
 74. 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.
 75. Антропов Н.Н. // Экспериментальное исследование высокочастотного ионного двигателя// Антропов Н.Н., Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Гришин Р.А., Кожевников В.В., Плохих А.П., Попов Г.А., Хартов С.А.// Известия академии наук. Энергетика.-2016. №2, с. 4-14.
 76. Высокочастотный ионный двигатель малой мощности, Пояснительная записка к эскизному проекту. МВАУ.131108.000 ПЗ. НИОКР «Исследования, разработка и стендовая отработка высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) малой мощности». - НИИ ПМЭ МАИ. – 2014.
 77. Круглов К.И., Численный расчет распределения температур в блоке системы питания и управления высокочастотного ионного двигателя / К.И. Круглов // Вестник Московского авиационного института. – 2017.– Т. 24. – № 4. – С.111-117.
 78. FLIR SC6xx User's manual, URL:[http://support.flir.com/DocDownload/Assets/dl/t559499\\$a547.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/dl/t559499$a547.pdf).
 79. Зуев А.А. Экспериментальное определение интегральной нормальной степени черноты рабочих поверхностей камеры сгорания в дизельных двигателях // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 31-36.
 80. Блох, А. Г. Тепловое излучение в котельных установках / А.Г. Блох. – Л.: Энергия, 1967. – 326 с.
 81. Bramson M.A. Infrared radiation: a handbook for applications, with a collection of reference tables. : Plenum Press, 1968.

82. Никитин П.В. Метод определения степени черноты термостойких покрытий / П.В. Никитин, С.А. Степаненко // Вестник Московского Авиационного Института. – 2008. – Том 15. – № 5. – С. 58-61.
83. Оптические зеркала. URL: <http://www.alkor.net/alkorru/optical-mirrors.html>.
84. 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.
85. 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. Могулкин // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». Тезисы. – М.: Типография «Люксор». – 2016. –С. 298-300.